



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA PETROLERA Y GAS NATURAL – PRODUCCIÓN

ESTUDIO DE FLUJO BACHE NORMAL EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN COSTA FUERA.

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ALBERTO MANUEL GONZÁLEZ IZAGUIRRE

TUTOR:  
YURI FAIRUZOV VALERIEVICH POSGRADO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. MARZO 2014

## **CONTENIDO**

RESUMEN	III
FIGURAS	V
TABLAS	VII
CAPÍTULO 1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1 FLUJO MULTIFÁSICO	2
1.2 OBJETIVO	8
CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE LITERATURA	9
2.2 FLUJO HORIZONTAL Y CASI HORIZONTAL.	14
2.2.1 FLUJO ESTRATIFICADO	14
2.2.2 FLUJO INTERMITENTE	14
2.2.3 FLUJO ANULAR	15
2.3.4 BURBUJA DISPERSA	16
2.3 FLUJO VERTICAL	17
2.3.1 FLUJO BURBUJA	17
2.3.2 FLUJO BACHE	18
2.3.3 FLUJO AGITADO	19
2.3.4 FLUJO ANULAR	19
2.4 MAPAS DE PATRONES DE FLUJO	20
2.5 BACHEO NORMAL O HIDRODINÁMICO	25
2.6 BACHEO SEVERO	28
2.7 BACHEO INDUCIDO POR CONDICIONES DEL TERRENO.	31
2.8 BURBUJA DE TAYLOR	33
2.9 TÉCNICAS DE CONTROL DE BACHEO.	37

2.9.1	REDUCCIÓN DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE LLEGADA DE TUBERÍA ASCENDENTE VERTICAL.	38
2.9.2	AUMENTO DE LA CONTRAPRESIÓN EN LA LÍNEA	38
2.9.3	TUBERÍA ASCENDENTE VERTICAL DOBLE O MÚLTIPLE.	38
2.9.4	RE-MEZCLADO A LA ENTRADA DE LA TUBERÍA ASCENDENTE VERTICAL.	39
2.9.5	INYECCIÓN DE GAS EN LA BASE DE LA TUBERÍA ASCENDENTE VERTICAL.	39
2.10	MÉTODOS DE PREDICCIÓN Y MODELADO.	41
	CAPITULO 3 MODELADO MECANISTICO DE FLUJO	47
3.1	CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO BACHE	47
3.2	DESCRIPCIÓN DE FLUJO BACHE	47
3.3	AVANCES EN CARACTERIZACIÓN DE FLUJO BACHE PARA DUCTOS HORIZONTALES LIGERAMENTE INCLINADOS.	51
3.4	CARACTERIZACIÓN DE FLUJO BACHE.	52
3.5	VELOCIDAD TAPÓN.	54
3.6	COLGAMIENTO DE LÍQUIDO DEL CUERPO DE TAPÓN.	56
3.7	LONGITUD DEL TAPÓN.	58
3.8	COMPORTAMIENTO DE BURBUJA/PELÍCULA.	62
3.9	EXISTENCIA DE FLUJO BACHE	67
3.10	TRANSICIÓN ESTRATIFICADA DEL TAPÓN.	68
3.11	TRANSICIÓN DE BURBUJAS DISPERSAS EN TAPÓN.	70
3.12	OTRAS INFLUENCIAS EN TRANSICIÓN DE FLUJO BACHE.	71
3.13	MODELO DE TERRENO	73
	CAPITULO 4 MODELO TRANSITORIO DE FLUJO BACHE	77

4.1	CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA	77
4.2	MODELADO DE FLUJO EN LA LÍNEA HORIZONTAL	80
4.3	MODELO DE FLUJO EN LA TUBERÍA ASCENDENTE VERTICAL	82
4.4	CONDICIONES DE INICIO	83
4.5	CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA	84
4.6	MÉTODO NUMÉRICO	85
	CAPÍTULO 5 COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES CON LAS PREDICCIONES DEL MODELO	87
	TABLA 1 CONDICIONES EXPERIMENTALES	96
5.1	SIMULACIÓN DEL EXPERIMENTO 2A	96
5.2	SIMULACIÓN DEL EXPERIMENTO 3A	101
5.3	SIMULACIÓN DEL EXPERIMENTO 4A	103
5.4	AJUSTES EN LAS VARIABLES.	106
	TABLA 2 AJUSTES EN SIMULACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	106
	CAPITULO 6 ESTUDIO DE FLUJO BACHE EN UNA INSTALACIÓN COSTA FUERA	107
	TABLA 3 VALORES UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN DE LA INSTALACIÓN COSTA AFUERA.	108
	CAPÍTULO 7 RESULTADOS Y CONCLUSIONES	112
7.1	CONCLUSIONES	112
7.2	RECOMENDACIONES	113
	BIBLIOGRAFÍA	114

## Resumen

En la industria petrolera se ha incrementado el número de problemas ocasionados por el flujo multifásico en la operación de las instalaciones de producción de hidrocarburos, específicamente el flujo bache. El flujo bache es el flujo alternado de tapones de líquido y grandes burbujas de gas, que provocan variaciones importantes de presión y gasto. Este fenómeno puede afectar de forma significativa e irreversible al yacimiento, provocando conificación anticipada de agua o gas y afectando de forma más evidente a las instalaciones superficiales de producción, las cuales se someten a esfuerzos que acortan su vida operativa y disminuyen su capacidad, al tener que operarse en condiciones diferentes a las consideradas en el diseño de estas.

Con el desarrollo de modelos matemáticos se ha incrementado el énfasis en varios tipos de optimización; especialmente se han obtenido métodos para analizar y explicar matemáticamente el flujo tipo bache conocido como “bacheo severo” en tuberías e instalaciones. Este trabajo de investigación está basado en la comparación de los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio. En dicho trabajo se analizarán aspectos relacionados con el ámbito petrolero. La optimización en sistemas petroleros, ha sido de gran importancia para el desarrollo de nuevas tecnologías; por ejemplo la inyección de gas en la base de la tubería ascendente vertical ha sido identificada como un proceso práctico para reducir el efecto del bacheo; sin embargo los modelos de cálculo existentes para este tipo de flujo no consideran los efectos del gas de inyección, son aplicables al bacheo severo, o bien consideran baches normales de longitud menor a la altura de la tubería ascendente vertical.

Con el apoyo de un programa matemático desarrollado en Fortran, se intentará buscar un procedimiento que optimice las operaciones en las instalaciones de producción petrolera.

La propuesta de este trabajo es analizar el desempeño productivo, comparando los resultados experimentales con uno real, con el fin de maximizar las ganancias y minimizar los problemas técnicos en las instalaciones de producción.

## Figuras

FIG. 1 DIAGRAMA DE FORMACIÓN DE UN FLUJO BACHE SEVERO EN LA BASE DE UNA TUBERÍA ASCENDENTE VERTICAL. ....	6
---	---

FIG. 2 PATRONES DE FLUJO EN TUBERÍAS HORIZONTALES. [SHOHAM, 2001].....	17
FIG. 3 PATRONES DE FLUJO EN TUBERÍAS VERTICALES [SHOHAM, 2001].....	20
FIG. 4 MAPA DE PATRONES DE FLUJO PARA TUBERÍAS HORIZONTALES TAITEL Y DUKLER. ....	22
FIG. 5 MAPA DE PATRONES DE FLUJO PARA TUBERÍAS HORIZONTALES BAKER. ....	24
FIG. 6 MAPA DE PATRONES DE FLUJO PARA TUBERÍAS HORIZONTALES GRIFFITH Y WALLIS.....	25
FIG. 7 FORMACIÓN DE BACHEO NORMAL (HIDRODINÁMICO) EN UN SISTEMA TUBERÍA HORIZONTAL TUBERÍA ASCENDENTE VERTICAL.....	26
FIG. 8 FORMACIÓN DE BACHEO SEVERO EN UN SISTEMA TUBERÍA HORIZONTAL TUBERÍA ASCENDENTE VERTICAL. .....	29
FIG. 9 FORMACIÓN DE FLUJO TIPO BACHE POR TERRENO IRREGULAR.....	32
FIG. 10 ESQUEMA DE LA BURBUJA DE TAYLOR .....	37
FIG. 11 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA SEGÚN MIYOSHI ET AL. (1988).....	44
FIG. 12 ESQUEMA DEL SISTEMA ANALIZADO POR GUZMÁN Y FAIRUZOV.....	46
FIG. 13 PROCESO DE FORMACIÓN DE FLUJO BACHE. ....	48
FIG. 14 MODELO FÍSICO DEL FLUJO BACHE. ....	53
FIG. 15 CORRELACIÓN DE LA LONGITUD DEL TAPÓN .....	59
FIG. 16 LONGITUD DE TAPÓN EN EL MAPA DE ESQUEMAS .....	60
FIG. 17 FRECUENCIA DE FLUJO TAPÓN EN EL ESQUEMA DEL PATRÓN DE FLUJO .....	61
FIG. 18 PRECISIÓN DE LA SIMPLIFICACIÓN DEL EQUILIBRIO DE LA PELÍCULA. ....	65
FIG. 19 ESQUEMA DE LA LONGITUD DE LA BURBUJA .....	66
FIG. 20 TRANSICIONES DE FLUJO PATRÓN A EL MODELO DE ESTABILIDAD DEL TAPÓN.....	70
FIG. 21 EFECTO DEL TERRENO EN LA LONGITUD DEL TAPÓN. ....	75
FIG. 22 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE Y CONFIGURACIÓN DEL FLUJO.....	78
FIG. 23 FLUJOS VOLUMÉTRICOS EN EL TRAMO ASCENDENTE VERTICAL (BP, FORTIES MANUAL) .....	79
FIG. 24 CONDICIONES INICIALES DEL SISTEMA.....	83
FIG. 25 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL CON INYECCIÓN DE GAS EN LA BASE DE LA TUBERÍA ASCENDENTE VERTICAL .....	88
FIG. 26 COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES CON PREDICCIÓN DEL MODELO.....	97
FIG. 27 COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES CON PREDICCIÓN DEL MODELO.....	98
FIG. 28 SEGUIMIENTO DEL FLUJO BACHE DESDE LA TUBERÍA HORIZONTAL HASTA EL SEPARADO..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIG. 29 COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES CON PREDICCIÓN DEL MODELO.....	101
FIG. 30 COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES CON PREDICCIÓN DEL MODELO.....	102
FIG. 31 COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES CON PREDICCIÓN DEL MODELO.....	103
FIG. 32 COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES CON PREDICCIÓN DEL MODELO.....	104
FIG. 33 COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES CON PREDICCIÓN DEL MODELO.....	104
FIG. 34 SIMULACIÓN EXPERIMENTO 4A, AJUSTADO CON UN MENOR RANGO EN EL TIEMPO .....	105
FIG. 35 VARIACIÓN DE PRESIÓN EN EL FONDO DE LA BASE DE LA TUBERÍA VERTICAL ASCENDENTE. ....	109

<b>FIG. 36 SIMULACIÓN DE UNA INSTALACIÓN COSTA FUERA LONGITUD DE BURBUJA 8,000 METROS .....</b>	<b>110</b>
<b>FIG. 37 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD CON RESPECTO AL REPRESIONAMIENTO EN LA BASE DE LA TUBERÍA ASCENDENTE VERTICAL.....</b>	<b>111</b>

## **Tablas**

TABLA 1 CONDICIONES EXPERIMENTALES.....	96
TABLA 2 AJUSTES EN SIMULACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	106
TABLA 3 VALORES UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN DE LA INSTALACIÓN COSTA AFUERA.....	108



## **CAPÍTULO 1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

En este capítulo se describen los antecedentes que dieron origen al seguimiento del problema de investigación relacionado con el flujo bache normal, así como su planteamiento, definición y justificación. Adicionalmente se establecen los objetivos que se pretenden alcanzar al resolver este problema.

Se ha hecho énfasis especial en el estudio de flujo multifásico en la industria petrolera, en la que se emplean métodos para calcular la caída de presión y el gasto en régimen permanente, a través de correlaciones empíricas. En la actualidad, se presenta un gran número de problemas operativos, debido al patrón de flujo que las instalaciones petroleras presentan. Particularmente, se realiza un estudio detallado de cada instalación para su operación adecuada.

Una técnica viable para la operación adecuada de las instalaciones petroleras sería la inyección de gas en la base de la tubería ascendente vertical, esto consiste en el levantamiento con gas de un flujo tipo bache, desde cierta profundidad hasta la superficie, la inyección de gas es un proceso cíclico similar al sistema artificial de bombeo neumático intermitente, en el cual se forma un flujo tipo bache de líquido en la tubería de producción, originado por el flujo de fluidos; cuando el líquido alcanza una longitud predeterminada por el diseño, se inyecta gas a alta presión a través de una válvula, por lo que el bache de líquido se impulsa hacia arriba debido a la presión y expansión del gas debajo de este; la movilidad rápida del gas, continuamente penetra o sobrepasa el fondo del flujo tipo bache, resultando el desplazamiento y disminución de

la longitud de este. Simultáneamente se forma una película de líquido en las paredes de la tubería conforme la burbuja del gas rebasa la superficie inferior del flujo tipo bache. El líquido empieza a producir en cuanto el bache del líquido alcanza la entrada al separador. Después de que se presenta el flujo tipo bache el gas se expande rápidamente y barre parte del líquido de la película formando un bache secundario por el arrastre del líquido dentro del núcleo de gas. El líquido es producido por esta forma de arrastre hacia el separador, mientras la expansión de gas lo continúa arrastrando hacia arriba. Después de que se produce el líquido arrastrado, el líquido remanente que no alcanza la superficie y el líquido de la película, descienden por efectos de la gravedad adicionándose al flujo tipo bache que se está volviendo a producir.

## **1.1 Flujo Multifásico**

Por definición, un flujo multifásico es la circulación simultánea en varias fases, ya sea sólido, líquido o gas a través de la misma región. El bacheo se refiere al flujo variable o irregular y se crea con gas y líquido fluyendo a través de cualquier sección de la tubería. Hay una variedad amplia de tipos de flujo bache; uno de ellos es el bacheo hidrodinámico que se construye en la tubería horizontal o partes de ella, pero así mismo también puede existir en los pozos petroleros, o en la base de la tubería ascendente vertical. Este tipo de baches son usualmente cortos y aparecen con frecuencia. En la mayoría de los casos el separador tiene la capacidad de manejar este flujo bache

adecuadamente, desde que la cantidad de líquido en cada tapón es comparada con el volumen libre del separador.

El flujo bache puede ocurrir en un sistema de *tubería ascendente vertical* en el que la tubería inclinada, o en un terreno irregular, seguida a continuación bajo una tubería ascendente vertical. Para dicho sistema, a flujos bajos de gas y líquido, el líquido se acumula en la base de la tubería ascendente vertical y en la tubería, bloqueando el paso del flujo del gas. Los resultados son una compresión del gas en la tubería. Cuando la presión del gas en la tubería se ha incrementado suficientemente como para alcanzar la presión hidrostática de la columna de líquido, el gas se expandirá y empujará la columna de líquido fuera de la tubería ascendente vertical hacia el separador. Esta condición es indeseable en el sistema de producción, debido a la fluctuación del gasto de flujo y presiones del sistema, la cual generalmente tiene un efecto negativo, que se propaga hasta la misma formación productora (yacimiento), provocando una reducción en la capacidad de producción de los pozos, generando condiciones que provocan el flujo de fluidos no deseados.

El flujo bache tiene efectos negativos en la seguridad operativa de las instalaciones de producción, debido a las situaciones de alta y baja presión en el sistema, las cuales pueden causar un daño irreparable para las instalaciones.

En toda industria, el objetivo primordial es el maximizar las operaciones de una instalación de producción. En la industria petrolera una táctica comúnmente empleada es estrangular el flujo durante el proceso, sin tener en cuenta el problema que se está causando a la instalación de producción. Existen diferentes esquemas de diseño de la

infraestructura, los cuales combinan aspectos operativos y económicos para hacer eficiente el transporte de los hidrocarburos; estos esquemas están fuertemente afectados por las características geográficas del campo productor. Algunas de las configuraciones con tuberías individuales que transportan la producción de cada pozo hacia la instalación central, pueden representar la mejor opción en escenarios donde coexisten pozos con amplios rangos de gastos y presiones en la cabeza; con cambios muy severos en la elevación de las instalaciones o en yacimientos con un depresionamiento acelerado. Por lo general resulta económicamente más rentable el sistema de recolección, en el cual las tuberías de los pozos individuales de tamaño reducido, se conectan a líneas principales de mayor diámetro y longitud considerable, que transportan la producción mezclada de distintos pozos, o incluso de distintos campos. Este esquema de desarrollo de infraestructura alcanza su utilidad máxima en campos de gran extensión, con un número grande de pozos, y en zonas de acceso difícil; pero sobre todo, en instalaciones costa afuera. El flujo multifásico está íntimamente ligado a las variaciones de presión y temperatura experimentadas en toda la trayectoria de flujo; según las características fisicoquímicas de los fluidos, la mezcla transportada probablemente fluya en dos o tres fases (líquido, gas y sólido). El análisis del comportamiento del flujo multifásico es bastante complejo, esto se debe a las configuraciones múltiples en las que se pueden distribuir los fluidos dentro de una tubería de producción.

El transporte de mezclas en tuberías es una operación que se encuentra frecuentemente en toda industria petrolera, desde las actividades de producción, transporte, etc.

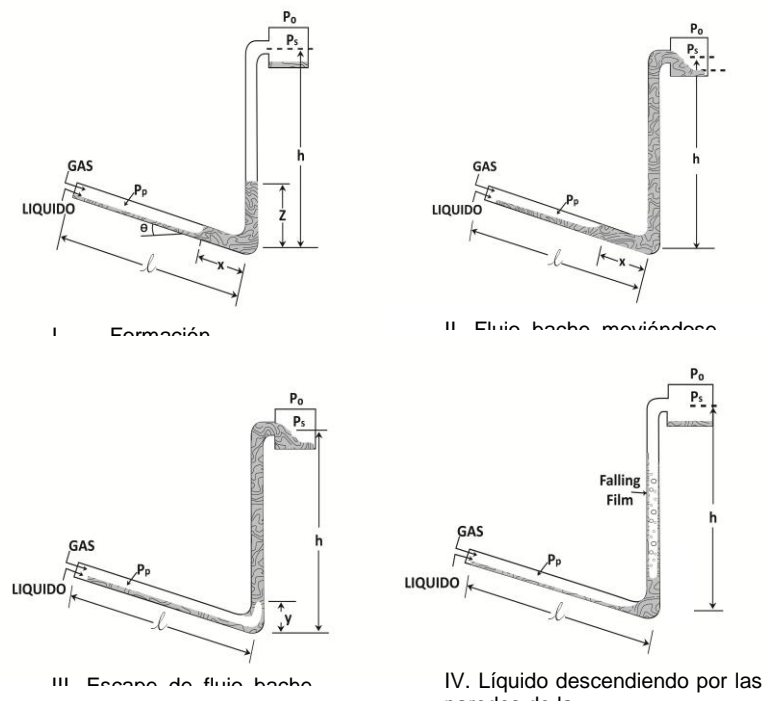
En la industria existen numerosos procesos que dan lugar al flujo de mezclas multifásicas, por lo que el flujo bache ha sido identificado como un problema grave para la operación de las instalaciones. Por ejemplo en procesos químicos, en redes de recolección de hidrocarburos, etc. por lo que el método comúnmente usado para reducir el fenómeno es estrangular el flujo mediante válvulas de estrangulamiento lo cual propicia un flujo más estable, sin embargo esta práctica tiene efectos adversos sobre las instalaciones. En el caso de la industria petrolera el efecto irreversible sería ocasionando en el yacimiento y los pozos productores. Esta situación alcanza condiciones críticas en yacimientos en etapa madura de su explotación, los cuales generalmente se producen a través de pozos que operan en condiciones de flujo subsónico, de manera que cualquier disturbio en la red de recolección provoca una contrapresión que viaja hasta el yacimiento. El aumento de la presión en el sistema provoca la operación ineficiente de este, al alejarse de las condiciones para las cuales fue originalmente diseñado.

En consecuencia el flujo bache ha ocasionado diversos problemas que se describen a continuación:

- Al enviar el gas a quemador, gran parte de los condensados se pierde,
- Las instalaciones de separación operan fuera de las condiciones de diseño, esto se debe a las variaciones en la presión.
- La tubería y accesorios están expuestos al continuo golpe de ariete, esto ocasiona que todo accesorio esté expuesto a fugas o continuas fisuras en su estructura.

Para ejemplificar el tipo de problema que se analizará en este trabajo de investigación considérese la siguiente situación:

Supóngase una instalación costa fuera que tiene una producción de 1,000.0 barriles de crudo diario, ésta ha presentado problemas con el flujo multifásico (bacheo severo). A partir de unos meses se ha incrementado el flujo tipo bache haciendo inestable el manejo de la instalación. De tal manera que es difícil mantener la producción de 1,000.0 barriles de crudo diarios, ya que la instalación continuamente está en reparación debido a fugas en tuberías o separadores. En la figura 1, se muestra esquemáticamente este problema de flujo bache severo.



**Fig. 1 Diagrama de formación de un flujo bache severo en la base de una tubería ascendente vertical.**

La problemática queda claramente expuesta si se analizan dos situaciones diferentes. En ambos casos la formación del flujo bache se lleva a cabo, la problemática a estudiar es evitar que se forme el flujo bache y el flujo llegue continuo a la etapa de separación.

PEMEX-Exploración y Producción cuenta con varias plataformas costa fuera localizadas en diferentes puntos dentro de la zona de Campeche. La producción de hidrocarburos de estas plataformas debe complementar la plataforma de producción mínima requerida por día. Teniendo como base esta situación la industria petrolera puede plantearse la siguiente pregunta: ¿Cuál sería la mejor forma de evitar el flujo tipo bache dentro de las tuberías que confluyen en las plataformas petroleras?

En el presente trabajo se analizarán los datos experimentales con los datos reales de un sistema costa fuera, a través de un modelo matemático se estudiarán los distintos escenarios que se presentan en una plataforma.

Una situación análoga se puede presentar en una planta de procesamiento. En las instalaciones de reactores y tanques de almacenamiento se presenta comúnmente el problema de flujo tipo bache. Las plantas tienen distintos arreglos en sus instalaciones de producción y es posible la formación de flujo tipo bache; ¿cuál será la “metodología” a seguir para evitar la formación de flujo tipo bache en las instalaciones de producción?

## 1.2 Objetivo

Se presentaran los datos experimentales obtenidos en un laboratorio y se analizarán en el modelo matemático, posteriormente se considerará una instalación consta fuera, para simular la realidad ¿Qué se debe hacer para facilitar el manejo de la producción en una plataforma costa fuera?, ¿Cómo se puede minimizar el flujo tipo bache?



## CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE LITERATURA

En este capítulo se darán a conocer los antecedentes que han dado origen al amplio estudio del fenómeno de bacheo en un flujo multifásico.

El estudio de flujo multifásico en tuberías requiere la comprensión de los mecanismos y características del flujo de dos o más fases en una sección del sistema de producción. Para la solución de cualquier problema de flujo de fluidos se requiere un conocimiento previo de las propiedades físicas del fluido en cuestión. Así como también conocer los valores exactos de las propiedades de los fluidos que afectan a su flujo, principalmente la viscosidad. Esto expresa la facilidad que tiene un fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza. El coeficiente de viscosidad absoluta, es una medida de resistencia al deslizamiento o a sufrir una deformación. La viscosidad se puede predecir en la mayor parte de los fluidos, en algunos la viscosidad depende del trabajo que se haya realizado sobre ellos. La viscosidad cinemática, es el cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad. La densidad de una sustancia es su masa por unidad de masa, la cual también es de vital importancia para el estudio del flujo de fluidos. La capacidad de flujo de un sistema integral de producción está en función de longitudes y diámetros de la tubería, así como de las propiedades de los fluidos, con los cuales se determinan las pérdidas de presión de las mezclas de fluidos.

Ahora bien, la predicción de los taponés en una tubería que transporta un flujo multifásico ha sido relevante para calcular las caídas de presión en ésta. Alrededor de 1950 se inició una investigación extensiva y profunda para desarrollar métodos

confiables y entender los fenómenos que ocurren en una tubería de flujo multifásico. En general, los métodos desarrollaron para evaluar las caídas de presión en la tubería, Brill y Arirachakaran (1992).

Se han desarrollado modelos matemáticos para la predicción de los distintos fenómenos que ocurren dentro de un flujo multifásico horizontal. La predicción del colgamiento del líquido en el cuerpo del tapón en un flujo multifásico gas líquido es sumamente importante para tener datos exactos de la caída de presión en la tubería. Los modelos matemáticos presentados por Dukler-Hubbard (1975) y Nicholson et al. (1978) para flujo horizontal no eran herramientas complementarias para determinar el flujo bache. Si no que se necesitaban de datos suplementarios como el colgamiento del líquido para tener una relación más aproximada en estos modelos. Mientras tanto Gregory et al. (1978) presentó una correlación para el colgamiento del líquido en una tubería horizontal para un flujo bache y demostró que el colgamiento está íntimamente relacionado con la velocidad de la mezcla del tapón.

Así mismo la industria petrolera mostró una gran carencia de herramientas para determinar el patrón de flujo<sup>1</sup> en sus instalaciones. Los experimentos evidenciaron la interdependencia entre las pérdidas de presión en una tubería y el patrón de flujo que las diferentes fases adoptan dentro de esta. Inicialmente la observación visual fue la

---

1. Patrón de Flujo: configuración geométrica de la fase gaseosa y fase líquida dentro de la tubería.

herramienta primordial para determinar los patrones de flujo que eran mostrados en graficas bidimensionales, en las cuales se señalaban las fronteras de transición entre los diferentes patrones de flujo. Fue entonces que a partir de 1949 se publicó un número considerable de mapas de patrones de flujo, tanto para tuberías horizontales como para verticales, Corradini, (1997) y Shoham, (2001). La mayoría de estos usaron diferentes sistemas de coordenadas y eran de aplicación limitada a condiciones de flujo muy similares a aquellas para las cuales fueron desarrollados.

El comportamiento transitorio del patrón de flujo bache fue uno de los más relevantes que llamo la atención de los investigadores. Además de su frecuencia en un numero de aplicaciones técnicas, este patrón, denominado “Flujo Bache”, se caracteriza por el flujo alternado de tapones líquidos seguidos por grandes burbujas de gas, el cual puede presentarse incluso en tuberías en las cuales los gastos de fluido a la entrada se mantienen constantes al igual que la presión en el extremo final, (presión de separación constante, por ejemplo). Es decir, al principio parecía contradictorio que, manteniendo gastos de flujo constantes a la entrada y presión de separación constante a la salida, no se asegurara condiciones de flujo en régimen permanente a lo largo de toda la longitud de la tubería.

Cabe mencionar que una gran variedad de investigadores se avocaron a desarrollar modelos para la predicción del flujo bache, pero este requería de elementos necesarios como la velocidad de la burbuja, la longitud de la misma, el colgamiento del líquido y la frecuencia de generación de los baches, para encontrar el valor exacto de las caídas de presión en función del tiempo.

Los aspectos más generales del fenómeno de bacheo en sistemas de tubería horizontal, tubería ascendente vertical y separador, incluyendo las causas, efectos y técnicas para su eliminación o atenuación fueron propuestos por Yocum (1973). Así mismo Yocum (1973) también desarrollo técnicas de diseño y un método de predicción para evitar la ocurrencia de este patrón de flujo. En su propuesta presentó un ejemplo de bacheo ocasionado por el cambio de dirección de flujo en un área de proceso y otro de flujo bache inducido por el relieve del terreno a la llegada a la costa de una tubería submarina.

Dentro de las generalidades del trabajo presentado por Yocum fue de vital relevancia la magnitud de las perdidas en la capacidad de manejo de producción de las instalaciones, ocasionadas por la aplicación de medidas operativas para reducir la gravedad del bacheo. Hablando concretamente, el estrangulamiento en válvulas de llegada en la cima de las *tuberías ascendentes verticales*, (y el aumento en la contrapresión en el sistema de separación), puede reducir la capacidad de manejo de fluidos hasta un 50% del valor del diseño.

La diferencia fundamental entre flujo monofásico y flujo bifásico, es que en este último las fases líquidas y gaseosas pueden distribuirse en la tubería en una amplia variedad de configuraciones. Estas configuraciones difieren unas de otras en la distribución espacial de la interfase. La distribución de la interfase determina parámetros tan importantes como el colgamiento del líquido (y en consecuencia la fracción de vacío). Este parámetro es fundamental en las determinaciones del comportamiento de flujo. El movimiento relativo de las fases provoca esfuerzos de corte

en la interfase los cuales pueden bajo ciertas condiciones, contribuir significativamente en las pérdidas de presión del sistema. Adicionalmente, a través de ella, se da un intercambio másico continuo entre la fase líquida y la gaseosa. Otro parámetro de interés es la pérdida de presión por fracción (de cada fase y la mezcla de ellas), con la pared de la tubería, la cual puede ser significativamente diferente que el equivalente para flujo monofásico. Esta diferencia es aplicable también a las pérdidas de presión por elevación, las cuales son gobernadas por el fenómeno de colgamiento. A pesar de que las fases pueden distribuirse en la tubería de varias formas distintas, observaciones en el laboratorio han permitido establecer que dichas distribuciones tienden a agruparse en unos cuantos patrones de flujo definidos, en los cuales el comportamiento de flujo es bastante similar. Estas observaciones experimentales han conducido a análisis específicos de cada patrón de flujo, de manera que el enfoque general del análisis de flujo multifásico generalmente consiste como fase inicial en la predicción del patrón de flujo existente en la tubería. Una vez determinado el patrón de flujo se aplican modelos específicos para estimar parámetros tales como la caída de presión y el comportamiento de la temperatura.

El patrón de flujo en un sistema bifásico dado depende de las siguientes variables:

- Parámetros de operación tales como gastos de flujo de gas y líquido, valores de presión y temperatura.
- Características geométricas del sistema de flujo como diámetros, longitudes, ángulos de inclinación, etc.

- Propiedades físico químicas y termodinámicas de las fases como densidad, viscosidad, tensión superficial, presión de saturación, etc.

A continuación se presenta una de las clasificaciones más aceptadas de patrones de flujo para flujo horizontal y vertical [Shoham, 2001].

## **2.2 Flujo horizontal y casi horizontal.**

Se considera flujo horizontal o casi horizontal en aquellas tuberías que tienen una pendiente igual o menor al 5%. Los patrones observados en este tipo se clasifican en tres grupos.

### **2.2.1 Flujo estratificado**

Este patrón de flujo ocurre a gastos de líquido y gas relativamente bajos. Las fases se separan por acción de la gravedad ubicándose el líquido en la parte baja de la tubería, mientras que el gas ocupa la parte superior de la misma. El flujo estratificado se subdivide en estratificado suave, en el cual la interfase gas líquido es suave y estratificado ondulado, el cual ocurre a velocidades más altas de la fase gaseosa, lo cual provoca la aparición de ondas en la interfase.

### **2.2.2 Flujo intermitente**

Este patrón se caracteriza por el flujo alternado de líquido y gas, tapones de líquidos, los cuales llenan completamente la sección transversal de la tubería, se

alternan con bolsas de gas que contienen una capa de líquido estratificado fluyendo en la parte más baja de la tubería. El mecanismo de flujo es tal que el rápido movimiento del tapón del líquido sobrepasa la velocidad de la película del líquido moviéndose delante de él. El líquido en el cuerpo del tapón puede contener pequeñas burbujas de gas las cuales se concentran en la parte frontal del tapón y en la parte superior de la tubería. El patrón de flujo intermitente se divide en flujo tapón y flujo burbuja alargada. El comportamiento de flujo para el tapón y la burbuja alargada obedecen al mismo mecanismo de flujo, usualmente no se distinguen en la práctica uno del otro. El patrón de burbuja alargada se considera como el caso límite del flujo bache, cuando el tapón del líquido no contiene burbujas de gas. Esto ocurre a gastos relativamente bajos de gas para los cuales el flujo es más lento. A gastos de gas más altos, en los cuales el flujo del frente del tapón se presenta en forma circular y en dirección contraria a la del sentido del flujo, el flujo se denomina como flujo tapón.

### **2.2.3 Flujo anular**

Este ocurre para altos gastos de flujo de gas. La fase gaseosa fluye en un núcleo de alta velocidad, pudiendo contener gotas de líquido en su seno. El líquido fluye en forma de una delgada capa pegada a la pared de la tubería. La película en la parte baja de la tubería es comúnmente más gruesa que en la parte superior de la misma, dependiendo de la magnitud relativa de los gastos de gas y líquido. Para gastos de gas bajos, la mayor parte del líquido fluye en la parte baja de la tubería, mientras que en la

parte superior, una delgada capa de líquido aireado puede mojar la parte superior. Este tipo de flujo se presenta en la transición entre el flujo estratificado ondulado, el flujo tapón y el anular. No se considera estratificado ondulado ya que no se presenta una clara interface ondulada, (la película de líquido, como ya se señaló, moja toda el área interna de la pared de tubería). Se distingue también del flujo bache porque no se presentan flujos alternados del líquido y bolsas de gas.

#### **2.3.4 Burbuja dispersa**

A velocidades de líquido muy altas, la fase líquida se presenta como fase continua, en la cual la fase gaseosa se encuentra dispersa en forma de burbujas discretas. La transición a este patrón de flujo es definida ya sea por las condiciones en las cuales las burbujas están suspendidas en el líquido, o bien cuando las burbujas alargadas se destruyen cuando tocan la parte superior de la tubería. Al ocurrir esto, la mayoría de las burbujas se encuentran cerca de la pared superior de la tubería. A velocidades de líquido más altas, las burbujas de gas están dispersas de una forma más uniforme en toda el área de sección transversal de la tubería. En condiciones de flujo de burbuja dispersa, debido a la alta velocidad de flujo, las dos fases se mueven a la misma velocidad y el flujo se considera como homogéneo.

A continuación se presenta gráficamente la clasificación de patrones de flujo para tuberías horizontales propuesta por Shoham.



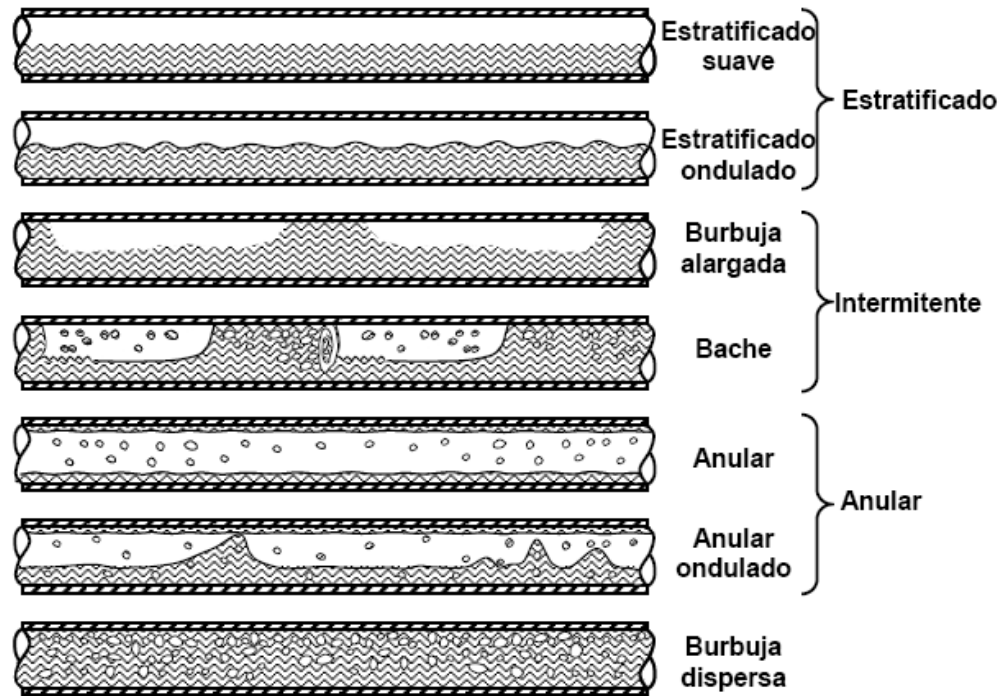


Fig. 2 Patrones de flujo en tuberías horizontales. [Shoham, 2001]

## 2.3 Flujo vertical

Para flujo en tuberías verticales, los patrones estratificados no existen, en cambio se observa un nuevo patrón: el flujo agitado. Usualmente para flujo vertical, los patrones de flujo son simétricos respecto a la dirección axial y menos dominados por efectos de gravedad, flujo bache, flujo agitado y flujo anular.

### 2.3.1 Flujo Burbuja

De manera similar a lo ocurrido para el flujo horizontal, este patrón se caracteriza por la fase gaseosa se encuentra dispersa en forma de burbujas discretas inmersas en

una fase líquida continua. En este caso, la distribución de las fases es bastante homogénea en toda el área transversal al flujo. En este tipo de flujo se distingue un caso particular, denominado flujo burbuja dispersa. Estas subdivisiones difieren en su mecanismo de flujo. El flujo burbuja simplemente se presenta para gastos de líquido relativamente bajos y se caracteriza por el resbalamiento entre las fases líquida y gaseosa. El flujo burbuja simple se presenta para gastos de líquido relativamente bajos y se caracteriza por el resbalamiento entre las fases líquida y gaseosa. El flujo burbuja dispersa en contraparte, se presenta a velocidades de líquido relativamente altas. Bajo tales condiciones, la fase líquida arrastra las burbujas de gas impidiendo que ocurra resbalamiento entre las fases.

### **2.3.2 Flujo Bache**

En tuberías verticales es simétrico respecto al eje de la tubería. La mayor parte de la fase gaseosa se localiza en una bolsa de gas en forma de bala denominada la burbuja de Taylor, cuyo diámetro es casi igual al diámetro interno de la tubería. El flujo consiste en tapones de líquido alternados con burbujas de Taylor. Otra característica de este patrón es que una delgada capa de líquido fluye en sentido contrario entre las burbujas de Taylor y la pared de la tubería. La película del líquido penetra en el siguiente tapón de líquido creando una zona mixta aireada por pequeñas burbujas de gas.

### **2.3.3 Flujo agitado**

Este patrón de flujo se caracteriza por su movimiento oscilatorio. Es similar al flujo bache, pero su apariencia es mucho más caótica, sin una frontera bien definida entre las fases. Su ocurrencia se da a velocidades de gas más altas, para las cuales los tapones de líquido se hacen más pequeños y turbulentos. Los tapones de líquido son penetrados por el flujo de gas el cual los rompe provocando un contra flujo de líquido que se adiciona al tapón siguiente. Como resultado, las burbujas de Taylor y los tapones de líquido se distorsionan provocando agitación.

### **2.3.4 Flujo anular**

Debido a la simetría de flujo, el espesor de la película de líquido fluyendo sobre la pared del tubo es bastante uniforme. Tal como sucede para flujo horizontal, este tipo de flujo se caracteriza por el movimiento rápido del núcleo de gas. La fase líquida se mueve a menor velocidad en forma de una película adherida a la pared de la tubería y como pequeñas gotas dispersas dentro del núcleo de gas. La interfase es altamente ondulada, lo cual provoca esfuerzos de corte entre las interfase muy grandes. El flujo vertical descendente, el flujo anular se presenta además a bajos gastos de gas, en forma de películas descendentes. La configuración física es muy similar a la de flujo ascendente, con la diferencia que las burbujas de Taylor son menos estables y se localizan excéntricamente respecto al eje de la tubería. Las burbujas de Taylor pueden tanto ascender como descender, dependiendo de los gastos relativos.

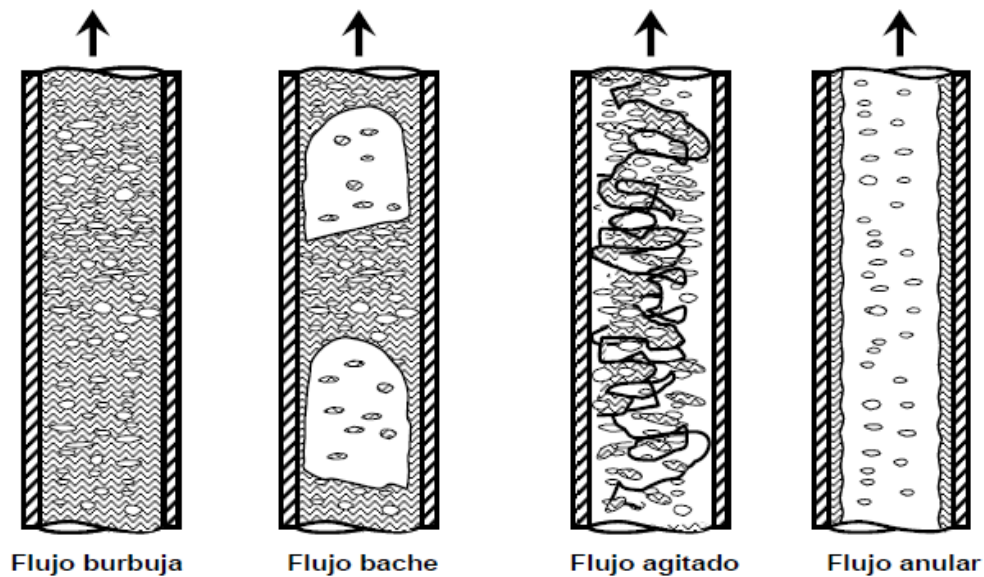


Fig. 3 Patrones de flujo en tuberías verticales [Shoham, 2001]

## 2.4 Mapas de patrones de flujo

El flujo multifásico, el ritmo de intercambio de masa, cantidad de movimiento y energía entre el líquido y el gas, son parámetros claves para la caracterización de un flujo. Los intercambios de ritmo son diferentes para las distintas configuraciones geométricas que adoptan las fases.

Con el paso del tiempo se han identificado un número importante de patrones de flujo. Esto se debe fundamentalmente a que en su desarrollo han predominado criterios subjetivos para definir y denominar las diferentes configuraciones geométricas que adoptan las fases. Sin embargo, la tendencia más reciente es la de reducir el número de los patrones con características comunes, a unos cuantos grupos los cuales pueden ser analizados con criterios similares.

Los mapas de patrones de flujo se desarrollaron en el laboratorio con datos experimentales, los cuales se analizaron a través un procedimiento empírico; con esto se intentó identificar las fronteras de transición entre los diferentes patrones. Inicialmente los mapas de patrones de flujo se graficaron de forma aleatoria, cuya elección era esencialmente subjetiva, sin basarse en principios físicos fundamentales. Esto provocó que el rango de aplicación confiable fuera reducido a condiciones muy cercanas para las cuales el mapa había sido desarrollado. En consecuencia, los intentos para emplear este tipo de mapas a condiciones generales resultaron muy inciertos. Entre los sistemas de coordenadas elegidos por los diferentes autores destacan variables como gastos máxicos, flujo de cantidad de movimiento y las velocidades superficiales de las fases.

A pesar que existe un número importante de mapas de patrones de flujo, algunos de ellos merecen especial atención dado que su utilización sigue vigente a lo largo de los años.

Por ejemplo el mapa de patrón de flujo de Taitel y Dukler representado en la fig. 4 se desarrolló aplicando un enfoque mecanístico completo. El desarrollo tomó en cuenta los mecanismos físicos que determinan la transición entre los diferentes patrones de flujo para, con base en ellos, desarrollar expresiones analíticas para establecer las fronteras de transición. Como resultado del desarrollo teórico, se plantearon cinco grupos adimensionales, los cuales definen las coordenadas del mapa. El valor de dichos grupos adimensionales se calcula a partir de los gastos máxicos de las fases, propiedades de los fluidos, diámetro de la tubería y el ángulo de inclinación

de esta respecto a la horizontal. El tratamiento mecanístico de este mapa permite la aplicación con una mayor confiabilidad a una gran variedad de condiciones de flujo, las cuales incluyen diferentes inclinaciones, diámetros de tubería, rangos de gastos de las fases entre otras.

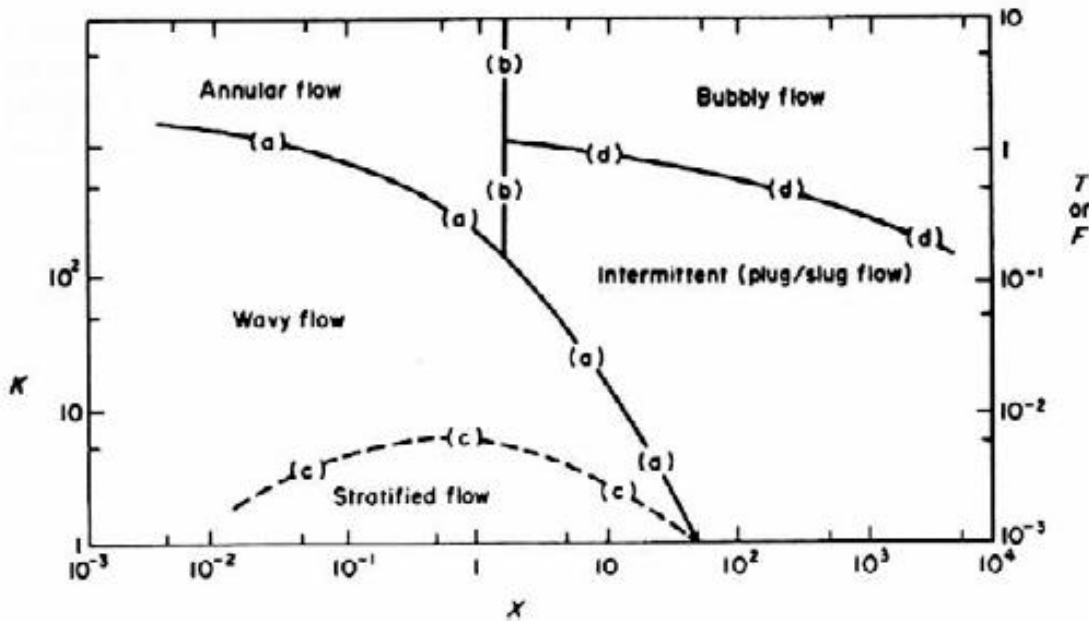


Fig. 4 Mapa de patrones de flujo para tuberías horizontales Taitel y Dukler.

Los grupos adimensionales desarrollados por Taitel y Dukler son los siguientes:

$$x = \left[ \frac{|dp/dx|_L}{|dp/dx|_G} \right]^{1/2}; \tag{2.1}$$

$$T = \left[ \frac{(dp/dx)_L}{(\rho_L - \rho_G)g \cos \alpha} \right]^{1/2}; \tag{2.2}$$

$$F = \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \frac{V_{SG}}{\sqrt{D g \cos \alpha}}}; \quad 2.3$$

$$K = F \left[ \frac{D v_{SL}}{v_L} \right]^{1/2} = F [Re_L]^{1/2}; \quad 2.4$$

$$Y = \frac{(\rho_L - \rho_G) g \sin \alpha}{|(dp/dx)_G|}; \quad 2.5$$

Dónde:

- $\left( \frac{dp}{dx} \right)_L$  es el gradiente de presión en la dirección del flujo para la fase líquida, (suponiendo que este viaja en una sola dirección).
- $\left( \frac{dp}{dx} \right)_G$  es el gradiente de presión en la dirección del flujo para la fase gaseosa, (suponiendo que este viaja en una sola dirección).
- $D$ : diámetro de la tubería.
- $g$ : aceleración de la gravedad.
- $Re_L$ : número de Reynolds del líquido, (suponiendo que este viaja solo en la tubería).
- $v$ : viscosidad cinemática.
- $v$ : velocidad superficial.
- $\alpha$ : ángulo entre el eje de la tubería y la horizontal.
- $\rho$ : densidad.

Otro mapa de patrón de flujo, presentado en 1954 por Baker y desarrollado para tuberías horizontales con datos experimentales de mezclas agua-aire, es uno de los trabajos pioneros en la materia. Las coordenadas elegidas por Baker están en función de

los flujos máscicos por unidad de área del líquido y del gas. Así mismo de los parámetros adimensionales  $\lambda$  y  $\psi$ , definidos por:

$$\lambda = \left( \frac{\rho_G \rho_L}{\rho_{aire} \rho_{agua}} \right)^{1/2} \quad 2.6$$

$$\psi = \frac{\sigma_{agua}}{\sigma} \left( \frac{\mu_L}{\mu_{agua}} \left[ \frac{\rho_{agua}}{\rho_L} \right]^2 \right)^{1/3} \quad 2.7$$

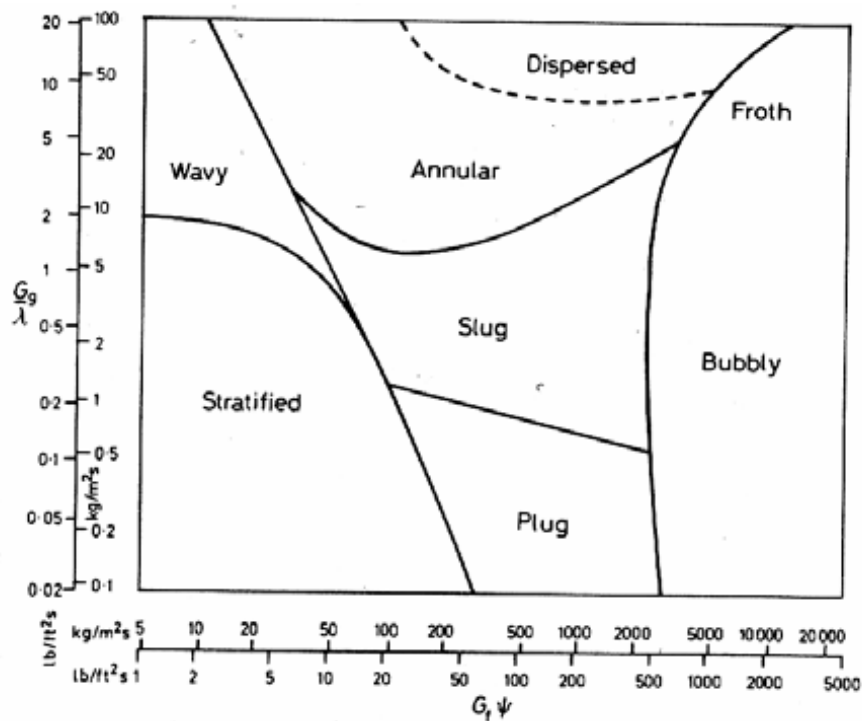


Fig. 5 Mapa de patrones de flujo para tuberías horizontales Baker.

Presentado en 1961, por Griffith y Wallis desarrollaron un mapa de patrones de flujo con variables adimensionales para flujo en tuberías verticales.



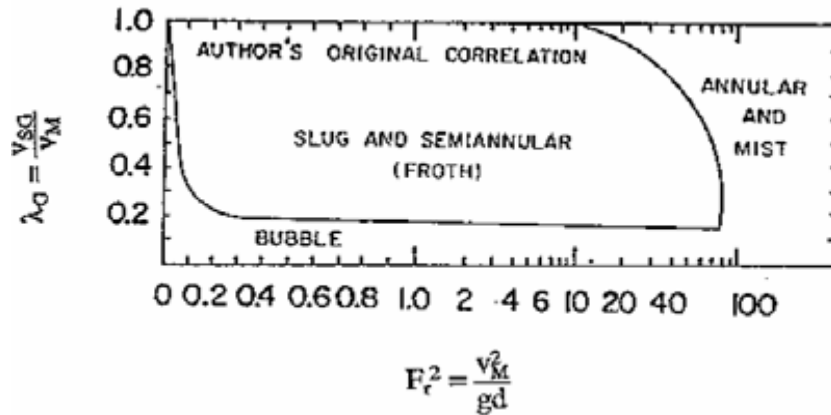
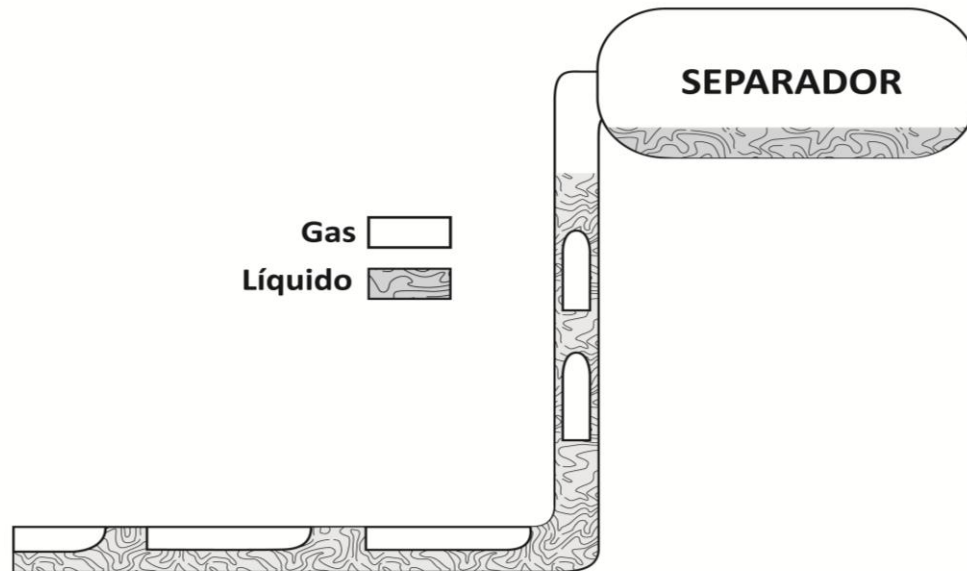


Fig. 6 Mapa de patrones de flujo para tuberías horizontales Griffith y Wallis.

## 2.5 Bacheo normal o hidrodinámico

A principios de 1981 Schmidt *et al.* después de haber estudiado con detalle la problemática que se presentaba en ese tiempo, describe que el fenómeno de bacheo normal se distingue fundamentalmente por presentar flujo bache de corta longitud (comparados con la longitud total de la tubería ascendente), dicho flujo se originan en la tubería horizontal, corriente arriba de la base de la tubería ascendente vertical. De hecho, los baches de mayor longitud registrados durante los experimentos, fueron de 4,27 metros [14 pies], lo cual representa menos del 30% de la longitud total de la tubería ascendente vertical. El esquema de generación del bacheo normal se presenta en la figura 7.



**Fig. 7 Formación de bacheo normal (hidrodinámico) en un sistema tubería horizontal tubería ascendente-vertical.**

Se hicieron importantes diferencias de relevancia teórico experimental en los trabajos de Schmidt et al. (1980, 1981), fueron diferencias muy grandes entre los datos del laboratorio y los modelos de cálculo desarrollados.

En 1981 Brill et al. presentaron los resultados de las pruebas realizadas en instalaciones de producción de la Bahía de Prudhoe (norte de Alaska). Dichas pruebas fueron realizadas en 2 líneas de flujo de 0.3048 metros [12 pulgadas] y 0.4064 metros [16 pulgadas] de diámetro, respectivamente. Ambas líneas, de longitud igual 4.83 kilómetros [3 millas] con un tramo ascendente de 9.1 metros [30 pies], transportaban mezclas de aceite y gas. El análisis de gastos de flujo, presiones, temperaturas y mediciones de densímetros *gamma* (usados para monitorear el patrón de flujo y para determinar la densidad de las mezclas), permitieron identificar la presencia de bacheo

normal, con longitudes de tapones de líquido hasta de unas 53 veces la longitud del segmento de tubería ascendente vertical ascendente, (aproximadamente 4.82 metros [1.583 pies]). Tales condiciones de bacheo fueron registradas en gastos de líquido tan alto como 11.336 metros cúbicos por día [ $\text{m}^3/\text{d}$ ] 71.300 barriles por día [ $\text{b/d}$ ] en una tubería de 0,4064 metros [16 pulgadas].

Por otra parte en el mismo trabajo se muestra que los mapas de patrones de flujo propuestos por Mandhane, Taitel y Dukler (1976) y Schmidt *et al.* (1980), desarrollados con base en mediciones tomadas en tuberías pequeñas, resultaron poco eficientes para identificar los patrones de flujo determinados durante las pruebas. Además del diámetro de la tubería, se considera que la geometría de flujo y las propiedades de los fluidos (entre ellos la tendencia del aceite de la región a formar espuma) contribuyeron a la falta de precisión para identificar correctamente el patrón de flujo en los mapas señalados.

No obstante que el término “bacheo severo” se adoptó en razón a que se considerará inicialmente que los baches generados en la base de los *tubería ascendente vertical* eran invariablemente de mayor longitud que los baches generados en los caos de bacheo normal y a pesar que investigaciones posteriores han permitido observar la longitud de los conductos ascendentes, se sigue denominando “bacheo severo” al bache generado a partir de flujo estratificado corriente arriba de la base de la tubería ascendente vertical y cuya longitud es igual o mayor a la altura de este; mientras que se denomina genéricamente como “bacheo normal” o “hidrodinámico”, al observado en tuberías horizontales o sistemas de tubería horizontal *tubería ascendente*

*vertical*, en los cuales los baches se generan corriente arriba de la base de la tubería ascendente vertical y al penetrar y ascender por este, no se disipan.

## **2.6 Bacheo Severo**

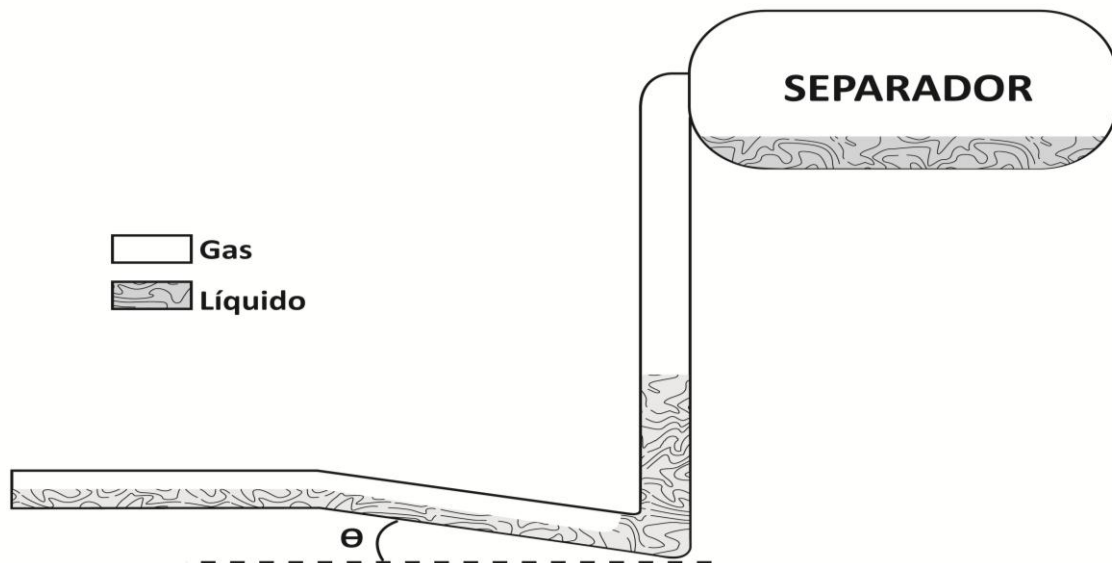
El bacheo “severo” puede ocurrir en un sistema de producción tubería horizontal-*tubería ascendente vertical* a ritmos de flujo bajo de gas y líquido. El flujo del gas no puede vencer la entrada de la tubería ascendente vertical por la acumulación de líquido en la base de éste<sup>2</sup>, como se muestra en la figura 8. De tal manera que en el separador se presenta un proceso cíclico, debido que hay un periodo de ausencia de líquido y otro periodo muy alto de producción de líquido.

Los investigadores Schmidt (1977) y Schmidt *et al.* (1979) retomaron el trabajo de Yocum, quienes restringieran su trabajo al fenómeno de bacheo a sistemas de tubería horizontal-*tubería ascendente vertical*. Describen que el fenómeno reportado por Yocum es un caso especial de bacheo (bacheo normal), para el cual introducen la denominación de bacheo “severo”, el cual se había observado en investigaciones experimentales sobre patrones de flujo en tuberías horizontales menores a cinco grados de inclinación.

---

<sup>2</sup> Cabe mencionar que la tubería está ligeramente inclinada a favor de la tubería ascendente vertical.

Schmidt *et al.* (1979) mencionan que para que el bacheo “severo” se manifieste se necesitan de elementos específicos como el flujo de líquido y gas a bajo gasto en una tubería horizontal, la cual se conecta a una tubería ascendente vertical mediante un segmento de tubería de inclinación. Los fluidos adoptan un patrón de flujo estratificado; bajo esas condiciones, el líquido (cuya longitud varía entre 1 y varias veces la longitud total de la tubería ascendente vertical), hasta que la presión del gas corriente arriba del bache alcance un valor total que fuerce al líquido salir de la tubería ascendente vertical hacia el separado. Los elementos de generación del bache se esquematizan en la figura 8.



**Fig. 8 Formación de bacheo severo en un sistema tubería horizontal tubería ascendente-vertical.**

El artículo citado, el cual incluye los resultados obtenidos en un circuito experimental, menciona que no se obtuvo bacheo severo cuando la conexión entre la

sección horizontal de la tubería y de la tubería ascendente vertical no presentó la pendiente negativa, ni cuando dicha conexión se efectúan mediante una sección ascendente. Además en este artículo se presenta una descripción del ciclo del bacheo severo, consistente en cuatro etapas que van desde la generación del tapón del líquido hasta el desalojo de éste hacia el separador.

Las cuatro etapas se describen a continuación

- Formación de flujo bache
- Flujo bache en movimiento hacia el separador
- Flujo bache entrando completamente al separador
- Formación del flujo anular<sup>3</sup>.

Sin embargo en 1980 Schmidt *et al.* a través de la Universidad de Tulsa construyeron un circuito experimental para simular una instalación costa afuera de tubería horizontal-tubería ascendente vertical separador. La instalación estaba compuesta por un segmento horizontal de 30,48 metros [100 pies] y una tubería ascendente tubería ascendente vertical de 15,24 metros [50 pies] de altura. Usando tubería transparente de 0,05 metros de diámetro [2 pulgadas] y mezclas de queroseno y aire, lograron reproducir condiciones de bacheo normal como de bacheo severo. Este trabajo permitió a los autores, establecer elementos para distinguir los dos tipos de

---

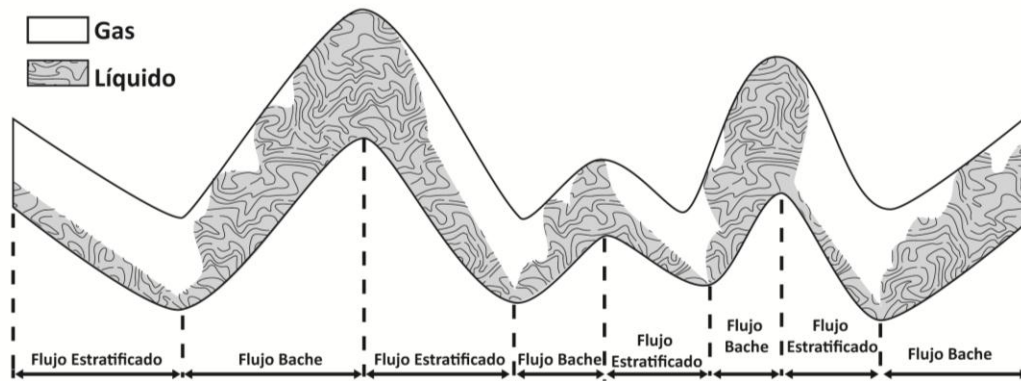
<sup>3</sup> Líquido desciende por las paredes de la tubería

bacheo tanto el patrón de flujo en la tubería horizontal como la longitud de los baches observados. Haciendo énfasis en el análisis del fenómeno de bacheo severo. Desarrollaron experimentalmente un mapa de patrón de flujo desarrollado y presentaron un modelo matemático para la caracterización de los baches el cual, señalan los mismos, depende fundamentalmente de los efectos de la gravedad.

Comparando el bacheo normal o hidrodinámico con el bacheo severo, el bacheo severo puede ocurrir a gastos bajos, además de presentarse para rangos de velocidades superficiales intermedias, también pudo haber ocurrido para cualquier inclinación de la tubería horizontal en el rango utilizado de sus experimentos. Adicionalmente, el bacheo severo es el patrón de flujo más indeseable en las instalaciones de producción.

### **2.7 Bacheo inducido por condiciones del terreno.**

En el año de 1991 Sarica *et al.* y Al-safran describieron otro fenómeno de carácter similar al bacheo severo y normal: el bacheo inducido por el terreno irregular (*hilly terrain induced slug flow*), está representado en la siguiente figura:



**Fig. 9 Formación de flujo tipo bache por terreno irregular.**

El comportamiento de flujo en tuberías instaladas en terrenos irregulares, con bajo gasto de flujo de líquido y gas es altamente dominado por efectos gravitatorios. Bajo estas condiciones, se puede presentar flujo en baches aun en casos que los gastos de entrada se mantengan constantes, (de manera similar al bacheo normal y severo). En tales casos, encontrados tanto en campos terrestres como en costa afuera, la geometría de flujo (diámetros, longitudes y cambios de elevación), así como la naturaleza compresible de la fase gaseosa, son determinantes en el comportamiento del flujo, el cual provoca problemas operativos de la misma naturaleza a los descritos para el bacheo normal y severo. Como se representa en la figura 4, el sistema de flujo consiste en secciones de tubería interconectadas, las cuales pueden ser de flujo ascendente, descendente o incluso horizontal. A pesar que la compresión del flujo bache en cualquiera de las tres secciones mencionadas ha progresado de manera importante, el comportamiento de flujo en el sistema completo es mucho más complicado. Cuando estas tuberías transportan flujos a bajos gastos, (tal como ocurre



en escenarios de yacimientos en etapa avanzada de explotación o bien, al inicio de su desarrollo), las fases tienden a separarse, acumulándose el líquido en la parte baja de la tubería, mientras que el gas fluye en las partes altas provocando la generación de baches de líquido en las secciones ascendentes. Estos baches pueden o no disiparse cuando el flujo adopta una dirección descendente u horizontal. En caso de que no se disipen al cambiar de dirección, los baches generados pueden ser mucho más largos que los desarrollados en otros escenarios. Taitel y Barnea (1993) presentaron un modelo hidrodinámico para el estudio de este fenómeno. Desarrollaron un algoritmo numérico implementado en un simulador para indicar el desarrollo del flujo bache.

## **2.8 Burbuja de Taylor**

Un flujo de dos fases líquido-gas en una tubería puede exhibir una amplia variedad de distribuciones, dependiendo de los ritmos de flujo y las propiedades de los fluidos, también de la geometría e inclinación de la tubería. Esta diferencia variada de distribuciones del fluido se clasifica en el mapa de patrones de flujo. Muchos parámetros para el diseño de tuberías, como la caída de presión, la transferencia de calor, la transferencia de masa, la estabilidad del sistema están íntimamente ligados con los patrones de flujo. La predicción del patrón de flujo es uno de los más importantes y fundamentales para asociar los problemas con el flujo de dos fases.

El flujo de fluidos que fluye ascendente en una tubería ascendente vertical tiene cinco patrones básicos de flujo: flujo burbuja, flujo tapón o bache, flujo disperso, flujo

anular y flujo agitado. El flujo bache y el flujo agitado pueden ocurrir en un amplio rango de velocidades del líquido y el gas. En el flujo bache vertical, la fase del gas está localizada en la parte superior del líquido en forma de una bala, llamadas burbujas de Taylor, estas tienen el diámetro casi igual al diámetro de la tubería moviéndose uniformemente hacia el separador. Estas burbujas de Taylor están separadas por los tapones del líquido el cual es un puente de la tubería que contiene pequeñas burbujas de gas o aire.

Entre las burbujas de Taylor y la pared de la tubería, hay un líquido que fluye en dirección contraria, esto se debió a las fuerzas de gravedad, a este fenómeno se le denomina líquido descendiendo por la pared de la tubería. Con un incremento en el flujo del gas, la longitud de la burbuja de Taylor en relación con el flujo bache disminuye y convierte al flujo bache más aireado. Cuando el punto crítico del gas se alcanza, una transición del flujo bache al flujo agitado tiene lugar. En el flujo agitado, las burbujas de Taylor están deformadas cuando aparecen en el flujo bache. La continuidad de la fase líquida en el flujo bache y la burbuja de Taylor es frecuentemente destruida por la fase del gas, y esto sucede para que el flujo bache remanente descienda por las paredes. El líquido descendiendo por las paredes (flujo anular) forma un puente en la base de la tubería ascendente vertical y es nuevamente levantado por el gas. La característica principal del flujo agitado es que es oscilatorio arriba y abajo en el tapón de líquido del flujo bache.

Ha habido una serie extensa de mecanismos y modelos propuestos para la transición de flujo bache a flujo agitado. En 1977 Dukler y Taitel, sugirieron que la

transición del flujo bache al flujo agitado es cuando el flujo bache se separa en dos burbujas de Taylor consecutivas. Mishima e Ishii (1984) propusieron un concepto similar y postularon que la transición ocurre cuando la principal fracción de todo el flujo bache excede la sección de la burbuja de Taylor. Taitel et al. consideraron un flujo agitado cuando entra a la región del fenómeno asociado con la formación de un tapón estable que con el paso del tiempo descenderá el líquido por las paredes de la tubería. Brauner y Barnea (1986) sugirieron que la transición del flujo bache a flujo agitado ocurre cuando el flujo del gas alcanza la capacidad máxima del volumen cubico de empaque. McQuillan y Whalley (1985), Nicklin y Davidson (1962), Wallis (1969) y Govan et al. (1991) atribuyeron que la transición del flujo bache al flujo agitado es la inundación de la burbuja de Taylor que esta alrededor del flujo. Jayanti y Hewitt (1992) hicieron un trabajo conjunto de los autores antes mencionados y propusieron un modelo mejorado para el mecanismo de inundación considerando la longitud de la burbuja de Taylor.

El modelo de una configuración típica de un flujo bache vertical se representa en la figura 10. El líquido del flujo bache se puede dividir en tres regiones distintas. Región débil, región de desarrollo, y región intermedia según Van Hout et al (1992). Justo cuando la burbuja de Taylor está en la región débil, en la cual pequeñas burbujas del líquido se convierten o pasan a la burbuja de Taylor debido a los débiles vórtices, y la turbulencia es alta en esa región. Lejos de la burbuja de Taylor, es la región de desarrollo, en el cual la distribución de líquido y gas es similar a la del flujo burbuja. Entre la región débil y la región desarrollada está la región intermedia. Las burbujas de gas se inyectan a esta región intermedia desde la parte inferior de la región débil, principalmente cerca del centro de la tubería, y después gradualmente distribuidas a

través de toda la sección de la tubería. Con este incremento del flujo de gas, la región débil y la turbulencia incrementa. La región encogida desarrollada y la longitud relativa del flujo bache, decrece. Justo antes de la transición del flujo bache al flujo agitado, la región desarrollada casi desaparece, y la debilidad turbulenta de la burbuja de Taylor anterior empieza a tocar a la siguiente burbuja de Taylor como se demuestra en la figura 10. La fracción del líquido en el flujo bache, alcanza su máximo y llega a la región débil. Mientras tanto la longitud del flujo bache alcanza su mínimo hasta desaparecer. Bajo esta condición un incremento pequeño del flujo del gas puede resultar en un colapso en el flujo bache y deformar la burbuja Taylor. Por lo tanto la transición de flujo bache a flujo agitado puede atribuirse a la disipación del flujo bache, que ha sido relativamente pequeño en longitud por el fuerte efecto de la región débil detrás de la burbuja de Taylor predecesora.

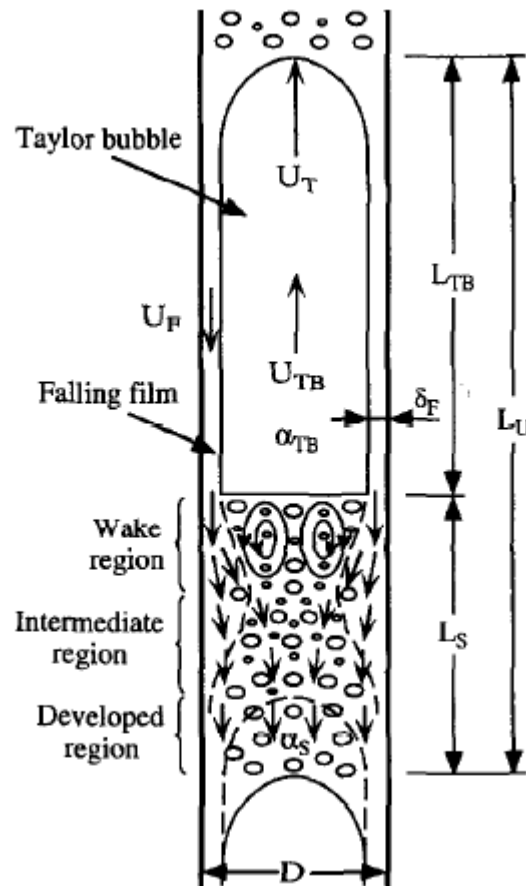


Fig. 10 Esquema de la burbuja de Taylor

## 2.9 Técnicas de control de bacheo.

Alrededor de 1973 Yocum presentó cinco alternativas de control las cuales pretendían cambiar el patrón de flujo de la mezcla de fluidos antes de entrar al separador.

### **2.9.1 Reducción del diámetro de la tubería de llegada de *tubería ascendente vertical*.**

Este método consiste en reducir el diámetro de la tubería horizontal a cierta distancia antes de llegar a la base de la tubería ascendente vertical, con el objetivo de acelerar los fluidos y cambiar el flujo bache por flujo espuma. Los efectos que puede causar esta medida es producir un bacheo más intenso en caso de que el cambio de diámetro sea muy grande. La longitud y diámetro del tramo reducido deben ser obtenidos de un análisis detallado de las condiciones de flujo.

### **2.9.2 Aumento de la contrapresión en la línea**

Puede lograrse básicamente de dos formas: aumentando directamente la presión de separación o bien estrangulando la llegada de fluidos antes del separador. Este aumento provoca un cambio en el régimen de flujo que permite reducir las fluctuaciones de gasto y presión a un nivel tal que permita una operación estable. Sin embargo esta medida conduce generalmente a reducciones importantes en la capacidad del sistema de producción al trabajar en condiciones no viables de los puntos de diseño.

### **2.9.3 Tubería ascendente vertical doble o múltiple.**

Con el mismo objetivo de modificar el patrón de flujo aumentando la velocidad de los fluidos, se puede sustituir de la tubería ascendente vertical convencional por dos o más *tuberías ascendentes verticales* en paralelo de menor diámetro por los cuales se distribuya la producción. Otra opción que provoca efecto similar es usar dos o más

*tuberías ascendentes verticales* concéntricos en vez de los *tuberías ascendentes verticales* en paralelo.

#### **2.9.4 Re-mezclado a la entrada de la tubería ascendente vertical.**

Consiste en instalar dispositivos mecánicos que provoquen un re-mezclado de las fases antes de que penetren la *tubería ascendente vertical*. Entre dichos mecanismos se mencionan hélices, agitadores, y mecanismos de impacto. Sin embargo, nuevamente se señala que los dispositivos de este tipo pueden provocar separación adicional de fases, por lo que el problema de bacheo podría agudizarse si no se diseña apropiadamente.

#### **2.9.5 Inyección de gas en la base de la tubería ascendente vertical.**

Este método usa gas de una fuente externa para inyectarlo en la base de la tubería ascendente vertical y provocar una disminución en la presión hidrostática en dicho punto y también un aumento en la velocidad del gas. Ambos efectos facilitan la continua remoción de líquidos, reduciendo la tendencia a la formación de baches. Los efectos provocados son esencialmente iguales a los que se presenta en los pozos que operan mediante el método de levantamiento por gas.

Jansen *et al.* (1996) estudiaron de manera teórico experimental los métodos de estrangulamiento y de inyección de gas, desarrollando modelos que fueran capaces de predecir el comportamiento de flujo en de la tubería ascendente vertical para ambos casos. Reportaron la reducción en la capacidad de flujo al implementar el método de

estrangulamiento, también puntualizaron grandes cantidades de gas al considerar el método de inyección en la base de la tubería ascendente vertical.

Tengesdal (2002) presentó una revisión completa de los métodos empleados para la eliminación del flujo bache severo. Dicho autor propone una variante del método de inyección de gas, la cual consiste en inyectar parte del mismo gas que fluye en la tubería horizontal aprovechando la presión a la que se encuentre. A dicho método se le conoce como “auto-levantamiento” y fue desarrollado en un circuito experimental de flujo en la universidad de Tulsa.

Lopez-Samado (2005), usando un simulador comercial y datos reales para tuberías de gran diámetro de la Sonda de Campeche México, modeló los distintos métodos para eliminar el bacheo severo. Sus resultados indican que la combinación del método de estrangulamiento y la inyección de gas resultan efectivos en la eliminación del problema. Sin embargo, no presentó información de una aplicación real ni datos de laboratorio que confirmen los resultados de los simuladores.

Partiendo del hecho de que el fenómeno de bache normal en sistemas marinos de tubería horizontal *tubería ascendente vertical*- separador se observa en la llegada de los sistemas de recolección de hidrocarburos a instalaciones donde se separan los fluidos y se les adiciona energía para sus transporte a puntos de venta o proceso, se considera que en dichos punto se puede disponer del volumen de gas y presión necesaria para implantar sistemas de inyección en la base de la tubería ascendente vertical, sin embargo, no se dispone de modelos de calculo que permitan aproximar los



requerimientos de gas y presión ni anticipar el comportamiento del sistema de flujo bajo a la operación continua de esta técnica.

En la validación del modelo transitorio de bache normal (MTBN) se reporta buena concordancia de los resultados de simulación con valores experimentales Guzmán y Fairuzov, (2007); sin embargo, el modelo no considera los efectos de la inyección de gas en la base de la tubería ascendente vertical. En la revisión de la literatura especializada varios autores mencionan la inyección de gas como un método para evitar el bacheo severo, sin embargo no se encontraron referencias a experimentación con inyección de gas en sistemas que presentan baches hidrodinámicos de gran longitud.

### **2.10 Métodos de predicción y modelado.**

Se considera que el bacheo severo es un caso particular del bacheo ocasionado por las condiciones físicas del terreno, [Schmidt *et al.* 1985, Mackay 1987 y Sarica *et al.* 1991]. Las condiciones que originan el bacheo normal o hidrodinámico son significativamente diferentes a las que producen bacheo severo como se definió en los puntos 2.1, 2.2 y 2.3. En este caso el flujo bache es denominado por condiciones del terreno”, (terrain dominated slug flow). Se ha concluido que el bacheo normal y el dominado por condiciones del terreno son mutuamente excluyentes; a pesar de lo cual los problemas ocasionados a lo largo de toda la trayectoria de flujo y en las instalaciones de producción son similares. Los trabajos previos sobre bacheo en

sistemas de tubería horizontal, tubería ascendente vertical e instalaciones de separación se han enfocado fundamentalmente al análisis del bacheo severo [Schmidt *et al.* 1979 y 1980, Farghaly 1987, Pots *et al.* 1987, Fabre *et al.* 1990, Jansen *et al.* 1995, Henriot *et al.* 1999, etc.] y en segundo lugar por condiciones de terreno [Sarica *et al.* 1991, Henriot *et al.* 1999, Yoshida *et al.* 2000, Fozard 2001, McGuinness 2002, etc.]; mientras que pocos esfuerzos se han dedicado al estudio del bacheo normal.

Yocum (1973) no menciona explícitamente a que fenómeno se refiere, cuando predice la aparición del bacheo de forma separada para flujo horizontal y para flujo vertical ascendente. En el primer caso, la predicción se basa en el mapa de patrones de flujo de Baker (1954); mientras que en el segundo, usa el mapa de Griffith y Wallis (1969).

Schmidt *et al.* (1981), analizaron baches hidrodinámicos de tamaño menor a la longitud de la tubería ascendente vertical, cuyo comportamiento estaba influenciado por un efecto de sifón, originado por la ubicación del separador gas- líquido, el cual se instaló al mismo nivel de la tubería horizontal, provocando una aceleración adicional en los baches a la salida del extremo superior de la tubería ascendente vertical, en consecuencia, en dicho punto no pudo ser controlada la presión del sistema. La ocurrencia del bacheo normal en la tubería ascendente vertical fue predicha de acuerdo al valor de los números de velocidad del líquido y del gas ( $N_{LV}$  y  $N_{GV}$ , respectivamente) y al el mapa de patrones para flujo vertical ascendente presentado en dicho trabajo. A partir de un balance de masa promedio del líquido en una unidad de bache y de

correlaciones empíricas adicionales, se obtuvieron expresiones para el cálculo de los parámetros de los baches en la tubería ascendente vertical.

Brill *et al.* (1981) en cambio, describen y analizan la ocurrencia de baches hidrodinámicos de hasta 600 metros [200 pies], en tuberías de gran diámetro. Desarrollaron un modelo mecanístico que determina las características del bacheo en régimen permanente, sin embargo éste solo es aplicable en el tramo horizontal de la tubería. Al igual que el modelo de Schmidt anteriormente descrito, Brill uso correlaciones empíricas para determinar parámetros de entrada de su modelo mecanístico. Miyoshi *et al.* (1988), trabajando sobre un modelo para diseñar un sistema de separación rompedor de baches tipo vasija (Vessel type slug catching separator), en un sistema tubería horizontal con *tubería ascendente vertical* separador; aporta avances importantes en la comprensión y modelación del bacheo normal. En este trabajo se incluye el concepto de crecimiento de baches Kuoba (1986) y Scott (1987), a medida que se desplazan del punto de generación hacia la tubería ascendente vertical. El sistema analizado por Miyoshi *et al.* se presenta en la siguiente figura:

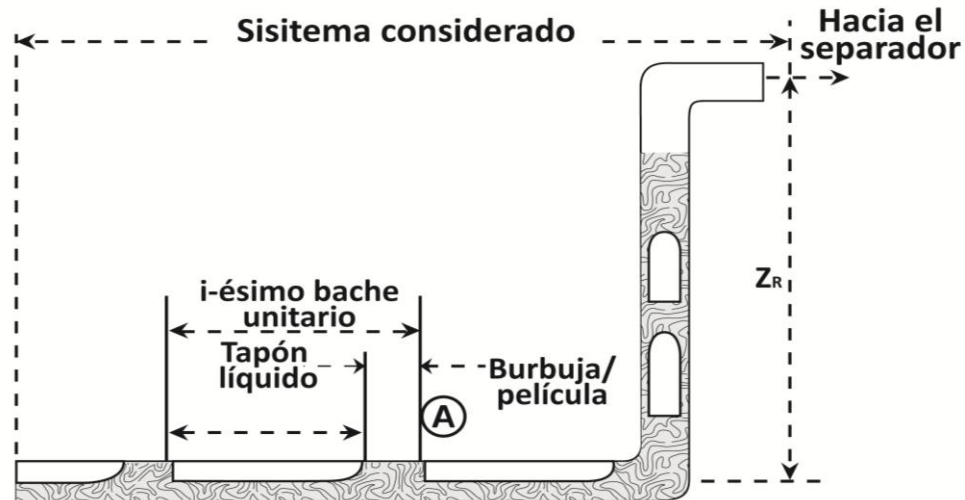


Fig. 11 Representación del sistema según Miyoshi et al. (1988)

Para caracterizar el movimiento y las propiedades físicas de los baches, Miyoshi *et al.* desarrollaron un modelo a partir de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento (momentum), usando el modelo de cálculo desarrollado por Brill *et al.* (1981), para el tapón del líquido y de la ley de gas ideal aplicada a la burbuja. Los parámetros característicos del bache (velocidades, colgamientos, posiciones respecto a un sistema de referencia, etc.), se obtuvieron resolviendo un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que representan principios físicos fundamentales de los baches.

Miyoshi *et al.* evaluaron su modelo mecánico aplicándolo a un sistema de flujo hipotético consistente en una tubería horizontal de 2.048 metros de longitud [10.000 pies], y *tubería ascendente vertical* de 45,72 metros de altura [150 pies], ambos de 0,3048 metros de diámetro [12 pulgadas], considerando un flujo de 7.154 metros cúbicos por día [ $\text{m}^3/\text{d}$ ] 45.000 barriles por día [b/d] de aceite con una densidad de 35

grados API, Relación Gas Aceite [RGA] de 144 metros cúbicos sobre metros cúbicos [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ]. Para dichas condiciones el algoritmo de cálculo determino un tapón de líquido de longitud máxima de 746 metros [2.445 pies], el cual tardaba 83 segundos en pasar a través del separador; mientras que la burbuja de gas asociada pasaba en un tiempo de 225 segundos. El modelo no fue validado con mediciones de laboratorio ni datos adicionales de campo, por lo que su aplicación a tuberías de diámetro diferente se desconoce.

En 2007 Guzmán y Fairuzov crearon un modelo mecanístico de flujo bache transitorio, como el resultado del análisis teórico experimental de un sistema de tubería horizontal *tubería ascendente vertical* separador, en el cual la longitud de los tapones de líquido excede la longitud de la tubería ascendente vertical ( $L_s < H_r$ ). Dicho modelo toma como base trabajos anteriormente descritos por Miyoshi *et al.* y Schmidt *et al.*, los cuales consistieron en el estudio de flujo bache con longitud de tapones menor a la de la tubería ascendente vertical. La siguiente figura esquematiza el fenómeno analizado por Guzmán y por Fairuzov.

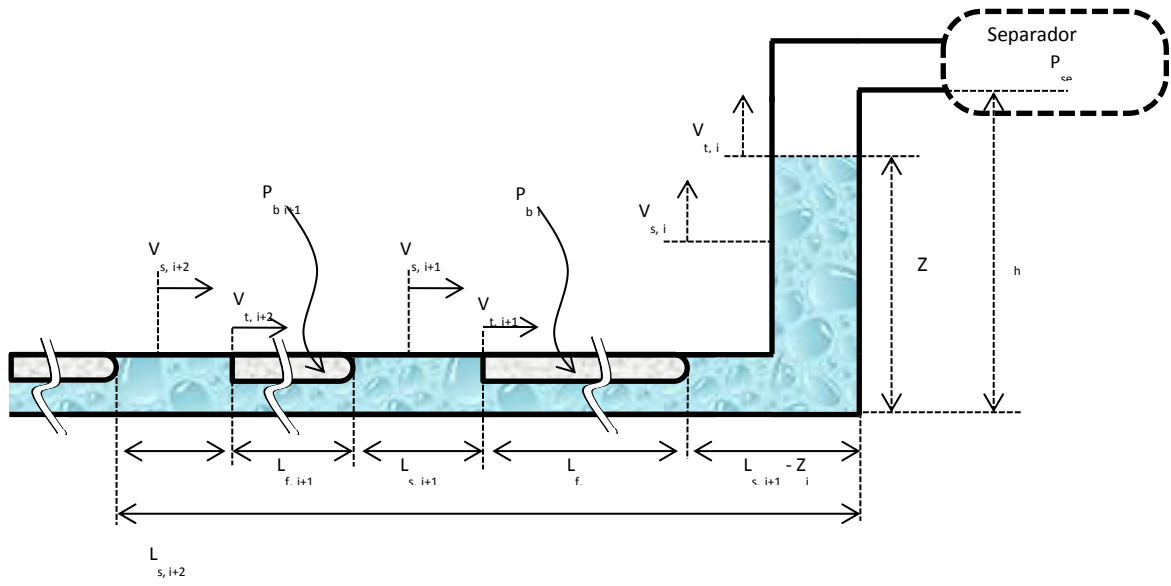


Fig. 12 Esquema del sistema analizado por Guzmán y Fairuzov.

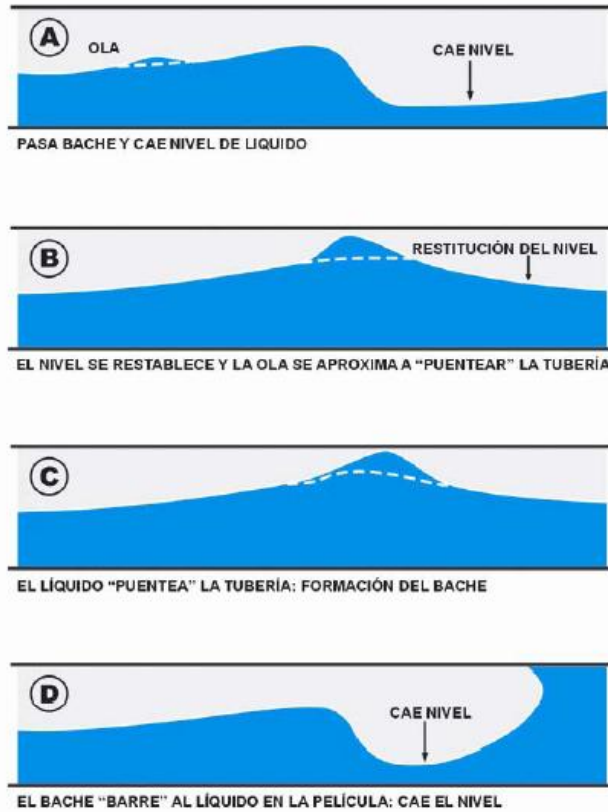
## **CAPITULO 3 MODELADO MECANISTICO DE FLUJO**

### **3.1 Caracterización del flujo bache**

El patrón de flujo bache o intermitente existe para un amplio rango de gastos de flujo y diámetros pequeños o medianos para configuraciones horizontales en las tuberías inclinadas. El flujo con este tipo de patrón constituye un sistema inestable con respecto a grandes variaciones de gasto másico, presión y velocidad en cualquier sección transversal de la tubería. Lo anterior se presenta incluso cuando las fases líquido y gaseosa que ingresan a la tubería conforman un sistema estacionario. Como resultado de lo anterior, los procesos de transferencia de materia y calor son transitorios con grandes fluctuaciones en la temperatura y concentraciones molares

### **3.2 Descripción de flujo bache**

De acuerdo a las observaciones realizadas, se ha podido establecer las fases que se presentan en el patrón de flujo bache, las cuales se describen a continuación:



**Fig. 13** Proceso de formación de flujo bache.

Aumento en el nivel del líquido debido a que la capa de líquido pierde aceleración. Simultáneamente se presenta la aparición de olas que incrementan aún más el nivel del líquido, hasta que se obstruye momentáneamente el flujo de gas.

El gas acelera la capa de líquido, que obstruye completamente la sección transversal de la tubería, ejerciendo presión en el volumen de la capa de líquido en la película para incorporarlo al cuerpo del bache, adquiriendo también la velocidad que



tiene el líquido en el cuerpo del bache. De esta manera el movimiento rápido del líquido incrementa su volumen y forma el bache de líquido.

Conforme viaje el bache de líquido a través de la tubería, se derrama líquido de la parte posterior, formando nuevamente una capa de líquido con superficie libre, la cual pierde aceleración rápidamente, debido a los esfuerzos cortantes y factores de fricción de la interfase.

Una vez formado el flujo bache, éste va recorriendo la tubería, el exceso de líquido ha sido derramado en el bache, a su vez el volumen del líquido va adquiriendo el frente del bache, lo cual estabiliza la longitud del bache, ya que el gasto de entrada y salida del líquido al cuerpo del bache es prácticamente el mismo.

El frente del flujo bache, la capa del líquido que le precede penetra cierta longitud del cuerpo del bache, provocando un remolino, el cual es un vórtice, lo anterior se debe a que la energía cinética del cuerpo del bache es mayor que la de la capa del líquido.

Conforme el gasto del gas aumente, disminuirá el cuerpo del flujo bache, el gas llegara formar una fase continua a través del bache, logrando que ya no pueda mantenerse el bloqueo del líquido, permitiendo nuevamente el paso del gas a través del líquido, por lo que el flujo cambia el régimen a flujo anular.

Hasta ahora, solo se ha hecho referencia al proceso de formación del bache, sin embargo, la longitud del mismo se vé modificada por diversos fenómenos que anteriormente no fueron analizados ni tomados en cuenta, la consideración de estos efectos permitirán evaluar la transformación del bache con respecto al tiempo.

Los principales factores que actúan en la evolución de la longitud del bache son:

- *Rápido crecimiento lineal inicial*: al fluir rápidamente los baches de líquido y recoger la capa de líquido que se mueve más despacio al frente del bache, lo cual lleva a un crecimiento rápido, casi lineal, si se supone que no existe aceleración del bache y un derrame constante durante esta fase.
- *Expansión del gas*: la caída de presión propicia una expansión notable del gas, por lo tanto la velocidad del bache se incrementará, así mismo incrementará la aireación del bache, lo que modificara la longitud del mismo.
- *Accidentes topográficos y cambios de pendiente*: las variaciones de inclinación inducen a una modificación en la cantidad de líquido que entra al frente del bache. También las aceleraciones verticales pueden inducir una aceleración en el derrame del líquido en la estela del bache. El efecto completo es un cambio de masa de líquido en el cuerpo del bache.
- *Recogimiento y derrame diferenciales de líquido del bache de acuerdo a su longitud*: en contraste con los efectos previos, el recogimiento y derrames diferenciales afectan y dependen de la distribución de las longitudes del bache, así mismo, también son responsables de la desaparición de los baches cortos.

### **3.3 Avances en caracterización de flujo bache para ductos horizontales ligeramente inclinados.**

La habilidad de caracterizar con exactitud el comportamiento de flujo bache para ductos de diámetro largo es esencial para la operación exitosa de muchos campos en altamar, remotamente ubicados. Éstos a menudo están conectados con instalaciones existentes por medio de líneas de flujo multifásico llenas con buena corriente y deben ser diseñadas para no trastornar las instalaciones de producción de la línea final. Mientras el patrón de flujo bache es complejo y no se entiende del todo, un número de avances recientes han mejorado nuestra habilidad para predecir parámetros importantes como la velocidad de tapón, colgamiento de líquido, y longitud.

Métodos actuales para la estimación de la velocidad del flujo bache, colgamiento del líquido y longitud del bache, son presentados primero y su exactitud examinada. Datos recolectados por Kouba son usados como base para muchas de las comparaciones. Kouba condujo 53 pruebas cubriendo un amplio rango de tasas de gas y líquido dentro del patrón de flujo bache. La instalación para pruebas consiste en un ducto horizontal con un diámetro de 3 pulgadas, una longitud de 1370 pies, aire queroseno. El colgamiento del líquido del cuerpo del tapón y región burbuja se midieron usando sensores de capacidad dinámicamente calibrados. El promedio de tapón y longitud de burbujas también fueron obtenidos. Para este trabajo, estos datos fueron re-examinados para obtener la película de colgamiento de un diámetro de tubería frente a los tapones, así, lo que se obtiene de la lectura se aproxima más a las condiciones de equilibrio.

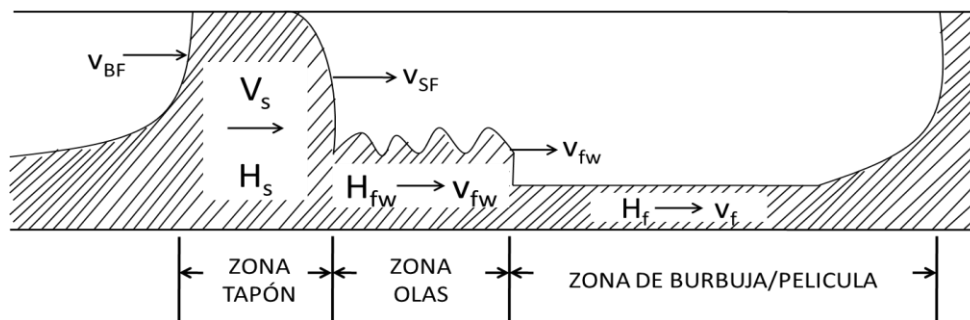
Para comprender las amplias variaciones observadas en la longitud de tapón, se introduce el concepto de trazado de mapas de patrón de flujo de la longitud de tapón. Esta técnica de análisis se muestra útil para visualizar el comportamiento de otras características de flujo bache. La exactitud de los métodos existentes para predecir la ocurrencia de flujo bache es discutido y un método para definir los límites de transición directamente del modelo patrón de flujo bache son desarrollados. Este método provee mayor consistencia entre el modelo patrón de flujo y el modelo de transición patrón de flujo. El efecto del terreno en las características del flujo bache es discutido y un modelo es desarrollado para predecir cambios en la longitud de tapón debido a inclinación, en el caso de flujo global en estado estacionario. Un modelo se desarrolla para describir el crecimiento de tapón para el caso especial cuando el cola es precedido por el flujo bache.

Técnicas para la caracterización del flujo bache son aplicadas al ejemplo, un ducto que conecta los campos de Eldfisk y Ekofisk en sector de Noruega del mar del norte.

### **3.4 Caracterización de Flujo Bache.**

El modelo Hubbard & Dukler sirve como base para nuestro entendimiento actual del patrón de flujo bache. La Figura 1 ilustra las varias interacciones observadas durante el flujo bache. El frente de tapón se mueve a una velocidad transnacional de  $v_{SF}$  y el frente de la burbuja de gas se mueve a una velocidad de  $v_{BF}$ . Asumiendo un

flujo homogéneo en el cuerpo del tapón, la velocidad del fluido en el tapón,  $v_s$  es esencialmente la velocidad mezclada,  $v_m = v_{SL} + v_{SG}$ . El colgamiento del líquido en el tapón se denota como  $H_s$ . Conforme el tapón se mueve, se incorpora líquido de la zona del contacto líquido gas precedente al cuerpo del tapón y lo acelera a  $v_s$ . El líquido también se desprende de la cola conforme se mueve a través del ducto. El tapón puede ser precedido por dos diferentes tipos en la región de película líquida. Durante el desarrollo del flujo bache, se precede por una región ondulada estratificada, equivalente a un flujo estratificado normal. La velocidad del fluido en esta región es  $v_{fw}$ . Después el tapón consume esta región ondulada estratificada de lento movimiento y crece a longitud estabilizada, el tapón es precedido por la región de la capa que es el líquido desprendido por el tapón precedente. La velocidad del fluido en esta región se denota por  $v_f$  o  $v_{fe}$  si se asume que la película alcanza condiciones de equilibrio. El colgamiento de líquido de estas regiones es designado de manera similar, por ejemplo,  $H_{fw}$ ,  $H_f$ ,  $H_{fe}$ , respectivamente. A continuación se consideran métodos para estimar estas características:



**Fig. 14 Modelo físico del flujo bache.**

### 3.5 Velocidad Tapón.

El tapón se caracteriza por dos velocidades de las interfases; el frente tapón y el frente burbuja. La velocidad translacional del frente burbuja,  $v_{BF}$ , se asume comúnmente que tiene la forma sugerida por Nicholson por ejemplo:

$$v_{BF} = 1.2v_s + v_D \quad 3.1$$

Donde  $v_s$  es la velocidad promedio del líquido en el tapón. Para flujo homogéneo sin deslizamiento en el cuerpo del tapón,  $v_s = v_m$ . Entonces,  $1.2v_m$  es aproximadamente igual a la velocidad máxima del líquido en el tapón. La velocidad de deriva,  $v_D$ , en la Ecuación 1 es entonces la velocidad relativa entre la velocidad máxima de gas en la burbuja  $v_{BF}$ , y la velocidad máxima del líquido en el tapón,  $1.2v_s$ .

Mientras la velocidad de deriva es claramente distinta de cero para flujo inclinado, algunos investigadores reportaron que  $v_D = 0$  para flujo horizontal. Otros observaron velocidad de deriva significativa en ductos horizontales. Weber explicó que algunos investigadores no habían observado deriva en ductos horizontales mediante la realización de un equilibrio de fuerzas del frente de una burbuja estacionaria. Esto reveló un número Eotvos crítico bajo el cual líquido no se drenará de un ducto horizontal abierto a la atmósfera en un extremo y cerrado en el otro, por ejemplo, no deriva. Weber también propuso la siguiente correlación para la velocidad de deriva en ductos horizontales

$$\frac{v_D}{\sqrt{gd}} = 0.54 - 1.76E_{oD}^{-0.56}; \quad 3.2$$

Donde,

$$E_{oD} = \frac{\rho_L g d^2}{\sigma}; \quad 3.3$$

Bendiksen presento formula para calcular la velocidad de deriva de burbuja en ductos inclinados:

$$v_D = (v_D)_{horizontal} \cos(\theta) + (v_D)_{vertical} \sin(\theta); \quad 3.4$$

Como demostraron Davies & Taylor, la velocidad de deriva de burbuja en tubos verticales es:

$$(v_D)_{vertical} = 0.35 \sqrt{gd}; \quad 3.5$$

Y para ductos horizontales de Benjamin:

$$(v_D)_{horizontal} = 0.54 \sqrt{gd}; \quad 3.6$$

La ecuación 3.2 debe ser usada en lugar de la ecuación 3.6 para casos cuando el número Eotvos es pequeño (por ejemplo, ductos de diámetro pequeño o fluidos muy viscosos).

La velocidad del frente tapón se puede obtener por medio de la realización de un equilibrio de masa líquida entre el frente del tapón y el punto en el cuerpo del tapón donde se asume que la película ha sido completamente acelerado a una velocidad  $v_S$

$$v_{SF} = \frac{H_S v_S - H_f v_f}{H_S - H_f} = v_S + (v_S - v_t) \sum_{i=1}^{\infty} \left( \frac{H_t}{H_S} \right)^i; \quad 3.7$$

La segunda expresión de  $v_{SF}$  se puede obtener de la exitosa sustitución y es útil en el modelo pasajero de movimiento de tapón.

### 3.6 Colgamiento de líquido del cuerpo de tapón.

Una de las principales variables requeridas en la caracterización de flujo bache es el colgamiento de líquido del cuerpo de tapón,  $H_S$ , la correlación de Gregory, que relaciona  $H_S$  con la mezcla de velocidad es el método usado más comúnmente y ha tenido mucho éxito describiendo el comportamiento de colgamiento de líquido de tapón.

$$H_S = \frac{1}{1 + \left(\frac{vm}{28.4}\right)^{1.39}} \quad 3.8$$

Información actualmente disponible muestra que el colgamiento del líquido del tapón no es una función única para  $v_{SF}$ , pero parece tener cierto grado de variación con  $v_{SG}$  y  $v_{SL}$  para la geometría y fluido particular de un ducto. Observaciones visuales sugieren que en algunos grados de flujo, no se alcanza una mezcla homogénea en el cuerpo del tapón. En cambio, estratificación del colgamiento de líquido ocurre con menos aeración cerca del fondo del ducto que en lo alto de este. Sin embargo, obras recientes han incrementado el entendimiento de los mecanismos resultando en gas de arrastre dentro del cuerpo del tapón y ofrece la posibilidad de modelar este fenómeno.

Un avance significativo en el entendimiento del colgamiento de líquido fue hecho por Barnea y Brauner. En su obra postularon que el colgamiento de líquido en el cuerpo del tapón era equivalente al colgamiento de líquido observado en flujos de burbuja



normales, homogéneos y dispersos con el mismo nivel de turbulencia. Esto podría ser aproximado por el colgamiento de líquido en el límite del patrón de flujo bache de burbuja disperso a una mezcla de velocidad equivalente. Por consiguiente, conociendo el límite de transición esto permite el cálculo de los valores de colgamiento de líquido en el bache, o viceversa, conociendo el atraco bache se puede predecir algo de los límites de transición. Ellos mostraron buenos resultados en predecir colgamiento de líquido con datos de diámetro pequeño, sin embargo, para ductos de diámetro más grande el método no se comporta bien ni con el límite de transición de tapón burbuja disperso de Taitel & Duckler o Barnea. Fuchs & Brandt hicieron observaciones similares sobre la exactitud de estos modelos de límite de transición en ductos de diámetro largo, usando información del circuito SINTEF. Sin embargo ellos fueron capaces de demostrar la validez de la idea de Barnea & Brauner usando datos de atraco para predecir la transición y observaron el límite de transición para predecir atracos bache.

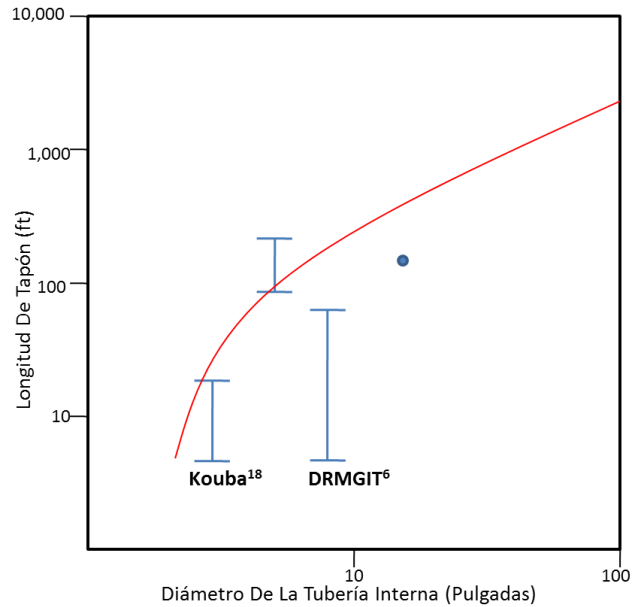
El colgamiento de líquido mínimo dentro del cuerpo del tapón es comúnmente considerado de 48%. Esto asume erróneamente el embalaje cubico de burbujas del mismo tamaño, que es el arreglo menos compacto. El embalaje romboédrico es la manera más compacta para esferas de igual tamaño, y resulta en un colgamiento de líquido mínimo de 26%. Esto es un buen arreglo con mínimos colgamientos de líquidos reportados.

### 3.7 Longitud del tapón.

La longitud del tapón (o frecuencia) se requiere como parámetro de entrada para todos los modelos de flujo bache. La predicción de longitud de tapón es quizás el parámetro más difícil que debe ser estimado. La longitud de tapón se ha encontrado que es fuertemente dependiente del diámetro del ducto. Esto hace que las correlaciones obtenidas usando instalaciones de prueba con ductos de diámetro pequeño sean difícilmente adaptadas a escalas de grandes instalaciones. Para ductos de diámetro grande, las correlaciones desarrolladas en el campo Prudhoe Bay en Alaska fueron las más exitosas. La figura 14 muestra las predicciones de la correlación Scott para diferentes diámetros de los ductos.

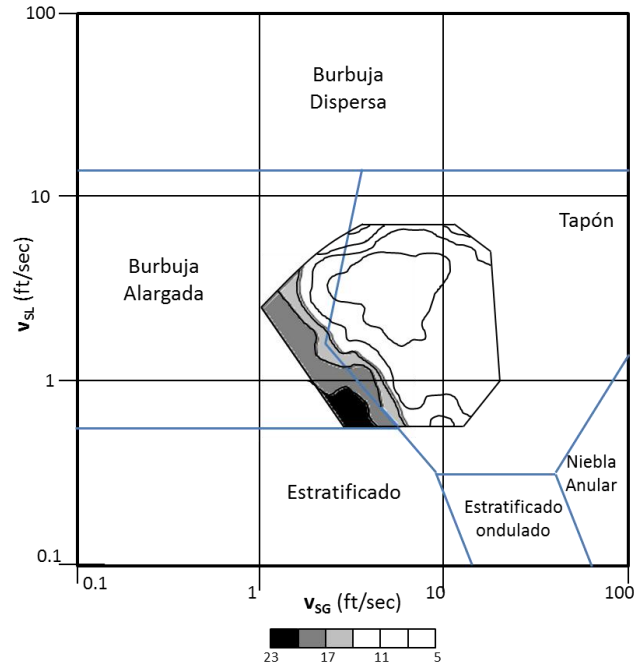
$$\ln(L_S) = -25.41 + 28.50(\ln d/12)^{0.1} \quad 3.9$$

A pesar de que existe una fuerte correlación entre la longitud de tapón y el diámetro del ducto, en un diámetro particular, las variaciones en la longitud de tapón se observan debido a velocidades de gas y líquido que difieren.



**Fig. 15 Correlación de la longitud del tapón**

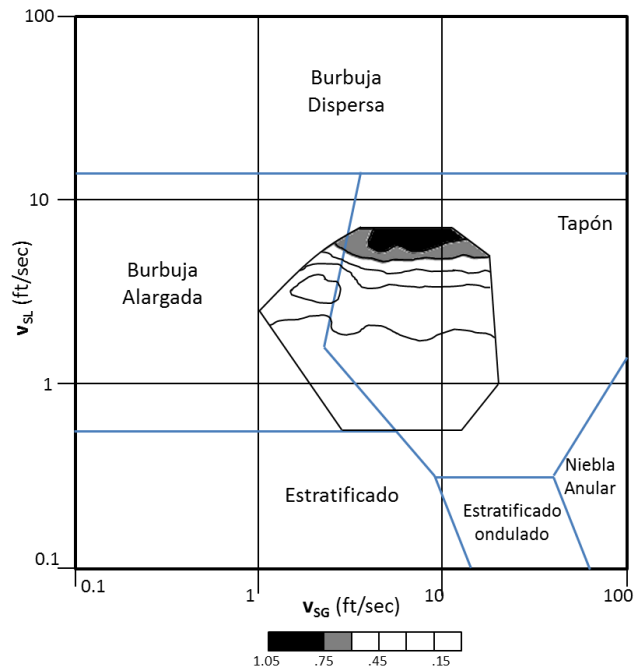
La figura 15 muestra las longitudes de tapón observadas en instalaciones de prueba de tres pulgadas. En el mapa de patrón de flujo de Mandhane se muestran los isogramas de la longitud del tapón. Estos resultados indican fuertemente que las longitudes de tapón son las más pequeñas cuando están cerca del centro de la región de patrón de flujo bache en un mapa de patrón de flujo. Se observa que las longitudes de tapón más grandes, se observan cerca de los límites de transición de los otros patrones de flujo. Comportamientos similares de la longitud de tapón se han reportado para ductos de diámetro grande, donde tapones más largos son reportados en los límites de transición de flujo bache y tapones más pequeños son observados como las tasas de flujo se muevan más en la región de flujo bache. Esta figura ilustra la dificultad encontrada al intentar correlacionar la longitud de tapón.



**Fig. 16 Longitud de tapón en el mapa de esquemas**

Algo de la variación de longitud de tapón con tasas de flujo se puede explicar a través de mecanismos físicos. Se postula que la parte inferior izquierda del patrón de flujo bache es dominado por efectos del terreno y la geometría del sistema de ductos. En la transición de flujo estratificado muy pocos tapones existen en el ducto. En esta región la salida de un tapón de la toma del ducto está estrechamente unida con la formación de un tapón cerca de la entrada del ducto. Por eso la distancia entre la toma del ducto y el punto de formación del tapón dicta parcialmente la longitud de tapón resultante. La gran región en el centro del patrón de flujo bache exhibe las longitudes más pequeñas. Como se mostrara más adelante, Los tapones en esta región relativamente no son afectados por pequeños cambios en la inclinación del ducto y principalmente son controlados por el diámetro de la tubería. Conforme se alcanza el

límite del flujo anular, se observa nuevamente un incremento en la longitud de tapón. Esto es principalmente por el incremento en la aeración del tapón, con volúmenes de tapones líquidos manteniéndose cerca de esos observados cerca del centro del patrón de flujo.



**Fig. 17 Frecuencia de flujo tapón en el esquema del patrón de flujo**

La figura 17 muestra una trama similar de isogramas de frecuencia de tapón en un mapa de flujo de patrón. Por mucho del flujo de patrón, la frecuencia de tapones es una función de la velocidad superficial del líquido solamente. La longitud de tapón y la frecuencia están relacionados como sigue:

$$v = L/v_{SF} \tag{3.10}$$

Cuando la frecuencia de tapón se usa como entrada para un modelo de flujo bache, la longitud de tapón se convierte en un cálculo indirecto. El valor de longitud de tapón calculado de la ecuación 10 es altamente dependiente de la exactitud de la burbuja/modelo de película usado.

### 3.8 Comportamiento de Burbuja/Película.

Para modelar el comportamiento de la región burbuja/película que separa los tapones líquidos se han propuesto distintos métodos. Métodos para obtener el perfil de la velocidad-atraco de la cola del tapón han sido propuestos por Duckler & Hubbard, Nicholson, y Maron. Estos métodos se han enfocado en el equilibrio del impulso líquido y algunos han ignorado el corte interfacial. El siguiente desarrollo utiliza un enfoque de impulso combinado similar al usado por Taitel & Dukler por flujo en estado estacionario estratificado.

En el apéndice, se desarrolla un método para predecir el perfil de la cola del tapón. Este método resulta de la siguiente expresión:

$$\frac{d\bar{v}_f}{dx} = \frac{-g \sin \phi (\rho_L - \rho_G) \left( \frac{\tau_{wL} S_f + \tau_{wG} S_G}{A_f} + T_1 \left\{ \frac{S_i}{A_f} + \frac{S_i}{A_G} \right\} - g \rho_L \cos \phi \frac{dy_f}{dx} \right)}{\rho_L \bar{v}_f + \frac{\rho_G \bar{v}_G^2 A_f}{\bar{v}_f A_G} - \frac{\rho_L g y_f \cos(\phi)}{\bar{v}_f}} \quad 3.11$$

Para obtener la velocidad y colgamiento de líquido de la cola del tapón como una función de la distancia, la ecuación 3.11 se integra como se presenta en el apéndice.

Esto debe proveer la mejor estimación de comportamiento de la capa líquida del flujo del tapón.

En obras recientes se ha argumentado que en realidad, la cola del tapón es relativamente corta con respecto a la longitud total de la región de capa de burbujas. Por lo tanto, poco después de dejar la cola del tapón, la capa alcanza equilibrio hidrostático. Tres capas de modelo de equilibrio se utilizan: 1) impulso combinado; 2) impulso líquido incluyendo corte interfacial; y, 3) impulso líquido descartando corte interfacial. Todos los métodos se pueden obtener de simplificaciones del modelo de cola de tapón dado en la ecuación 3.11.

El modelo de impulso combinado puede ser obtenido directamente de la ecuación 3.11 tomando las derivativas con respecto a una distancia igual a cero, esto produce:

$$\frac{T_{WL} S_{fe}}{A_{fe}} - \frac{T_{WG} S_G}{A_G} - T_i S_{ie} \left\{ \frac{1}{A_G} + \frac{1}{A_{fe}} \right\} = -(\rho_L - \rho_G) g \sin(\phi) \quad 3.12$$

Esta ecuación es esencial para la solución de flujo en estado estacionario estratificado desarrollado por Taitel & Dukler. La importancia de este resultado es la indicación de que la capa de equilibrio del flujo bache, que se comporta igual que un flujo estratificado normal. Sin embargo, la combinación de tasas de flujo de gas y líquido posibles dentro de la región burbuja/película del tapón es muy limitada, y dictada por el derramamiento de la cola del tapón.

Método 2 se puede obtener ignorando la contribución del impulso de gas en la ecuación 3.12.

$$T_{wL} S_{fe} - T_i S_{ie} = -\rho_L g A_{fe} \sin(\phi) \quad 3.13$$

En los métodos 1 y 2, correlaciones para  $f_i$  se pueden usar para modelar la capa de equilibrio ondulado que ocurre a velocidades altas de gas. Para esta obra, la correlación Andritsos & Hanratty es usada.

El método 3 de capa de equilibrio se puede obtener descartando simplemente el término  $T_i$  de la ecuación 3.13, por ejemplo:

$$T_{wL} S_{fe} = -\rho_L g A_{fe} \sin(\phi) \quad 3.14$$

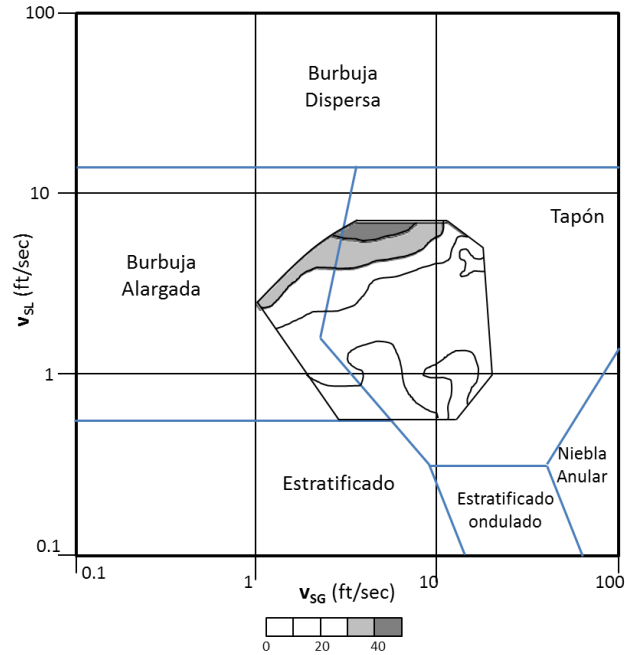
Nótese que para flujo horizontal, el método 3 requiere una velocidad de capa de equilibrio cero. También, si la velocidad de deriva de burbuja se asume igual a cero, entonces de la ecuación 3.7:

$$H_{fe} = \frac{1}{6} H_s \quad 3.15$$

Las diferencias en las predicciones de los métodos 1-3 han sido mínimas. Incluyendo la velocidad de deriva de burbuja de no-cero, sin embargo, tiene un efecto significativo que mejora la predicción de  $H_{te}$ .

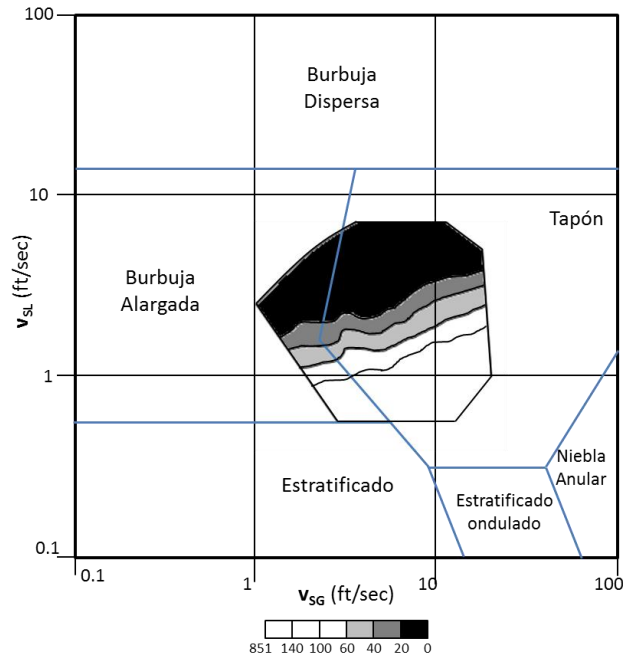
Para determinar bajo que condiciones la suposición de capa de equilibrio es justificado bajo las predicciones de estos modelos, los cuales son comparados con la información de Kouba y el modelo numérico de cola de tapón dado en Ecuacion 3.11.





**Fig. 18 Precisión de la simplificación del equilibrio de la película.**

La figura 18 muestra una trama del error en la predicción de la capa de colgamiento de líquido de un diámetro de ducto frente al tapón, usando el método 1 y datos de Kouba. El porcentaje de error se representa usando isogramas en un mapa de patrón de flujo. La figura muestra claramente que la suposición de capa de equilibrio no se justifica en la parte superior izquierda de la región de flujo de tapón en el mapa de patrón de flujo, por ejemplo cerca de la transición burbuja dispersa – flujo de cola. En esta región la regla son errores mayores que 40%.



**Fig. 19 Esquema de la longitud de la burbuja**

La figura 19 muestra isogramas de la longitud de burbuja en un mapa de patrón de flujo de este sistema. Se observa que la región de grandes errores en el cálculo de la capa de equilibrio corresponde a la región donde la longitud de burbuja/película es menos de 20 pies. Esta trama sugiere que los errores grandes observados cuando se usa la capa de equilibrio simplificado se deben a que la capa no alcanza el equilibrio antes del próximo tapón. Esto es, la burbuja, separando a los tapones es muy corta para que se alcance el equilibrio. Para probar esta hipótesis, se usó el modelo de cola de tapón fue usado para predecir  $H_t$  la magnitud de la longitud de la burbuja, por ejemplo, justo antes del próximo tapón. Esto resulto en una reducción en el error a menos del 20% por todos los casos.

### 3.9 EXISTENCIA DE FLUJO BACHE

La habilidad de predecir con exactitud si un flujo bache va a ocurrir en una línea de flujo es de suma importancia para el diseño de instalaciones. Métodos para la predicción de la existencia de un patrón de flujo bache. La aplicación de estos métodos en ductos de gran diámetro, no ha sido del todo exitoso. Recientes obras de Fuchs & Brandt en SINTEF demuestran ampliamente que usando mapa de flujo patrón de Taitel & Dukler predicen pobremente las transiciones de flujo bache en ductos de gran diámetro. Resultados similares se encontraron de los datos tomados en Prudhoe Bay donde la información es claramente flujo bache, pero cae fuera del patrón de flujo bache en el mapa Taitel & Dukler. El mapa Mandhane, aunque no está basado en principios de modelo mecánicos, a menudo predice flujo bache en muchos casos cuando fallan otros métodos. Sin embargo, los efectos de inclinación no se consideraron y las modificaciones de propiedad de los fluidos son cuestionables.

Un enfoque ligeramente diferente a modelar las transiciones a flujo bache ha sido propuesto recientemente. El enfoque se basa en la consideración de estabilidad de tapón y utiliza modelos mecánicos de flujo bache y los flujos de patrón circundantes. Este método provee consistencia entre el flujo patrón y el flujo patrón de modelos de transición. También, la oportunidad existe para mejoras en la predicción de transiciones de patrón de flujo, las mejoras se hacen en el modelo individual de patrones de flujo. El desarrollo debajo considerará el tapón estratificado y las transiciones de la burbuja dispersa del tapón.

### 3.10 Transición estratificada del tapón.

Tradicionalmente, la transición de flujo estratificado a flujo bache ha sido modelada considerando la estabilidad de la onda. La transición ha sido definida cuando la onda crece lo suficiente como para recorrer el ducto. Mientras recorrer el ducto es una condición necesaria para la transición a flujo bache, la estabilidad del tapón recién formado, da la suficiente condición para la transición a flujo bache. Si el flujo se perturba por la introducción de un tapón en la línea de flujo operando en flujo estratificado, la estabilidad de este tapón determinará la existencia del flujo bache.

Un modelo de crecimiento de tapón fue desarrollado por Scott para predecir el comportamiento del desarrollo del tapón. Este modelo puede ser usado para definir un punto de crecimiento de tapón neutral en el que el tapón ni crece ni se disipa. Este punto de crecimiento neutral define el límite de transición entre el tapón y el flujo estratificado. Recientemente, Lunde & Asheim y Jepson han desarrollado modelos similares. En el modelo Jepson, sin embargo, el frente del tapón se modela como un salto hidráulico. Siguiendo el desarrollo de Scott, la estabilidad del tapón se define simplemente como:

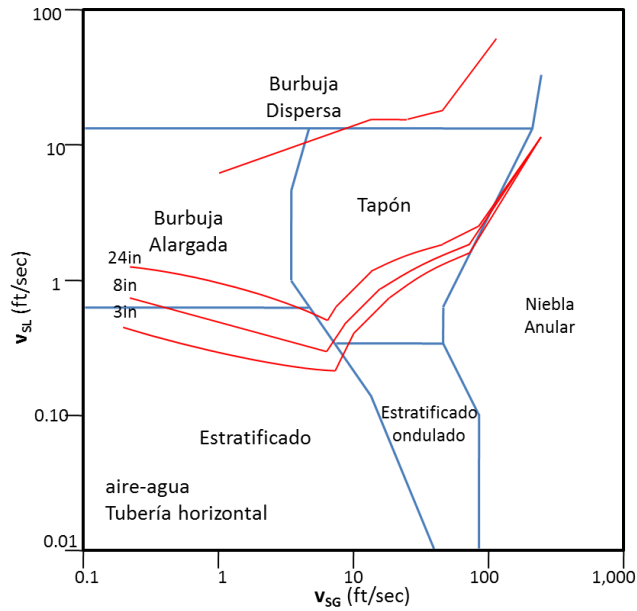
$$\frac{dL_s}{dx} = 1 - \frac{v_{BF}}{v_{SF}} = 0 \quad 3.16$$

Para predecir la transición de flujo estratificado, se introduce un tapón al ducto como flujo estratificado completamente desarrollado. Por consiguiente, en el frente del tapón un flujo estratificado se incorpora al tapón.

$$V_{SF} = \frac{H_s v_s - H_{fw}}{H_s - H_{fw}} \quad 3.17$$

La cola del tapón arroja líquido de manera normal, por lo que la velocidad del frente de la burbuja translacional está dada como en la ecuación 3.1. La combinación de las ecuaciones 3.16, 3.17 y 3.1 producen los criterios de transición para un flujo bache estable.

El límite se puede obtener asumiendo valores para  $v_{SL}$  que satisfagan la ecuación 16. Las variables del flujo estratificado,  $H_{fw}$  y  $v_{fw}$ , son obtenidas con suposiciones en  $v_{SG}$  y  $v_{SL}$  usando la solución de Taitel & Dukler para flujo estratificado. La correlación para  $f_i$  de Andritsos & Hanratty y la correlación para  $H_{fw}$  de Gregory (con límite de  $H_s > 0.26$ ) se usaron en este trabajo.



**Fig. 20** Transiciones de flujo patrón a el modelo de estabilidad del tapón.

La figura 20 muestra las predicciones obtenidas por este método en un mapa Mandhane para un sistema horizontal aire-agua. La figura 8 muestra una comparación del modelo de estabilidad del tapón con los límites de transición de Lin & Hanratty. Las predicciones son consistentes con los resultados experimentales y muestran el efecto apropiado de diámetro.

### 3.11 Transición de burbujas dispersas en tapón.

La transición de flujo bache a flujo de burbuja dispersa también se puede modelar de consideraciones de estabilidad del tapón. Un equilibrio de masa líquido sobre una unidad de tapón da:

$$\frac{L_f}{L_u} = \frac{V_{SL} - H_s V_s}{H_f V_f - H_s V_s} \tag{3.18}$$

Por definición, el patrón de flujo bache debe exhibir un flujo intermitente que consista de regiones con tapones de alto colgamiento de líquido separadas por regiones de capas de burbujas de gas-liquidas. El patrón de flujo bache se vuelve inestable como  $L_f/L_u = 0$  (por ejemplo cuando las burbujas de gas ya no pueden separar los tapones). En este límite, la ecuación 3.18 produce el límite de la transición de las burbujas dispersas en el tapón de:

$$v_{SL} = H_S v_s \quad 3.19$$

En la transición, el flujo se convierte en una mezcla homogénea similar a la observada en el cuerpo del tapón. La ecuación 3.19 es equivalente a la idea de Barnea & Brauner que  $\lambda_L = H_S$  en la transición entre el tapón y el flujo de burbuja dispersa.

La figura 20 muestra la transición de burbuja dispersa-tapón predicha cuando la correlación Gregory es usada para  $H_S$  (con límite de  $H_S > 0.26$ ). Predicciones de la ecuación 3.19 serían de esperarse que mejoraran la correlación y los modelos para el colgamiento de líquido.

### 3.12 Otras influencias en transición de flujo bache.

El patrón de flujo bache muestra un problema particular con el concepto de un mapa patrón de flujo en estado estático. La naturaleza intermitente del flujo puede crear

efectos de hipótesis en el límite patrón del flujo en segmentos de ducto circundantes. Efectos en el límite de transición del flujo bache estratificado fueron observados experimentalmente por Fairhurst y los mecanismos que llevan a este efecto fueron modelados por Scott. En esencia, el límite de transición estratificado-tapón se encuentra más alto que  $v_{SL}$  cuando determinado movimiento de estratificado a flujo bache que cuando se mueve de flujo bache a estratificado. Una vez que el flujo bache existe en un ducto, fluctuaciones de presión causadas por la salida de un tapón de la salida de línea de flujo crean fluctuaciones en la entrada de velocidad que cambiara localmente las tasas de flujo lo suficiente para provocar la formación de un tapón. Entonces, si existe un flujo bache en un ducto, bajando las tasas a flujo estratificado puede que introduzca un periodo de fluctuaciones de alta presión y grandes tapones líquidos antes de alcanzar el flujo estratificado.

De igual manera, la presión local y fluctuaciones en un segmento del ducto en flujo bache puede afectar el patrón de flujo en segmentos de ducto circundantes. Por ejemplo, si existe flujo bache rio arriba de un segmento que se predijo era de flujo estratificado, los tapones como quiera pueden estar presentes, como la transición de flujo bache a flujo estratificado usa una distancia finita en orden de que los tapones se disipen. Si el flujo bache existe rio debajo de la sección de interés, la presión local y fluctuaciones en tasas creadas por este flujo intermitente puede incorporar cambios en el patrón de flujo de este segmento. Por eso, si existe flujo bache en cualquier segmento del ducto, se debe prestar especial atención a todos los segmentos del ducto, que en un mapa de patrón de flujo se predice no tener flujo bache.



### 3.13 MODELO DE TERRENO

Durante mucho tiempo, se ha pensado que pequeños cambios en la inclinación de un ducto ha sido pensado durante mucho tiempo que altera las características del flujo bache. A pesar de esto, relativamente pocos estudios han sido conducidos para examinar este tipo de comportamiento. El modelo de estado estático simplificado de los efectos locales de cambios ligeros en inclinación propuestos por Scott será usado en este análisis. El modelo está basado en consideraciones de flujos en estado estático y se puede esperar que sea válido solo para cambios lentos y graduales en la inclinación en el orden de  $\pm 10$  grados. Este tipo de pendiente suave se espera en el fondo del océano. El modelo predice efectos de inclinación en un tapón ya establecido. El caso donde el terreno cuenta con efectos de formación de tapones y longitud inicial no son considerados.

La obra de Hubbard & Dukler muestra que una masa equilibrada puede ser realizado entre cualquier unidad de tapón y la entrada de la línea de flujo. Por ejemplo, esta idea se produce en la fase líquida:

$$A_P \rho_L V_{SL} = \frac{A_P \rho_L L_S H_S v_S + A_P \rho_L L_f H_f v_f}{L_S + L_f} \quad 3.20$$

Usando este concepto Hubbard & Dukler fueron capaces de mostrar que para flujos sin deslizamiento homogéneos en el cuerpo del tapón, la velocidad del fluido en el cuerpo líquido del tapón,  $v_S$ , es igual a la velocidad mezclada,  $v_m$ . Para flujo bache de estado

estático ligeramente inclinado, se pueden realizar equilibrios de masas similares entre una unidad de tapón horizontal y la unidad de tapón inclinada en un ángulo  $\phi$  como se muestra en la figura 9. Dejando de lado los efectos de expansión de gas, esto produce:

$$\left[ \frac{L_s H_s v_s + L_f H_f v_f}{L_s + L_f} \right]_{\phi=0} = \left[ \frac{L_s H_s v_s + L_f H_f v_f}{L_s + L_f} \right]_{\phi} \quad 3.21$$

Siguiendo directamente de esta suposición  $[v_s]_{\phi=0} = [v_s]_{\phi}$  Mattar & Gregory concluyeron que el efecto de la inclinación en colgamiento de líquido del tapón es despreciable. Por eso, la correlación Gregory puede ser usada para predecir el colgamiento de líquido del tapón en ambas sectores, horizontal e inclinado. Como esta correlación depende solo de  $v_s$ , el colgamiento de líquido para las unidades de tapón horizontal e inclinado son también calculadas a ser iguales.

Ahora se asume que para este flujo en estado estático la masa total se conserva entre las unidades de tapón horizontal e inclinado. Para la fase de gas, esto produce:

$$[A_P \rho_G L_s (1-H_s) + A_P \rho_G L_f (1-H_f)]_{\phi=0} = [A_P \rho_G L_s (1-H_s) + A_P \rho_G L_f (1-H_f)]_{\phi} \quad 3.22$$

Combinando ecuaciones 21 y 22 da:

$$(L_s)_{\phi} = \frac{\alpha}{(1-H_f)_{\phi} \left[ \frac{\beta \cdot (H_s v_s)}{(H_f v_f)_{\phi} - \beta} \right] + (1-H_s)} \quad 3.23$$

Donde

$$\alpha = [L_s (1-H_s) + L_f (1-H_f)]_{\phi=0}$$

Y

$$\beta = \left[ \frac{L_s H_s v_s + L_f H_f v_f}{L_s + L_f} \right]_{\phi=0}$$

A notar, las únicas variables que cambian con la inclinación son las variables de la capa,  $H_f$  y  $v_f$ . Estos pueden ser calculados usando los métodos de equilibrio de capa descritos anteriormente. Para este trabajo, el método de capa de equilibrio 1 es usado para predecir  $H_{fe}$  y  $v_{fe}$ .

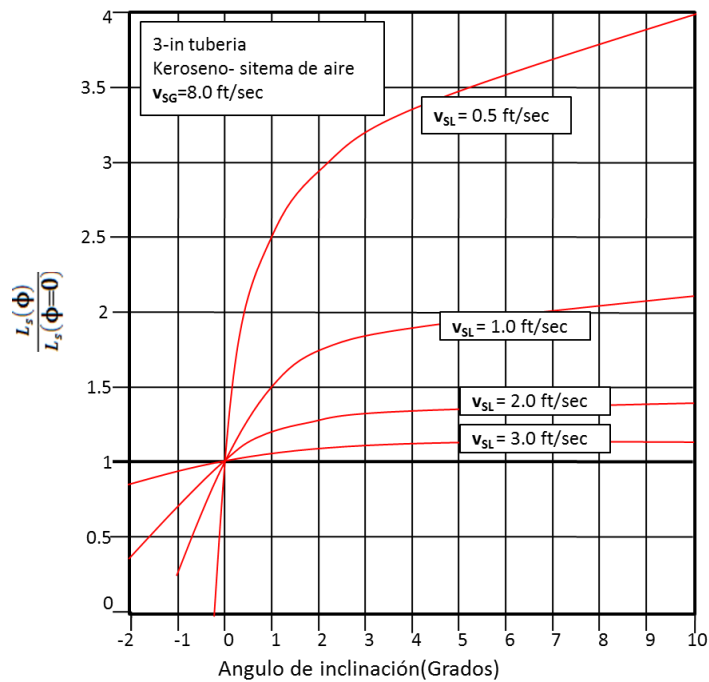


Fig. 21 Efecto del terreno en la longitud del tapón.

La figura 21 muestra el efecto del ángulo de inclinación en la longitud del tapón para un sistema de aire keroseno de 3 pulgadas. Como es mostrado, cuando un tapón viaja de un segmento del ducto horizontal a un segmento inclinado hacia arriba, la longitud del tapón tiende a incrementarse. Cuando un tapón se encuentra un segmento inclinado hacia abajo, la longitud del tapón tiende a disminuir drásticamente. También, conforme  $v_{SL}$  aumenta, y las tasas se mueven hacia el centro del patrón de flujo bache, el efecto de inclinación en la longitud del tapón es reducido.

Por medio de la combinación de este modelo local de terreno con una definición para longitud mínima estable del tapón (comúnmente asumido a ser  $16d$ ), efectos del terreno globales en la distribución de la longitud del tapón pueden ser predichos. Comenzando con una distribución de longitud del tapón inicial Gaussian, una sección con inclinación hacia abajo resulta en un decremento en la longitud del tapón, causando algunos tapones a disminuir en tamaño menor a la mínima longitud estable de tapón. Estos tapones se disiparán conforme viajen a través de la sección hacia abajo del ducto y se unirán con otros tapones, así cambiando la longitud del tapón en la distribución hacia arriba. Esto indica que las secciones inclinadas hacia abajo actúan como filtros que pueden eliminar los tapones más pequeños y producen el efecto global de incrementar la longitud de tapón promedio.

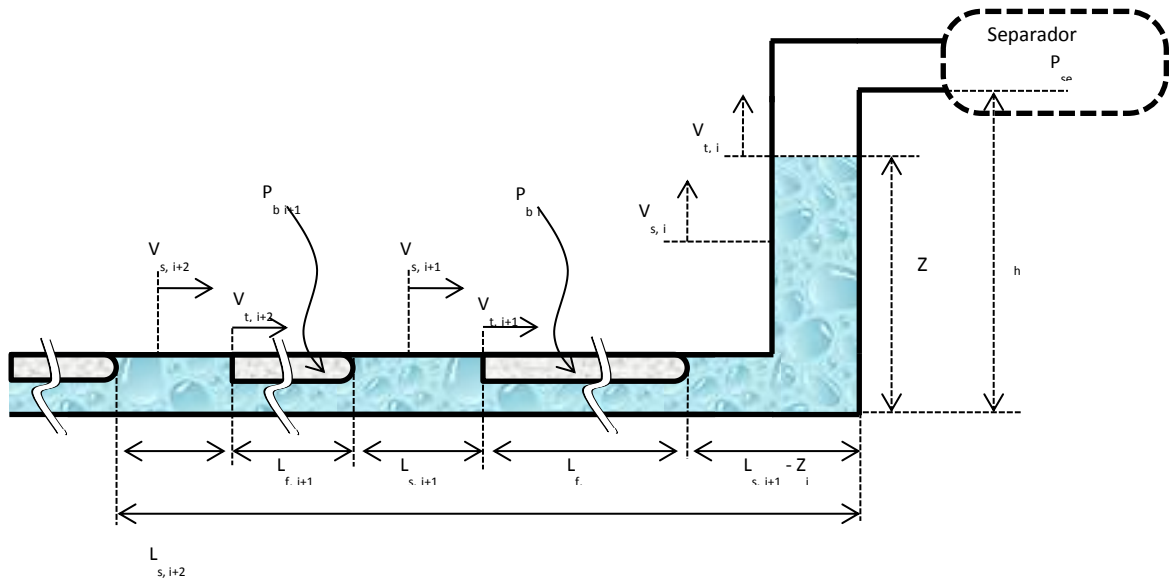
## CAPITULO 4 MODELO TRANSITORIO DE FLUJO BACHE

### 4.1 Configuración del sistema

La configuración del problema analizado se muestra en la figura 16. Se trata de un sistema compuesto por una línea horizontal, un tramo vertical ascendente y un separador de tres etapas, por el que fluye una mezcla bifásica gas-líquido.

La mezcla bifásica, constituida por agua y aire, ingresa en la entrada de la línea horizontal y circula a lo largo del sistema hasta llegar al separador trifásico situado en el extremo de salida. En algún punto alejado de la base del tramo ascendente vertical, el flujo experimenta una transición y adquiere el patrón de flujo intermitente. La formación de estos tapones puede deberse a la hidrodinámica del flujo, al perfil de la línea, o algún otro mecanismo.

El conducto vertical se encuentra conectado a un tramo horizontal de salida que conduce el flujo a un separador localizado a su misma altura. Dicho separador se diseñó para mantener una presión constante en su interior durante el ciclo operativo (a pesar de las variaciones volumétricas instantáneas producidas por la intermitencia del flujo). Los flujos de masa de ambas fases se conocen y permanecen constantes durante la operación.

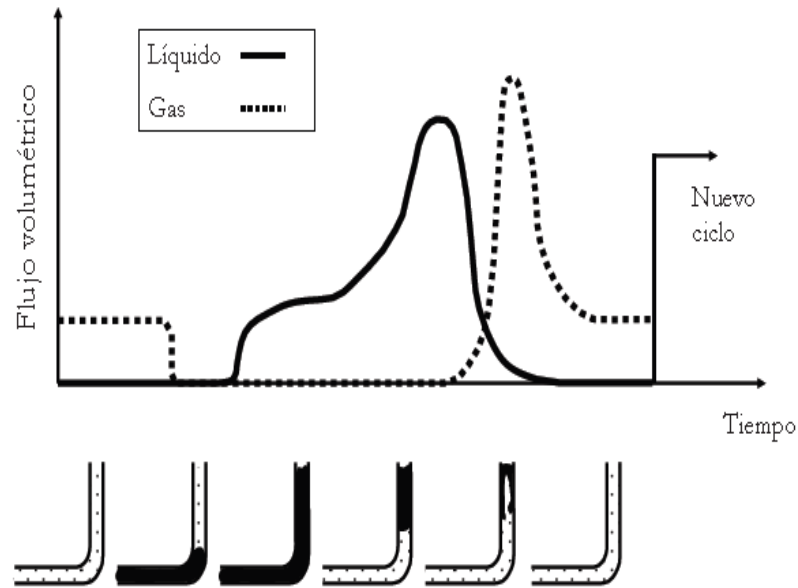


**Fig. 22 Configuración del sistema de transporte y configuración del flujo.**

Inicialmente se disipan los pequeños tapones formados cerca de la entrada y coaligan con otros tapones vecinos dando lugar a estructuras más estables y de mayor tamaño. Mientras el crecimiento de los tapones recién formados disminuye, sus velocidades se incrementan considerablemente debido a las variaciones de la presión en el interior de las burbujas que se encuentran detrás de ellos. La presencia del tramo vertical naturalmente afecta el desplazamiento de los tapones pues ocasiona una sobre presión adicional. Se observa el avance de los tapones hasta llegar al tramo vertical, donde comienza su ascenso al separador. A la secuencia tapón burbuja se le ha denominado “unidad de taponamiento”. En la presente formulación ampliamos este concepto para incluir a la película de líquido que acompaña a las burbujas.

La circulación de las unidades de taponamiento ocasiona una variación local intermitente de los gastos como se muestra en la figura 17 queda claro que el estado

transitorio del flujo promueve la aparición de picos importantes en el gasto de ambas fases.



**Fig. 23 Flujos volumétricos en el tramo ascendente vertical (BP, Forties Manual)**

La fuerza motriz que impulsa a las unidades de taponamiento se debe a la diferencia de presiones que existe entre las caras anterior y posterior de los tapones. En la interfase líquido-pared se encuentran permanentemente las fuerzas activas de fricción, principales responsables de la disipación de energía. Las pérdidas irreversibles en la fase gas-pared son mucho menores que las anteriores y simplemente se pueden ignorar.

La influencia externa más importante, es la acción gravitatoria sobre el flujo. La fuerza de gravedad actúa sobre aquella porción del líquido que se encuentra en la

sección vertical. Cuando se alcanza la máxima carga hidrostática, la energía cinética inicial de los tapones, puede ser insuficiente para superar el tirón gravitacional, debido a la desaceleración súbita de la unidad de taponamiento cuando entra en la tubería ascendente vertical. En estas circunstancias, puede oscilar un tapón dentro del tubo vertical hasta que el incremento de presión en la burbuja que lo impulsa lo obliga a ascender.

#### 4.2 Modelado de flujo en la línea horizontal

La ecuación de conservación de cantidad de movimiento para el i-ésimo tapón que se mueve en la tubería horizontal puede expresarse de la siguiente manera:

$$\rho_L H_{s,i+1} L_{s,i+1} \frac{dV_{t,i+1}}{dt} = (P_{b,i+1} - P_{b,i}) - g \rho_L H_{s,i+1} L_{s,i+1} \text{sen} \beta_{i+1} - \frac{2f_{TP,i+1} \rho_L H_{s,i+1} L_{s,i+1} V_{t,i+1}^2}{D_{int}} \quad 4.1$$

La posición del tapón en la tubería se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{dx_{i+1}}{dt} = V_{t,i+1} \quad 4.2$$

En la ecuación 4.1 es necesario determinar la longitud de los tapones, así como la fracción volumétrica de líquido en ellos. Para tal efecto, se utiliza la correlación de Scott et al.

$$\ln(L_s) = -25.41 + 28.5(\ln d)^{0.1} \quad 4.3$$



Las ecuaciones de  $L_s$  y  $d$  están expresadas en [pies] y  $V_{s,i}$  en [m/s]. Por otra parte la velocidad del frente del tapón ( $V_t$ ) se obtiene mediante la correlación de Nicholson et al.:

$$V_{t,i+1} = C_o V_{s,i+1} + V_d \quad 4.4$$

La velocidad de deriva se puede determinar por la ecuación de Benjamín (1968)

$$V_d = 0.54 \sqrt{g D_{int}} \quad 4.5$$

Sin embargo de acuerdo con muchos estudios  $V_d = 0$  para tuberías horizontales.

El colgamiento del líquido en el cuerpo del tapón se calculó por la correlación de Gregory et al. (1979).

$$H_{s,i} = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{s,i}}{8.66}\right)^{1.39}} \quad 4.6$$

La variación de la presión con respecto al tiempo en las burbujas, se obtiene al derivar la ecuación de estado y sustituir en ella la ecuación de conservación de la masa. De este modo, la presión en la  $i$ -ésima burbuja está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{dp_{b,i}}{dt} = \frac{V_{s,i+1} - V_{s,i}}{X_i - X_{i+1} - L_{s,i}} P_{b,i} \quad 4.7$$

### 4.3 Modelo de flujo en la tubería ascendente vertical

La ecuación de la cantidad de movimiento para el i-esimo tapón del líquido en la tubería ascendente vertical puede expresarse como sigue

$$\rho_L H_{s,i} L_{s,i} \frac{dV_{s,i}}{dt} = (P_{b,i+1} - P_{b,i}) - g \rho_L H_{s,i} Z_i - \frac{2f_{tp,i} \rho_L H_{s,i} L_{s,i+1} V_{s,i}^2}{D_{int}} \quad 4.8$$

Se asume que tanto el cuerpo como el frente del tapón se mueven a la misma velocidad:

$$\frac{dZ_i}{dt} = V_{t,i} \quad 4.9$$

Para el cálculo del factor de fricción se recurre a la correlación de McAdams et al (1942).

$$f_{tp,i} = f_{l,i} \left[ 1 + x \frac{(v_g - v_l)}{v_l} \right] \left[ 1 + x \frac{(\mu_l - \mu_g)}{\mu_l} \right]^{-1/4} \quad 4.10$$

Donde el factor de fricción del líquido se calcula con la ecuación de Silvestre (1987):

$$f_{l,i}^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{2\varepsilon/D_{int}}{3.7} - \frac{5.02}{Re_i} \log \left( \frac{2\varepsilon/D_{int}}{3.7} - \frac{13}{Re_i} \right) \right] \quad 4.11$$

#### 4.4 Condiciones de inicio

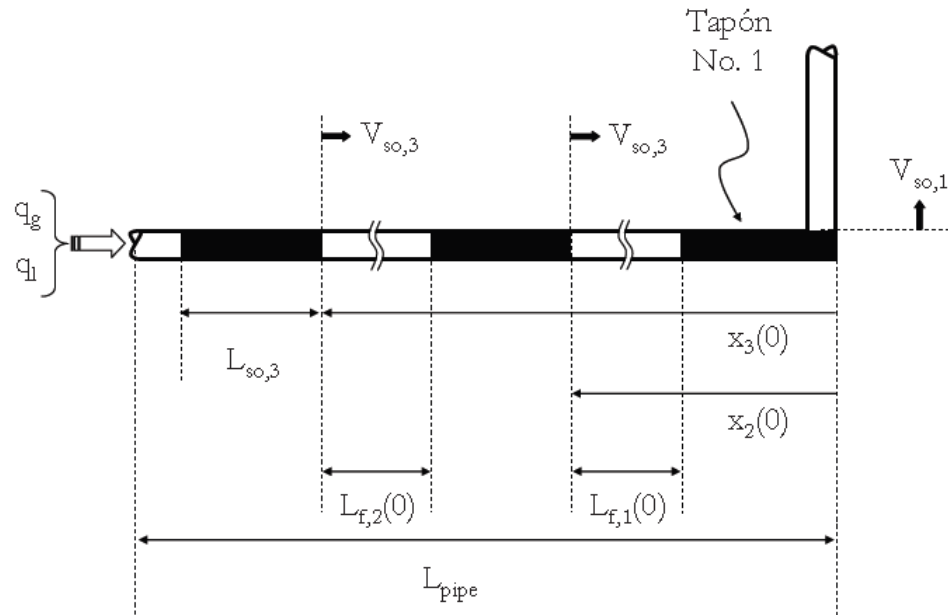


Fig. 24 Condiciones iniciales del sistema

Para la determinación de las condiciones de inicio, se asumieron las siguientes consideraciones:

- El frente del tapón se ubica en la entrada de la base del “tubería ascendente vertical”.
- Todos los tapones del líquido se desplazan a la misma velocidad
- La distribución inicial de presión se calculó con la ecuación 1.1, suponiendo nulo el término de aceleración.
- Como condición de frontera a la salida del “tubería ascendente vertical” se estableció una presión constante en el separador.

- La velocidad y frecuencia de los baches a la entrada de la sección de prueba correspondieron a los gastos de flujo de entrada de gas y líquido.

#### 4.5 Condiciones iniciales y de frontera

Se considera que el sistema tiene tres tapones, con sus respectivas burbujas, en el interior de la línea horizontal. Dichos tapones están distribuidos uniformemente a lo largo del tubo y el primero de ellos se localiza en el tramo ascendente vertical.

Las longitudes de las burbujas se definen en función de las posiciones relativas de los tapones a lo largo de la línea. Las unidades de taponamiento empiezan a desplazarse con velocidades cercanas a la velocidad promedio estimada para este régimen de flujo.

$$v_{s,i} = v_{so} = v_m \quad 4.12$$

Donde  $V_m$  es la velocidad de la mezcla  $v_m = v_{sl} + v_{sg}$ . Por otra parte, el colgamiento en el cuerpo de los tapones se calcula con base en una correlación, este valor se mantiene fijo para tiempos mayores posteriores. El colgamiento de la película líquida se calcula en cada paso iterativo; a esta variable se le asigna un valor constante al inicio.

$$H_{f,i} = H_{fo} \quad 4.13$$

En la entrada de la línea se establecen los flujos volumétricos constantes para el gas y el líquido que conforman la mezcla bifásica.

$$q_g = Av_{sg} \quad 4.14$$

Y

$$q_l = Av_{sl} \quad 4.15$$

Es importante subrayar que las condiciones de frontera permanecen constantes durante la integración numérica. No obstante, los flujos de masa y la presión en los separadores de sistemas reales varían continuamente con el tiempo. Más aun, los pulsos de presión generados por el movimiento de los tapones modifican los gastos y presiones en las fronteras del sistema. Por lo tanto un modelo debe incluir las posibles variaciones de estos parámetros a fin de mejorar las predicciones de las simulaciones.

#### **4.6 Método numérico**

La implementación del algoritmo numérico requiere de la consideración de dos aspectos, por un lado existe el problema de modelar el proceso de la operación del sistema físico, y por otro, existe el problema de cumplir las leyes de conservación. Así mismo se tiene la dificultad técnica asociada a la integración numérica del sistema simultáneo.

En primer lugar es preciso establecer el ciclo de formación y expulsión de los tapones y burbujas. Este proceso debe estar completamente vinculado a las

condiciones definidas en las fronteras del sistema a fin de no violentar las leyes fundamentales. En este sentido, los flujos máxicos se subordinan a los flujos máxicos promedio de entrada.

El proceso de creación y expulsión también debe ser compatible con las presiones en las fronteras. Evidentemente, la presión en el interior de la burbuja en la entrada debe ser superior a la presión dentro del separador, ya que, de lo contrario habría una inversión del signo de gradiente de presión. Para efectos de la elaboración del modelo numérico, conviene expresar un sistema simultáneo de  $3N$  ecuaciones diferenciales, en su forma normal:

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = f_i(t, y_1, y_2, \dots, y_{3N}), i = 1, 2, \dots, 3N \quad 4.16$$

Las condiciones iniciales y de frontera son:

$$y_1(t)_{t=0} = y_{1,0}, y_2(t)_{t=0} = y_{2,0}, \dots, y_{3N}(t)_{t=0} = y_{3N,0} \quad 4.17$$

El sistema (4.16) se integró junto con las condiciones (4.17), mediante el método de Runge Kutta de cuarto orden. Se prefirió este método sobre otros por su exactitud, rapidez de convergencia, robustez frente a variaciones de los integrados, flexibilidad para el ajuste del paso temporal, y sencillez para la programación.

El método numérico de Runge Kutta (1900) se emplea para la solución de ecuaciones diferenciales ordinarias de la forma:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \quad 4.12$$

## **CAPÍTULO 5 Comparación de datos experimentales con las predicciones del modelo**

A continuación se explica la instalación experimental donde los datos obtenidos por Vázquez Morín (2008) y el modelo matemático propuesto por Guzmán y Fairuzov (2007), se representan como una instalación experimental a escala de una instalación costa afuera típica, compuesta de una tubería horizontal, una sección tubería ascendente vertical, un separador y una sección de tubería horizontal conectada a la salida de la tubería ascendente vertical con la entrada del separador.

Dicha instalación permite fluir simultáneamente aceite, agua y aire. Para el suministro de los líquidos se emplean dos bombas de cavidades progresivas (PCP), adicionadas mediante motores eléctricos trifásicos, cada una de las cuales se opera mediante un controlador de frecuencia variable, lo cual permite cambiar la velocidad de rotación para tener control sobre el gasto de cada líquido manejado. Vázquez Morín empleó únicamente agua y aire en sus experimentos. Para la inyección del gas, en este caso aire, se cuenta con un compresor conectado a un tanque acumulador de alta presión de 1,500 litros de capacidad, desde el cual se lleva el flujo al punto de entrada de fluidos mediante una tubería de PVC cedula 80, de diámetro nominal 0.0508 metros (2 pulgadas de diámetro). Para suministrar el gas (aire) en la base de la tubería vertical, se empleó una tubería de PVC cedula 80, de diámetro nominal 0.0381 metros (1 pulgada y media de diámetro). El separador trifásico tiene una capacidad de 3,000 litros (3 metros cúbicos), el cual se utiliza para separar la mezcla de los fluidos, pudiendo

descargar los líquidos a los tanques almacenadores de 2.8 metros cúbicos cada uno, o en su caso enviarlo a la succión de la bomba PCP correspondiente. El aire separado se envía a la atmosfera a través de una válvula instalada en la parte superior del tanque.

A continuación se muestra esquemáticamente la instalación que simula una instalación de separación costa afuera.

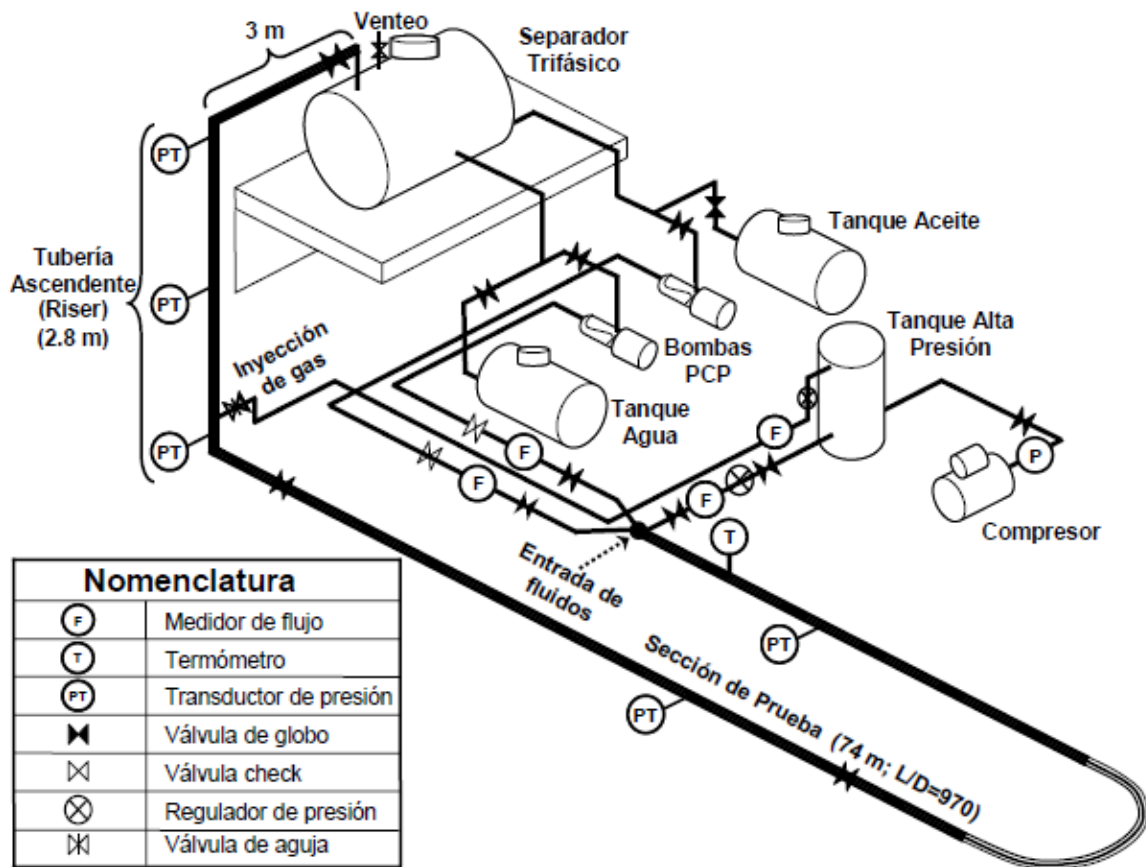


Fig. 25 Instalación experimental con inyección de gas en la base de la tubería ascendente vertical

Inicialmente los pequeños tapones se forman en la entrada de la base de la base de la tubería ascendente vertical con otros tapones vecinos dando lugar a estructuras



más estables y de mayor tamaño. Mientras que la tasa de crecimiento de los tapones recién formados disminuye, sus velocidades se incrementan considerablemente debido a las variaciones de la presión en el interior de las burbujas que se encuentran detrás de ellos. La presencia del tramo vertical ascendente afecta directamente el desplazamiento de los tapones pues ocasiona una sobre presión adicional.

El avance de los tapones llega hasta el tramo vertical, donde inicia el ascenso al separador. La unidad de taponamiento se denomina así por el tapón-burbuja formado. En la presente formulación se amplió este concepto para incluir la película de líquido que acompaña a las burbujas. La circulación de las unidades de taponamiento ocasiona una variación local intermitente. Queda claro que el estado estacionario del flujo promueve la aparición de importantes picos en el gasto de ambas fases.

La fuerza que impulsa a las unidades de taponamiento, se debe a la diferencia de presiones que existe entre las caras anterior y posterior de los tapones. En la interfase líquido-pared se encuentran permanentemente activas las fuerzas de fricción principales responsables de la disipación de energía. Perdidas irreversibles en la interfase gas-pared, son mucho menores que las anteriores y que se pueden ignorar. Una influencia externa importante es la acción gravitatoria sobre el flujo (las masas de líquido). Esta fuerza de gravedad actúa sobre aquella porción de líquido que se encuentra dentro de la sección vertical. Esto causa una desaceleración súbita de la unidad de taponamiento, cuando la máxima carga hidrostática es alcanzada la energía cinética inicial (de los tapones) puede ser insuficiente para superar la gravedad (en algunos casos esta velocidad puede ser negativa).

En estas circunstancias, un tapón puede oscilar dentro del tubo vertical hasta que el incremento de presión en la burbuja que lo impulsa lo obliga a ascender. La descarga de los tapones se debe a la combinación de dos procesos cuya manifestación externa es el disparo de los remanentes del líquido hacia el separador. El primero de ellos se debe a la rápida disminución de la carga hidrostática; el segundo se debe a la presión remanente en las burbujas de gas (generada durante el ascenso del tapón).

También tienen lugar fuertes pérdidas de fricción ocasionadas por la rápida expansión del gas que impulsa el tapón fuera del sistema. Particularmente durante los últimos instantes de la fase gaseosa fluye con elevadas velocidades superficiales y fragmenta el cuerpo del tapón. En este punto la fase líquida se comporta como una obstrucción para el gas que tiende a rebasarlo rápidamente y generando enormes esfuerzos cortantes en la interfase. La suma de los procesos anteriores induce a la propagación de ondas de presión a través del sistema hasta alcanzar la entrada al conducto horizontal; eventualmente, estas ondas repercuten adversamente en las condiciones que allí prevalecen. Sin embargo la inyección del gas en la base de la tubería vertical ascendente simplifica (sin eliminar totalmente) las pérdidas irreversibles y los golpes a la tubería en las instalaciones petroleras.

Los datos experimentales fueron obtenidos de un flujo bache en el cual la longitud del líquido del tapón era más grande que la altura de la tubería ascendente vertical. Un modelo mecanístico transitorio modela este fenómeno y lo desarrolla. Los resultados se obtuvieron con las predicciones del modelo y los datos experimentales. La simulación de un flujo bache en un sistema de producción costa fuera con gran

diámetro en la tubería se utiliza para el desarrollo del modelo. La simulación revela que la longitud de los tapones hidrodinámicos puede acelerar la velocidad en la tubería ascendente vertical cinco veces más que la velocidad del tapón en la tubería. Este hecho se puede tomar en cuenta para el desarrollo de estrategias para operar los sistemas de producción.

Como se ha comentado con anterioridad el flujo bache es un problema común en la operación de las instalaciones de producción ya sea costa fuera o en tierra. El flujo bache se genera en las tuberías horizontales que transportan un flujo multifásico, los cuales acarrearán problemas en la operación de separación en la plataforma de producción. Por lo que la variación del flujo es tan alta en la entrada de la primera etapa de separación, que esta misma baja la eficiencia de separación, pone fuera los compresores, daña el interior del separador, se envía una gran cantidad de gas a quemador, entre otros.

Aunque se haya realizado un considerable avance para entender el fenómeno del flujo bache en las tuberías, aún hay importantes problemas que no se han resuelto. Correlaciones y modelos se han desarrollado para predecir el flujo bache normal (hidrodinámico) en las tuberías horizontales (longitud del tapón, velocidad, colgamiento del líquido) basándose en datos experimentales o de campo. Otros estudios se han concentrado en el modelado del bacheo severo (bacheo inducido por las condiciones de terreno) en sistemas de tubería horizontal y *ascendente vertical*. El bacheo severo es un fenómeno que ocurre en sistemas de producción costa fuera, en el fondo del mar, con tubería inclinada, donde la tubería que transporta un flujo multifásico esta

conectado a la tubería ascendente vertical *tubería ascendente vertical*. El patrón de flujo estratificado se encuentra en la entrada de la base de la tubería ascendente vertical, el líquido se acumula en la base de la tubería ascendente vertical y bloquea la sección transversal de la tubería; como resultado, se genera un tapón largo de líquido considerado como un bache de líquido. El gas se comprime tanto que al paso del tiempo este desplaza al tapón de líquido formado hacia el separador. Sin embargo, en muchos sistemas de tuberías *tubería ascendente vertical*, el flujo bache se forma en la tubería horizontal.

Con el cambio de la dirección de flujo, las características de las fases son significativamente diferentes en la tubería ascendente vertical. Miyoshi et al., desarrollaron un modelo hidrodinámico en un sistema costa fuera que consiste de una tubería, una tubería ascendente vertical, y un separador recuperador de baches. Basados en ese modelo, estudiaron la influencia de la longitud del tapón y de la altura de la tubería ascendente vertical en el sistema de tubería horizontal *tubería ascendente vertical* (se enfocaron en los flujos de gas y líquido en la entrada y salida del separador). Schmidt et al. estudiaron experimentalmente un flujo tipo bache en un sistema tubería horizontal *tubería ascendente vertical* de dos pulgadas, en el cual el sistema de altura de la tubería ascendente vertical es mucho más grande que la longitud del flujo bache. En el experimento el separador se colocó la misma altura que la tubería horizontal, por lo que este método es menos práctico. También, la tubería ascendente vertical se conectó al separador usando una tubería bajante de aguas, así que la presión de salida de la tubería ascendente vertical no estaba controlada.

En tuberías con diámetros de veinticuatro a cuarenta y ocho pulgadas son usualmente encontrados en instalaciones de producción costa afuera las cuales transportan un aceite con una relación gas aceite mayor a de 500 scf/STBO. Una técnica para disminuir los problemas causados por el flujo bache, es comúnmente usada por los operadores, incrementan la presión (lo cual reduce la velocidad superficial del gas) en la tubería para producir la transición de un flujo estratificado a un flujo burbuja. Esto se realiza por medio de una válvula que estrangula el flujo en la salida de la tubería ascendente vertical. Por lo que se incrementa la presión en la tubería afectando así una disminución de producción y afectando directamente las condiciones del yacimiento, esto hace que los pozos fluyan a condiciones menores por el estrangulamiento del flujo.

Un método atractivo para incrementar el ritmo de producción, es disminuir la presión en la tubería, en particular en yacimientos maduros. Los tapones hidrodinámicos en las tuberías de gran diámetro pueden ser muy grandes ( $L_s > H_r$ ). El flujo bache produce a su vez vibraciones en la tubería, hasta la planta procesadora de gas y líquido en la plataforma. Por lo que se necesita un análisis exacto para la dinámica de los fluidos en los sistemas que tiene que ser con el desarrollo de un método adecuado. En particular, el ritmo del flujo y las variaciones de presión en el sistema se deben estudiar antes de tomar la decisión de abrir o cerrar la válvula de estrangulamiento.

En este trabajo, se ha estudiado teórica y experimentalmente el flujo bache normal en un sistema de tubería horizontal *tubería ascendente vertical*. En particular, se

investigó el efecto de cambio en la dirección del flujo la tubería ascendente vertical en el flujo bache hidrodinámico en el sistema. Datos para el flujo tapón con longitudes mayores ( $L_s > H_r$ ) se obtuvieron usando una instalación experimental. El modelo propuesto por Miyoshi et al. fue extendido para simular la longitud de los baches hidrodinámicos (normales). El modelo fue usado para simular el flujo bache en un sistema de producción con el diámetro de la tubería grande.

El problema que se examina, se muestra en la figura 1. El sistema consiste de una tubería horizontal y otra vertical *tubería ascendente vertical* conectada a un separador. Las longitudes de los tapones generados en la tubería horizontal, son más largos que la altura de la tubería ascendente vertical y la presión del separador es constante. El gas y el líquido a la entrada de la tubería también son constantes. Las ecuaciones que gobiernan son aplicadas a los tapones de líquido y a las burbujas de gas en la aproximación de la tubería ascendente vertical. De acuerdo con la figura 1, las posiciones de los tapones en la tubería hacen referencia a la base de la tubería ascendente vertical.

El modelo mecánico para simular el flujo bache en la tubería se basa en lo siguiente:

- Conservación de masa y conservación de movimiento se aplican para los tapones de líquido.
- Conservación de masa para las burbujas de gas.
- Ecuación de estado para la fase gaseosa.

- Relaciones constitutivas para el cálculo del flujo tapón (colgamiento del líquido en el cuerpo del tapón. Longitud del tapón, velocidad de frente del tapón, y el coeficiente de fricción en las dos fases de la zona del tapón)

Se hace mención que los experimentos desarrollados por Vázquez Morín (2008) cumplen con la condición de que la longitud de los tapones de líquido fuera mayor a la altura de la tubería ascendente vertical ( $L_s > H_r$ ). Los resultados de estos experimentos, se transportaron al mapa de patrones de flujo de Taitel y Dukler para definir el patrón de flujo; efectivamente todos cumplen con el flujo tipo intermitente. En la serie de experimentos, se considera como casos especiales aquellos en que el flujo bache se presenta sin alteraciones externas (inyección del gas igual a cero), ya que su análisis y comparación con el resto de los experimentos puede evidenciar aspectos claves del efecto de la inyección del gas. Se hace evidente que el bache cuando pasa a través de la tubería ascendente vertical, y debido a la fuerza gravitatoria disminuye la velocidad a la entrada de la tubería ascendente vertical.

Los cálculos de las velocidades de tapón y de la burbuja, se calcularon de acuerdo a filmación realizada en el trabajo de investigación. Estos cálculos hechos por inspección visual son los que se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 1 Condiciones experimentales**

Experimento	CONDICIONES DEL EXPERIMENTO					PARÁMETROS PROMEDIO TUBERÍA			
	$Q_{liq}$	$Q_g$	$T_f$	$P_{iny}$	$Q_{gi}$	$V_{S(P)}$	$L_{S(P)}$	$V_{BF(P)}$	$L_{B(P)}$
	(lt/s)	(lt/s)	( C )	(psig)	(lt/s)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)
2a	1.78	15	16.5	70	0.00	6.495	3.767	6.048	27.225
3a	1.78	10	17	70	0.00	5.822	3.548	5.22	26.262
4a	1.78	5	15	70	0.00	3.479	3.696	3.061	12.54
5a	1.78	1.67	16.5	70	0.00	1.893	3.719	1.897	6.284

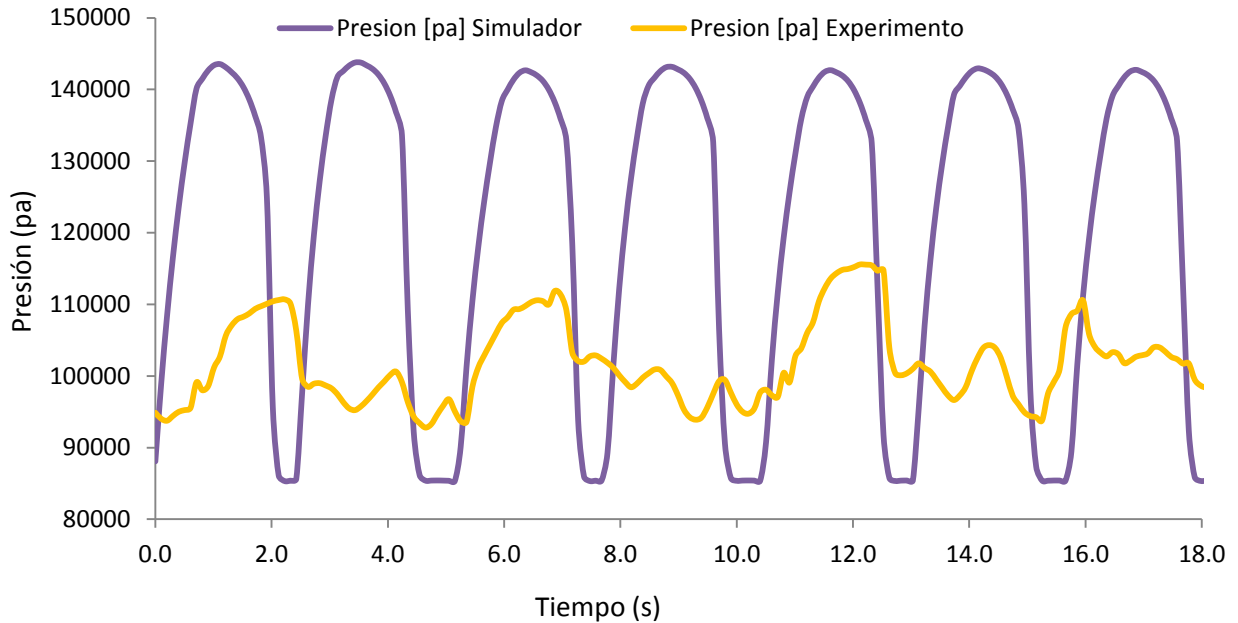
Los experimentos se clasifican de acuerdo al flujo volumétrico del gas y del líquido como se indica en la tabla anterior. Para el interés particular de esta investigación se analizarán las propiedades de la longitud del tapón líquido así como la burbuja de gas en el sistema; para simular los resultados propuestos, se utilizará el modelo matemático propuesto por Guzmán y Fairuzov (2007).

### 5.1 Simulación del experimento 2a

La validez y limitaciones del modelo fueron determinadas mediante la comparación directa entre los resultados experimentales y lo expresado matemáticamente a través del programa. En este caso se analiza el experimento 2a en el cual se omite la inyección del gas en la base de la tubería ascendente vertical.



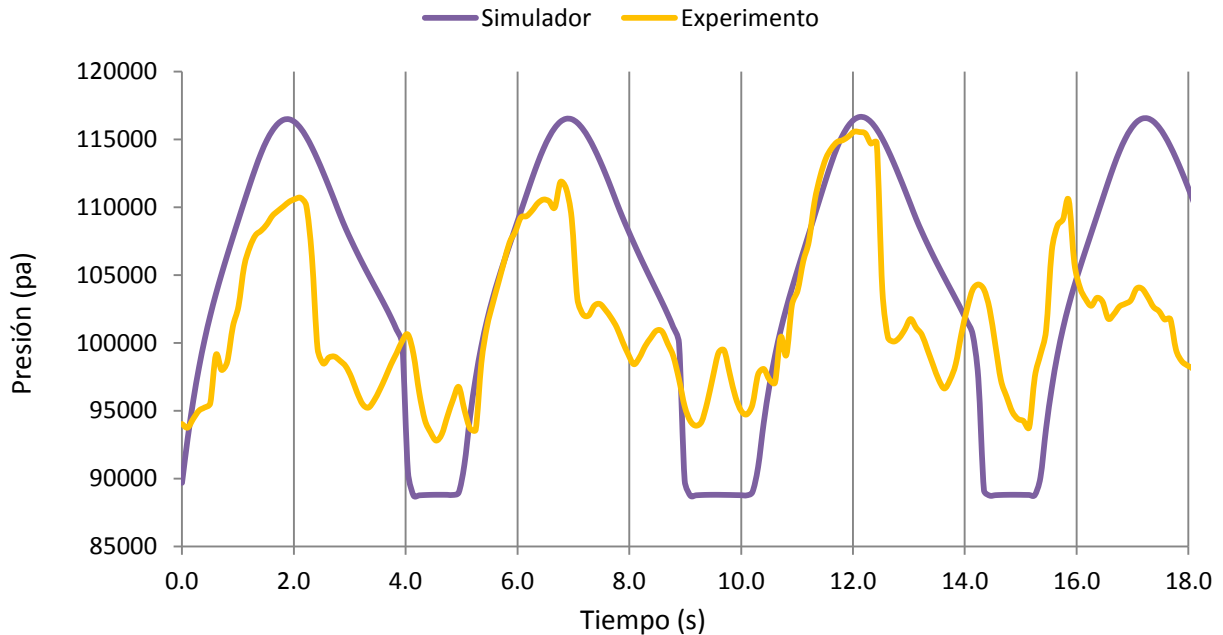
La superposición de las curvas de presión producidas por la simulación y por el experimento se muestra en la siguiente figura:



**Fig. 26 Comparación de datos experimentales con predicción del modelo.**

Los flujos volumétricos con los que se efectuaron las series experimentales, se definen en una región con patrón intermitente. Se observa claramente que las altas velocidades del tapón expresadas en la tabla 1, afectan directamente a la cola del tapón en ascenso, por lo que provoca una inestabilidad y desprendimiento de estas. Este efecto

se manifiesta como un cambio local del patrón del flujo en el cuerpo de tapones largos<sup>4</sup>. En la figura 19 y 20 se distingue el frente y cola del tapón, los cuales se representan a la entrada del separador y salida, figura 20.



**Fig. 27 Comparación de datos experimentales con predicción del modelo.**

Esta serie experimental es la que corresponde al flujo de tapones largos, debido a las velocidades de los flujos (líquido gas) que son muy altas. Desde el punto de vista de la validación, éste es el resultado de mayor interés puesto que el modelo ha sido desarrollado para representar un flujo con estas características. La sincronía entre ambas

<sup>4</sup> Se refiere a tapones largos cuando cumplen la condición  $L_s > H_r$

secuencias disminuye a causa de la magnificación de las inestabilidades en la interfase. Aproximadamente a 15 segundos hay una ruptura del tapón, que asciende al separador produciendo menos presión hidrostática en la columna vertical. Esto viene acompañado por el corrimiento del tiempo y un eventual restablecimiento de la frecuencia y amplitud.

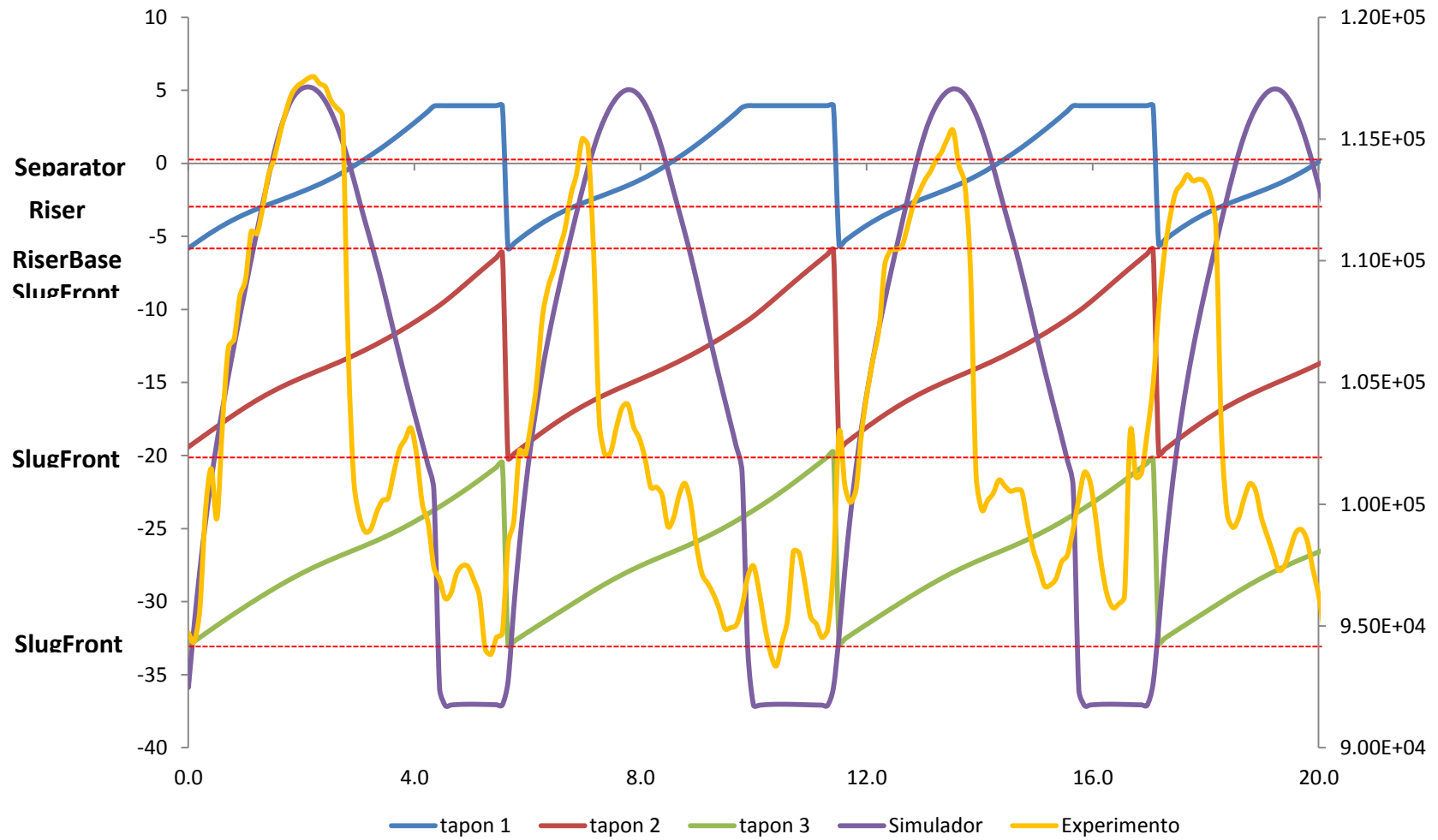
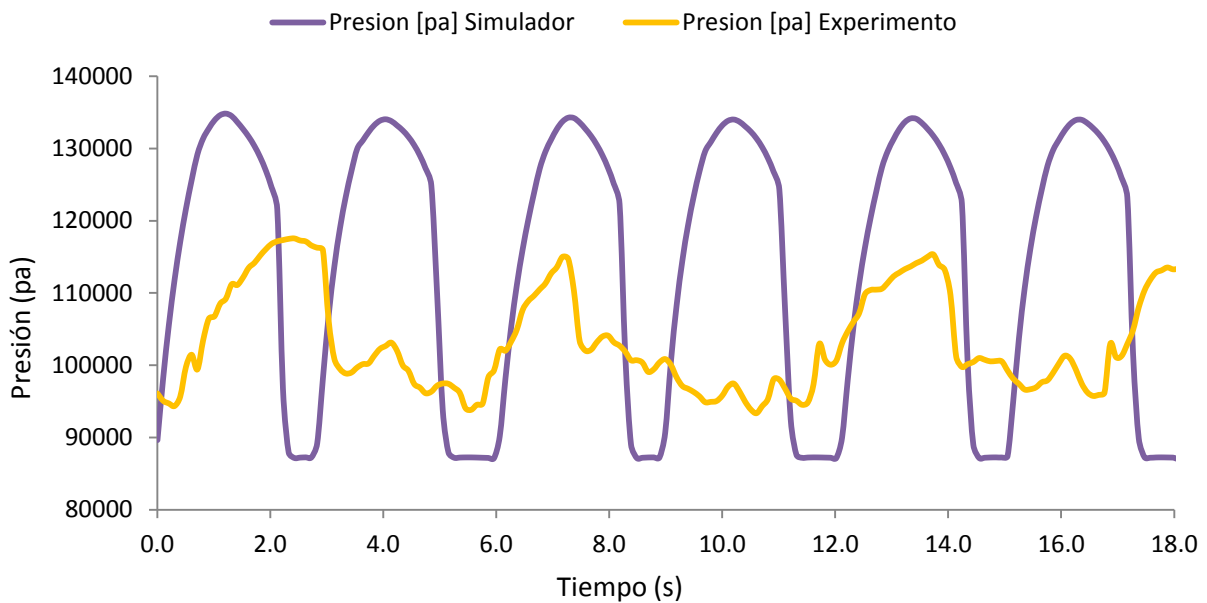


Fig. 28 Seguimiento del flujo bache desde la tubería horizontal hasta el separador.

En la figura 28 se demuestra cómo opera la simulación con los datos experimentales arrastran al flujo bache hasta el final de la tubería vertical ascendente.

### 5.2 Simulación del experimento 3a

En el experimento 3a, el flujo de gas es menor que en el experimento 2a, sin embargo con los resultados expuestos, al simular el proceso, éste arroja valores muy alejados de lo real. De acuerdo a la siguiente figura,



**Fig. 29 Comparación de datos experimentales con predicción del modelo.**

En esta simulación se observa una amplitud semejante al experimento, sin embargo el efecto de desprendimiento de los tapones largos, se vuelve a presentar tal y como se muestra en la figura 29.

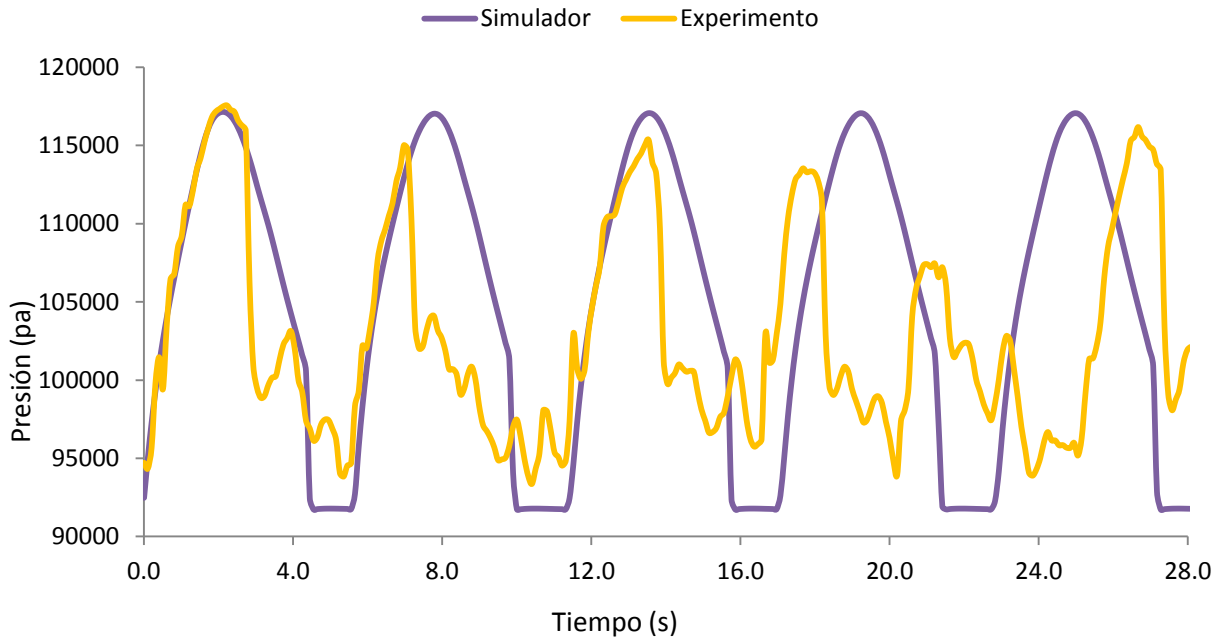
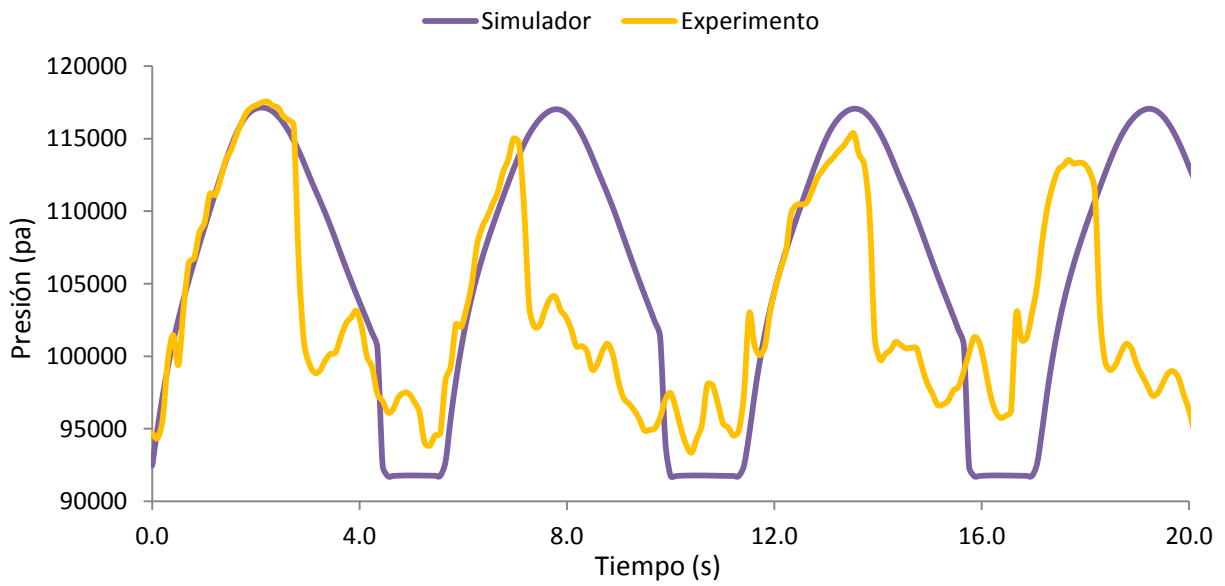


Fig. 30 Comparación de datos experimentales con predicción del modelo.



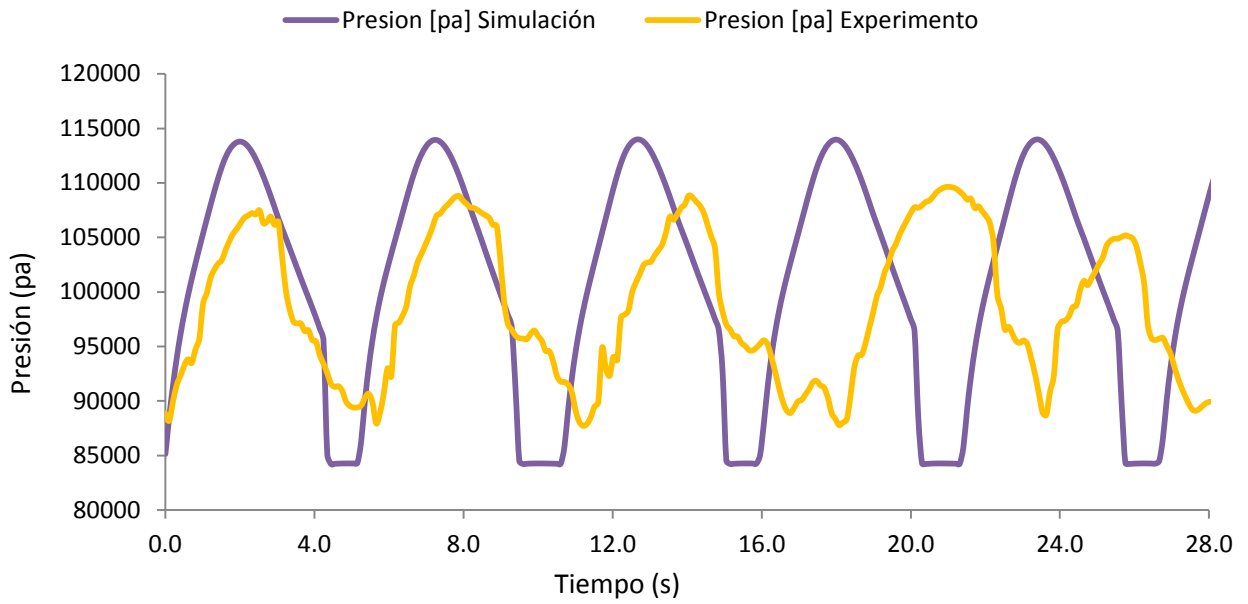
**Fig. 31 Comparación de datos experimentales con predicción del modelo**

En este experimento la correspondencia entre ambas curvas es sensiblemente menor en presencia de tapones más largos. La pérdida de sincronía ocasionada por un tapón cuya longitud es menor que la del resto en el sistema. La notable discrepancia entre las curvas se debe a que la distribución de longitudes es menos compacta. El crecimiento irregular y el desprendimiento de porciones importantes de las colas de los tapones suelen ser las causas comunes de las anomalías. En términos generales, el movimiento del tapón largo en el sistema se traduce en una variación de la presión y en un corrimiento de la fase de la señal. Los picos secundarios de presión, son consecuencia del desprendimiento de las colas del tapón.

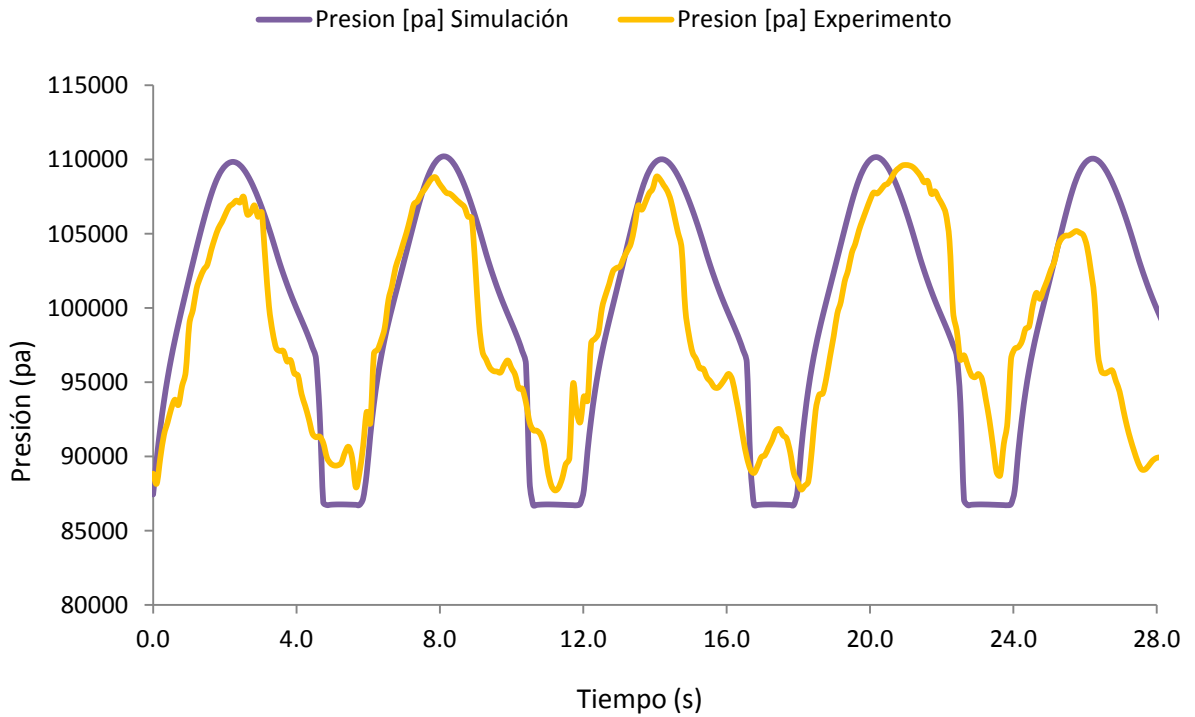
Se ha visto también que estos efectos se van magnificando conforme aumenta el tamaño de los tapones. Sin embargo, es muy importante recalcar que al igual que en el caso de los tapones cortos, la regularidad del ciclo tiende a restablecerse.

### **5.3 Simulación del experimento 4A**

En este experimento la simulación se asemeja mucho a los datos experimentales, los cuales debido a las condiciones del flujo se han ajustado correctamente. La figura 25 asemeja muy cercanamente los valores.

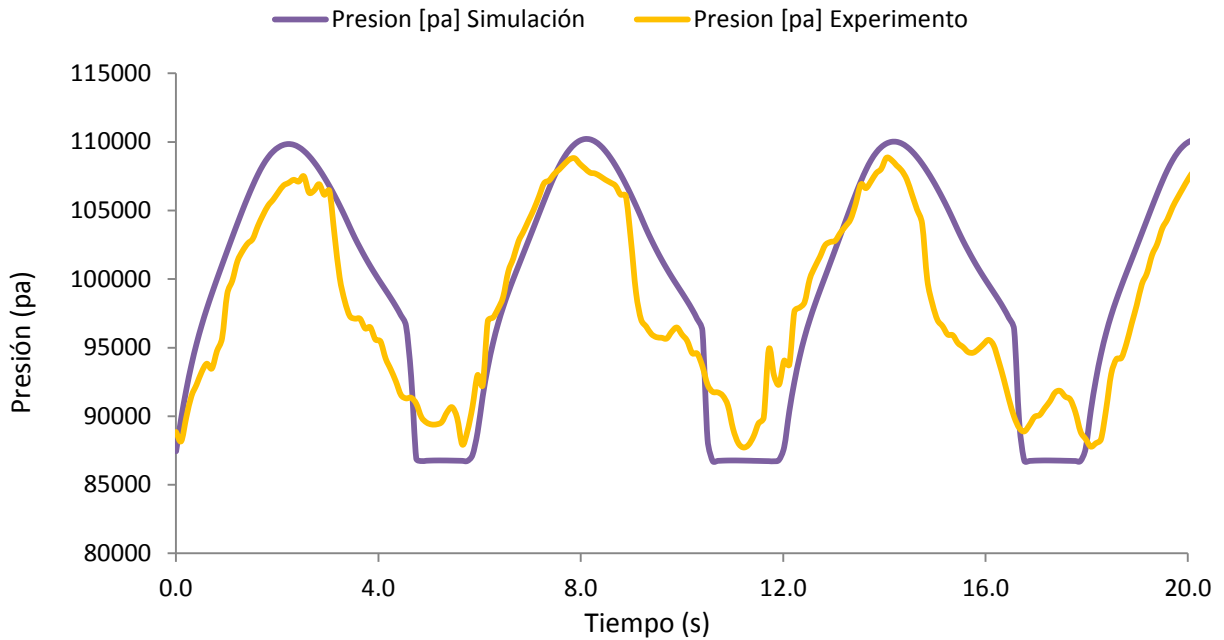


**Fig. 32 Comparación de datos experimentales con predicción del modelo.**



**Fig. 33 Comparación de datos experimentales con predicción del modelo.**





**Fig. 34 Simulación experimento 4a, ajustado con un rango menor en el tiempo**

Se observa en este experimento, que la frecuencia y la amplitud de la presión producida por el flujo se adecuan al experimento. La estabilidad se explica a través de la secuencia, tras el ascenso del tapón al separador (tubería ascendente vertical) en este sentido se concluye que un flujo con tapones cortos se caracteriza por una elevada irregularidad. Esto se debe a que los tapones cortos son menos propensos a deformaciones y rupturas bajo la acción de las fuerzas involucradas. Los efectos del proceso de descarga son poco relevantes, pues la duración de la expulsión suele ser muy breve, además los tapones conservan suficiente energía cinética para llegar al separador sin que se produzcan transiciones del patrón de flujo en el tramo vertical.

### 5.4 Ajustes en las variables.

Para lograr el objetivo de este trabajo de investigación, fue necesario ajustar parámetros como la velocidad del tapón, hasta el propio colgamiento. Esto permite desarrollar una amplitud, para observar claramente el fenómeno. Cabe mencionar que los datos experimentales (características medidas visualmente, con una cámara de alta velocidad) están muy cercanos a lo que el simulador arroja. Esto quiere decir que las mediciones efectuadas cumplen completamente con la simulación presentada. La tabla 2 menciona los ajustes necesarios a las velocidades y longitudes del tapón. Cabe mencionar que la burbuja no puede ser medida como se explica en las conclusiones, debido a que ésta cambia constantemente.

Experimento	CONDICIONES DEL EXPERIMENTO			CONDICIONES DE LA SIMULACION		
	$V_{S(P)}$	$L_{S(P)}$	$L_{B(P)}$	$V_{S(P)}$	$L_{S(P)}$	$L_{B(P)}$
	(m/s)	(m)	(m)	(m/s)	(m)	(m)
2a	6.495	3.767	27.225	3.379	3.567	27.225
3a	5.822	3.548	26.262	3.522	3.948	26.262
4a	3.479	3.696	12.54	3.179	3.396	12.54

Tabla 2 Ajustes en simulación de los resultados experimentales

## **CAPITULO 6 ESTUDIO DE FLUJO BACHE EN UNA INSTALACIÓN COSTA FUERA**

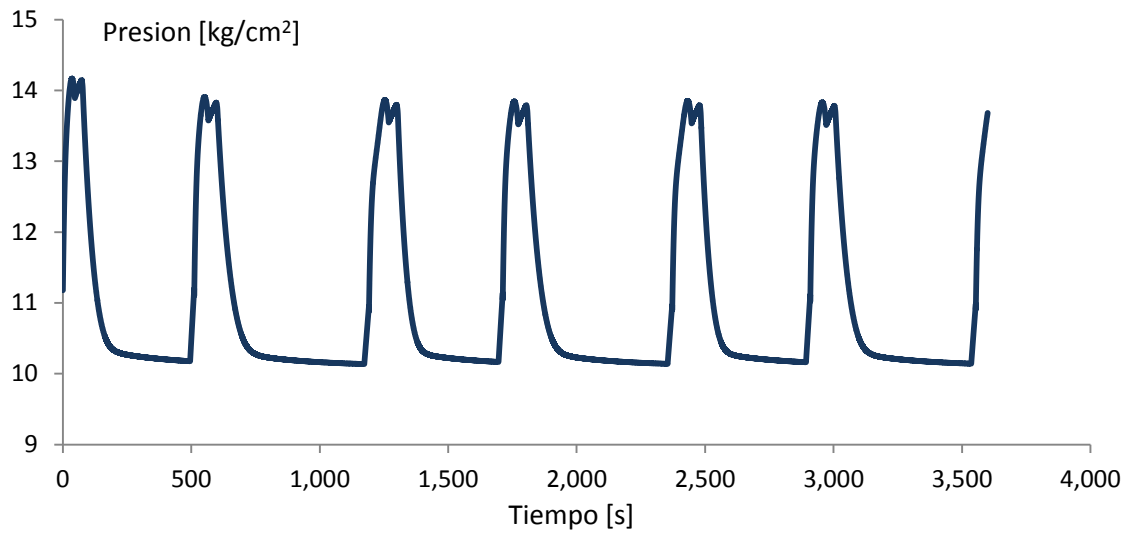
En este capítulo se trabajará con datos de una instalación costa fuera de acuerdo a las siguientes características, se tiene como objetivo primordial, estudiar las causas y fenómenos por lo que se simularan los fenómenos físicos que en esta ocurren.

Se considera una instalación costa afuera con 36 pulgadas de diámetro, con una longitud de la tubería ascendente vertical de 70 metros, el separador opera a  $10 \text{ kg/cm}^2$  de presión, la descarga de la tubería horizontal después de la tubería ascendente vertical es de 7 metros de longitud. Las características fisicoquímicas que se consideraron para hacer el experimento en el simulador, la densidad del aceite de  $0.850 \text{ gr/cm}^3$ , la densidad del gas de  $0.768 \text{ gr/cm}^3$ , la longitud del tapo del líquido es de 350 metros, la de la burbuja de gas de 4,200 metros y la velocidad promedio del tapón es de 10 m/s. Se ajustaron parámetros como colgamiento del líquido, velocidad del tapón, longitud de la burbuja como del tapón, siempre teniendo en cuenta el patrón de flujo fuese de acuerdo a un flujo tipo bache.

VARIABLES	VALORES	DESCRIPCIÓN
Vso	10.00	[m/s] Velocidad Inicial del tapón
Lso	550.00	[m] Longitud Inicial del tapón líquido
Lge	2,500.00	[m] Longitud de la burbuja
Lpipe	12,000.00	[m] Longitud de la tubería horizontal
Hs	0.435	[adm] Colgamiento del tapón
Lhor	7.00	[m] Línea de descarga
Lrsr	70.00	[m] Longitud de la tubería vertical ascendente
Rho	825.00	[kg/m <sup>3</sup> ] Densidad del Aceite
Rhog	0.76	[kg/m <sup>3</sup> ] Densidad del Gas
PS	10.00	[kg/cm <sup>2</sup> ] Presión del separador
D	0.91	[m] Diámetro de la tubería (36"Ø)

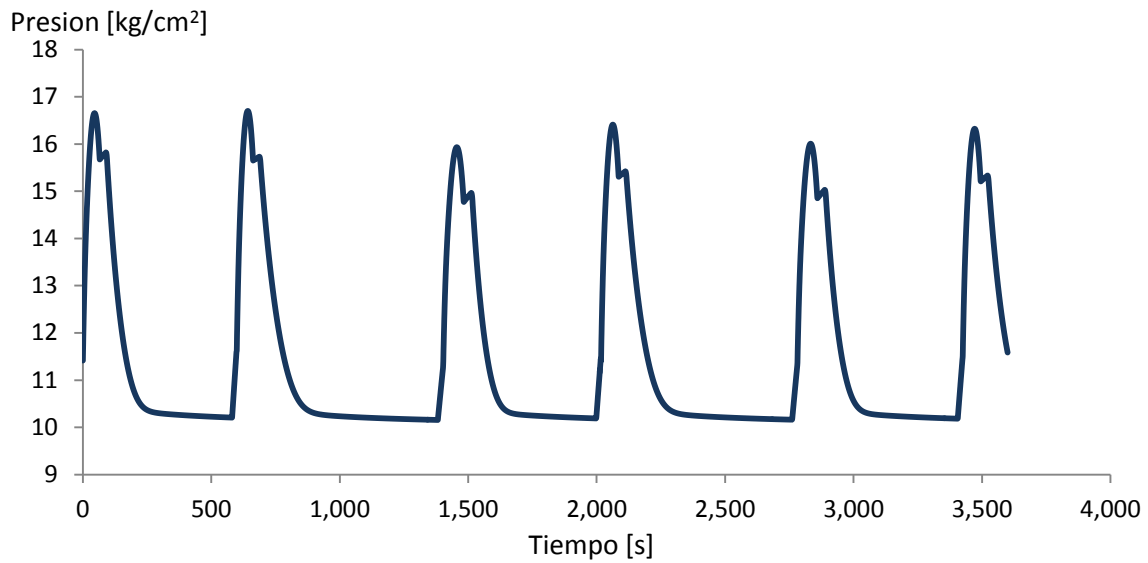
**Tabla 3 Valores utilizados para la simulación de la instalación costa afuera.**

A continuación se muestra la simulación de la instalación costa fuera de acuerdo a las características antes mencionadas.



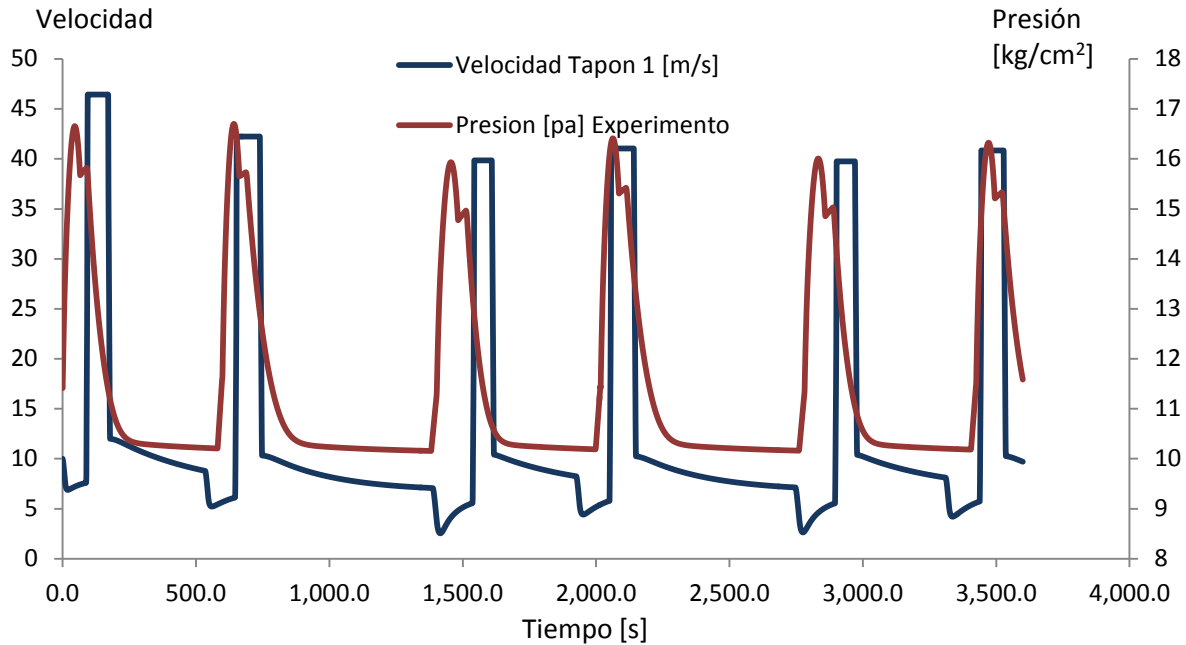
**Fig. 35 Variación de presión en el fondo de la base de la tubería vertical ascendente.**

En la simulación se hicieron ajustes como de velocidad del flujo bache, así mismo se ajustó la longitud de la burbuja, propiedades físicas que afectan directamente el comportamiento del fenómeno. Por ejemplo, al variar la longitud de la burbuja se observó un incremento considerable en la presión de descarga, en la figura 28 la longitud de la burbuja es de 4,200.0 metros, en la figura 35 la longitud de la burbuja es de 8,000.0; a continuación se ilustra



**Fig. 36 Simulación de una instalación costa fuera longitud de burbuja 8,000 metros**

La presión máxima en la figura 35 es de  $14.2 \text{ kg/cm}^2$  donde en la figura 36 la presión máxima es de  $16.7 \text{ kg/cm}^2$ . Así mismo es de hacer notar que el periodo que tarda el flujo bache en llevar al separador es mayor. Ahora observemos el comportamiento de la velocidad de la figura 36.



**Fig. 37 Variación de la velocidad con respecto al represionamiento en la base de la tubería ascendente vertical.**

Cuando se inicia la simulación, la velocidad del flujo bache es de 10 m/s cuando este es empujado por la presión de la burbuja que esta por detrás, la velocidad incrementa considerablemente. Esto se debe a la gran presión que ejerce la burbuja de gas. Si bien observamos, la velocidad del flujo bache incrementa considerablemente, esto se traduce a problemas en separación, debido a que existe una gran intermitencia y reduce significativamente la eficiencia del equipo.

Se observa un comportamiento típico como en los experimentos simulados, cabe hacer mención que no se tiene un gráfico del comportamiento de la instalación costa fuera, esta simulación se realizó de acuerdo a datos del laboratorio que PEMEX Exploración y Producción proporciona para fines didácticos y educativos.

## **CAPÍTULO 7 RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

La investigación se centra en la comparación de los resultados experimentales con un modelo matemático para describir el fenómeno de flujo observado. Se consideraron unas simplificaciones necesarias para la incorporación de mecanismos y procesos de gran complejidad en la formulación del problema.

Las ecuaciones de movimiento, se derivaron a través de las aplicación de las leyes de conservación al conjunto de unidades de taponamiento. Cada tapón se caracterizó como un mecanismo, cuyos elementos están en continua iteración.

La simulación de los experimentos propuestos por Vázquez Morín (2008) tienen una reproducibilidad confiable. El proceso conduce a una distribución particular de los parámetros, también se indica que las longitudes de las burbujas no se pueden medir de la misma forma ya que estas cambian continuamente con el tiempo.

En relación con el modelo matemático, se concluye que éste es capaz de predecir valores de presión y velocidad con una exactitud razonable.

### **7.1 Conclusiones**

A partir de la evidencia experimental se concluye que las unidades de taponamiento se forman a partir de un proceso aleatorio. Dicho proceso conduce a una distribución particular de los parámetros (longitudes y velocidades) que se puede representar por una distribución Weibull. Se determina que las longitudes



de las burbujas no se pueden medir ya que estas cambian continuamente con el tiempo.

Se observó que el flujo es estable, pues la periodicidad de la intermitencia se restablece pocos ciclos después de la ocurrencia de algún evento que la altere, por ejemplo el desprendimiento de un tapón.

Así mismo ,se observó que en los tapones largos la propensión al desprendimiento de las colas de los tapones es mayor que en el caso de los tapones más cortos. También se enfatiza que estos desprendimientos alteran la fase y la amplitud de la secuencia de los tapones, causando así una alteración en los ciclos.

## **7.2 Recomendaciones**

Claramente se trata de un proceso estocástico en el que se debe tomar en consideración la distribución específica de las longitudes. El mismo tratamiento podría establecerse para las velocidades y otros parámetros. La inyección del gas sería la recomendación inmediata para simular los resultados expuestos por Vázquez Morín (2008).

**BIBLIOGRAFÍA**

AL-SAFRAN, E. M., "AN EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF SLUG CHARACTERISTICS IN THE VALLEY OF A HILLY-TERRAIN PIPELINE", PHD DISSERTATION, UNIVERSITY OF TULSA GRADUATE SCHOOL 2003.

BRILL, J.P., ARIRACHAKARAN, S. J., "STATE OF ART IN MULTIPHASE FLOW", JOURNAL OF PETROLEUM TECHNOLOGY. RICHARDSON, TEXAS, US 1992.

BRILL, J. P., SCHMIDT, Z., COBERLY, W. A., HERRING, J. D., MOORE, D. W., "ANALYSIS OF TWO PHASE IN LARGE DIAMETER FLOW LINES IN PRUDHOE BAY FIELD", SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEER JOURNAL, DALLAS TEXAS, US 1981.

CHENG, H., HILLS, J. H., AZZORPARDI, B.J., "A STUDY OF THE BUBBLE TO SLUG TRANSITION IN VERTICAL GAS LIQUID FLOW IN COLUMNS OF DIFFERENT DIAMETER", INTERNATIONAL JOURNAL MULTIPHASE FLOW, 24 NO. 2 PP 431-452, 1998.

FABRE, J., PERESSON, L.L., CORTEVILLE, J., ODELLO, R., BOURGEOLS, T., "SEVERE SLUGGING IN PIPELINE RISER SYSTEM", SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEER PRODUCTION ENGINEER, DALLAS, TEXAS, US 1990.

FARGHALY, M. A., "STUDY OF SEVERE SLUGGING IN REAL OFFSHORE PIPELINE RISER-PIPE SYSTEM", 5<sup>TH</sup> MIDDLE EAST OIL SHOW, MANAMA BAHRAIN, 1987.

FERNANDES, R.C., SEMIAT, R., DUKLER, A. E., "HYDRODYNAMIC MODEL FOR GAS AND LIQUID SLUG FLOW IN VERTICAL TUBES", AIChE JOURNAL 29, PP 981-989, 1983.

GHASSAN H., ABDUL-MAJEED, ALI M. AL-MASHAT, "A MECHANISTIC MODEL FOR VERTICAL AND INCLINED TWO PHASE SLUG FLOW", JOURNAL OF PETROLEUM SCIENCE AND ENGINEERING 27 PP 56-67, 2000.

GOMEZ, L. E., SHOHAM, O., TAITEL, Y., "PREDICTION OF SLUG LIQUID HOLD UP: HORIZONTAL TO UPWARD VERTICAL FLOW", INTERNATIONAL JOURNAL OF MULTIPHASE FLOW 26 PP 517-521, 2000.

GUZMAN VAZQUEZ E., FAIRUZOV, Y.V., "A STUDY OF NORMAL SLUG FLOW IN AN OFFSHORE PRODUCTION FACILITY WITH LARGE DIAMETER FLOW LINE", INTERNATIONAL OIL CONFERENCE AND EXHIBITION. VERACRUZ MEXICO 2007.

JANSEN, F. E., SHOHAM, O., TAITEL, Y., "THE ELIMINATION OF SEVERE SLUGGING-EXPERIMENTS AND MODELING", INTERNATIONAL JOURNAL MULTIPHASE FLOW, 22 NO. 6 PP 1055-1072, ENGLAND 1996.

MIYOSHI, M., DOTTY, D. R., SCHMIDT, Z., "SLUG CATCHER DESIGN FOR DYNAMIC SLUGGING IN OFFSHORE PRODUCTION FACILITY", SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEER, DALLAS TEXAS, US 1988.

SCHMIDT, Z., BRILL, J. P., BEGGS, D. H., "EXPERIMENTAL STUDY OF SEVERE SLUGGING IN A TWO PHASE FLOW PIPELINE-RISER PIPE SYSTEM", SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEER, DALLAS TEXAS, US 1980.

SCHMIDT, Z., DOTY, D. L., DUTTA-ROY, K., "SEVERE SLUGGING FLOW IN OFFSHORE PIPELINE RISER-PIPE SYSTEM", SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEER, DALLAS TEXAS, US 1985.

SCHMIDT, Z., "EXPERIMENTAL STUDY OF TWO PHASE SLUG FLOW IN A PIPELINE RISER PIPE SYSTEM", PHD. DISSERTATION UNIVERSITY OF TULSA, OKLAHOMA US 1977.

TAITEL, Y., BORNEA, D., DUCKLER, A. E., "MODELLING FLOW PATTERN TRANSITION FOR STEADY UPWARD GAS-LIQUID FLOW IN VERTICAL TUBES", AICHE JOURNAL 26, PP 345-353, 1983.

VÁZQUEZ MORIN JORGE, "ESTUDIO DEL FLUJO BACHE NORMAL CON INYECCIÓN DE GAS EN LA BASE DE LA TUBERÍA ASCENDENTE VERTICAL, EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN COSTA FUERA", TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENCIÓN DE GRADO MAESTRO, UNAM NOVIEMBRE 2008

G.H. ZHENG, SPE, J.P. BRILL, SPE, OVADIA SHOHAM, SPE, "AN EXPERIMENTAL STUDY OF TWO-PHASE SLUG FLOW IN HILLY TERRAIN PIPELINES