



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FRECUENCIA
DE PASO DE LOS "SLUGS"
EN FLUJO BIFASICO AGUA - AIRE EN TUBERIA
HORIZONTAL

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS
P R E S E N T A :
CLAUDIA LOAIZA ESCUTIA

ASESOR: DR. RAFAEL FERNANDEZ FLORES

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO.

1998

TESIS CON
FALLA DE CRICEN

259448



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el la tesis:

Estudio experimental de la frecuencia de paso
de los slugs en flujo bifásico agua-aire en
tubería horizontal.

que presenta la pasante: Claudia Luciza Escutia
con número de cuenta: 8402684-8 para obtener el TITULO de:
Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx.. a 22 de enero de 1998

PRESIDENTE	<u>Dr. Rafael Fernández Flores</u>	
VOCAL	<u>Dra. Laura P Martínez Padilla</u>	
SECRETARIO	<u>M en C. Ricardo P. Hernández García</u>	
1er. SUPLENTE	<u>Ing. Antonio Trejo Lugo</u>	
2do. SUPLENTE	<u>I.A. Laura M. Cortazar Figueroa</u>	

Me celebro y me canto a mí mismo.
Y lo que yo diga ahora de mí, lo digo de ti,
porque lo que yo tengo lo tienes tú
y cada átomo de mi cuerpo es tuyo también.

WALT WHITMAN
Canto a mí mismo

a Gracia y Liborio, por estos 30 años de amor y confianza

*a Rosi, Hildita, Liz y Pancho, por la vida compartida,
su cariño y apoyo incondicional.*

Me rodean gentes nuevas,
gentes que me acosan a preguntas...
Me llegan recuerdos de mi infancia,
de mi barrio,
de la ciudad,
de la nación ;
pienso en las grandes fechas,
en los grandes sucesos,
en los grandes inventos,
en las nuevas empresas ;
en los autores (en los antiguos y modernos) ;
me requieren la comida,
los amigos,
los vestidos ;
me preocupan los ademanes,
las atenciones,
las deudas.

WALT WHITMAN
Canto a mi mismo.

*Agradezco
al Instituto de Investigaciones Eléctricas
y al Museo de las Ciencias de la UNAM : UNIVERSUM,*

a León Felipe y a Walt Whitman, por las enseñanzas y las convergencias

a Gil, por ser mi mejor amigo

a "mi doctora particular" Gabriela Cervera

a Luis Figueroa

a Pilar Contreras, por la oportunidad

a Pablo, por las aventuras de la hormiga...

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FRECUENCIA DE PASO DE LOS SLUGS EN FLUJO BIFÁSICO AGUA-AIRE EN TUBERÍA HORIZONTAL

ÍNDICE

	<u>Página</u>
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	
1.1 Patrones de flujo bifásico	4
1.2 Parámetros de Lockhart-Martinelli	7
1.3 Estabilidades hidrodinámicas	10
1.4 Modelos de transición hacia el flujo "slug"	
1.4.1 Teorías existentes de la formación del flujo slug en tubería horizontal.	12
1.4.2 Modelos de formación de los slugs.	16
1.4.3 Trabajos relativos al cálculo de la frecuencia del paso del slug.	
1.4.3.1 Gregory-Scott	20
1.4.3.2 Taitel y Dukler	22
1.4.3.3 Tronconi	23
1.5 Técnicas experimentales para la detección del régimen de flujo slug	29
CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	
2.1 Diagrama general de la instalación experimental	31
2.2 Sistema de suministro de agua	32
2.3 Sistema de suministro de aire	32
2.4 Sección de pruebas	33
2.5 Sección de medición de flujos	35
2.6 Separador de fases	35
2.7 Sistema de adquisición automática de datos	36
2.7.1 Equipo	36
2.7.2 Conexión de los transductores de presión al adquirente de datos	36
2.7.3 Software	37
CAPÍTULO III. EXPERIMENTACIÓN	
3.1. Calibración de instrumentos	40
3.2. Técnica experimental de detección de los "slugs"	41
3.3. Determinación de la zona de experimentación	41
3.4. Determinación de variables experimentales	45
3.4.1. Experimentaciones previas	45
3.4.2. Ubicación de los transductores de presión	50
3.4.3. Determinación de los tiempos de muestreo experimental	50
CAPÍTULO IV. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	
4.1 Programa para el despliegue gráfico de los resultados	51
4.1.1 Despliegue de las gráficas de presión	53

4.2 Cálculo de la frecuencia del "slug"	55
4.3 Tablas de resultados experimentales	58
4.4 Cálculo de la velocidad del "slug"	59
4.5 Cálculo de la velocidad combinada	60
4.6 Frecuencia en función de los parámetros de flujo	62
4.7 Distribución de frecuencias	65
CONCLUSIONES	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

NOMENCLATURA

A	Área de la sección transversal de la tubería u orificio en metros cuadrados
C	parámetro ajustable vía condiciones de frontera
C _o	velocidad de la onda de perturbación, metros/segundos
C ₁	constante empírica de Taitel y Dukler
D	diámetro interior de tubería o diámetro hidráulico o longitud equivalente de la sección de paso de la fase, metros
d	derivada de
f	factor de fricción
F	frecuencia de paso del "slug", segundos ⁻¹
F _L	número adimensional, número de Froude líquido
F _o	número adimensional, considera la proporción de las fuerzas de inercia del gas referidas a las fuerzas de gravedad sobre el líquido
g	aceleración de la gravedad, 9.81 metros por segundo, por segundo
H _o	diámetro de la tubería, metros
h	altura o nivel de profundidad, metros
k	número de onda
L	longitud, metros
N _{FR}	número de Froude, adimensional
P	presión absoluta en Newtons por metro cuadrado (Pascuales)
Q	gasto, metros cúbicos por segundo
Q	función definida por ec. 1.4.21
Re	número de Reynolds, adimensional
S	perímetro mojado, metros
t	tiempo, segundos
V	velocidad, metros por segundos
U	vector velocidad en dirección x, metros por segundos
<U>	velocidad promedio de las fases
X	parámetro de Lockhart-Martinelli, adimensional
Y	número adimensional, representa las fuerzas relativas que actúan sobre el líquido en la dirección del fluido con respecto a la gravedad y caída de presión
Z	número adimensional, representa la razón de la inercia con respecto a las fuerzas de pérdida de presión en la fase gaseosa

Letras Griegas

Δ	diferencia entre dos puntos
φ	parámetro experimental de ajuste
η	nivel o elevación de la interfase gas-líquido, metros
ρ	densidad, kilogramo/metro cúbico
μ	viscosidad, centipoises, (Pa . s)
ν	frecuencia de la onda precursora, segundos ⁻¹
σ	tensión superficial
τ	periodo de las ondas
ω	frecuencia angular segundos ⁻¹
Ω	frecuencia adimensional

Superíndices y Subíndices

1	fase gaseosa, referencia punto 1
2	fase líquida, referencia punto 2
BIF	bifásico
c	cresta de la onda u onda crítica
G	gas
L	líquido
m, n	exponentes de la expresión de fricción de Blasius
SLUG	"slug"
S*	"slug" mínimo
SG	superficial del gas
SL	superficial del líquido

INTRODUCCIÓN

A finales de la década de los 40's y principios de los 50's, la necesidad de manejar flujos bifásicos en la industria química y petrolera, dió lugar a un importante desarrollo de la investigación en este campo. La intención de optimizar técnica y económicamente el diseño de los distintos sistemas bifásicos ha mantenido hasta la fecha el interés por conocer y explicar el fenómeno físico que rige la dinámica del flujo de mezclas bifásicas.

La importancia del transporte de mezclas fluidas en tuberías horizontales o cercanamente horizontales, es evidente en el campo del procesamiento de hidrocarburos líquidos y gaseosos. En estos casos el transporte bifásico permite la centralización del procesamiento de crudo y gas en una sola planta industrial aportando facilidades en la estabilización del condensado y dando como resultado mejoras tanto en la economía del proceso como en la conservación de los fluidos.

Otro ejemplo relevante lo encontramos en la industria geotérmica, donde la aplicación de diseños bifásicos en el transporte del vapor obtenido de los pozos hasta la planta donde se localiza la turbina que genera la electricidad es de suma importancia. El problema que se presenta en el transporte de un fluido geotérmico radica en el producto obtenido del pozo. Cuando se obtiene vapor dominante, es decir vapor seco, el transporte se limita a un fluido monofásico, mientras que si hablamos de líquido dominante, significa que el producto es una mezcla de dos fases; el fluido se encuentra en estado líquido y al ir subiendo por la superficie se evapora parcialmente, dando origen al flujo bifásico. Tal es el caso de los pozos geotérmicos en México, por lo que su manejo se complica y es caso de estudio

El flujo bifásico en líneas horizontales también se presenta en numerosas operaciones unitarias y procesos de transporte (flujo de fluidos, evaporación, transferencia de momento, calor, masa y otros.), en la industria química y alimenticia (Skelland, *Non-Newtonian Flow and Heat Transfer*. New York: John Wiley & sons, Inc; 1967), como por ejemplo en la operación de evaporadores, reactores químicos, intercambiadores de calor, condensadores, equipos de refrigeración y sistemas de acondicionamiento de aire. En la mayoría de estas aplicaciones la caída de presión no es el único problema de interés, la rapidez del transporte de calor, por ejemplo, puede ser de gran importancia.

Dentro de los diversos patrones de flujo que se presentan en las mezclas bifásicas (estratificado, alternante, "slug", anular, burbujeante), en este trabajo nos hemos enfocado al estudio del flujo "slug".

¹ "Slug" es un anglicismo que tiene varias acepciones. La traducción que nos interesa es: *pegar porrazo, porrazo*. El término "slug" describe una de las características físicas de este patrón: la formación de tapones que se mueven a gran velocidad, generan golpes o vibraciones fuertes en su paso; tal descripción no está contenida en la forma castellanizada que se le ha asignado (pulso, pulsante). Distinguir este patrón como flujo "porrazo", que es lo más cercano al significado del vocablo con el que fue bautizado el fenómeno resultaría poco estético. Por otra parte, utilizar el término flujo pulsante (referente a pulso, transmisión de una onda) se presta a confusiones y finalmente no describe el fenómeno correctamente. Consideramos que el término "slug", es un neologismo, empleado universalmente en el ámbito científico, con el que se designó a este tipo de patrón de flujo, y que al igual que los nuevos términos anglosajones relacionados con el cómputo, como software o hardware, son de uso común y aceptados debido a que la versión castellana no guarda el sentido de su uso. Por lo que a lo largo del presente trabajo nos referiremos a este patrón de flujo como flujo "slug" y a sus componentes "slugs" o "slug".

El estudio del flujo slug ha sido abordado desde distintos ángulos, propuestas teóricas y modelos que explican su formación y desarrollo, correlaciones empíricas y semiempíricas que predicen la frecuencia de su paso. Sin embargo sigue siendo aún tema de investigación debido a su complejidad.

En el presente trabajo se realizó un estudio experimental referente a la frecuencia de paso del "slug", considerando que su determinación puede ser importante no solamente con respecto a su uso en los modelos mecanicistas del flujo "slug", sino también en diversas aplicaciones dentro de la ingeniería, cálculo de la caída de presión, determinación de vibraciones peligrosas en tuberías, erosión - corrosión en tuberías, etc.

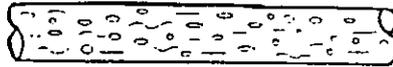
- Obtener valores experimentales confiables de la frecuencia de paso de slugs en una tubería horizontal con una mezcla bifásica de agua y aire, haciendo uso de técnicas de cómputo tanto en la adquisición como en el tratamiento de datos.
- Analizar el comportamiento de la frecuencia en el tiempo para determinar hasta que punto puede hablarse de la frecuencia del slug o debe referirse a una distribución de frecuencias.
- Obtener valores promedio de la distribución de frecuencias y analizar su relación con parámetros del flujo como V_{sl} , V_{sg} , V_{slug} y V_m .
- Con el fin de tener una correlación práctica para el ingeniero adimensionalizar la frecuencia promedio y analizar su correlación con parámetros adimensionales.

PATRONES DE FLUJO

En el fenómeno físico que ocurre al fluir simultáneamente, dentro de un mismo ducto, un gas y un líquido, un sólido y un líquido o un gas y un sólido, denominados flujo a dos fases, podemos encontrar diferentes formas en las que esas fases se mezclan y se mueven. Fundamentalmente las formas o patrones de flujo que puede adoptar un flujo bifásico depende de la relación de gastos másicos de las fases constitutivas.

En nuestro caso, experimentalmente podemos observar que si inicialmente dejamos circular en una tubería únicamente la fase líquida e introducimos un pequeño flujo de gas, este se integrará desplazándose en forma de burbujas, es entonces que obtenemos el patrón de flujo burbujeante, en el cual la velocidad del gas es mayor que la del líquido. A medida que va aumentando la relación de gastos de gas y líquido, esencialmente respecto a la presencia del gas, se van presentando los distintos patrones de flujo :

Flujo burbujeante : pequeñas burbujas de gas dispersas en la fase líquida.



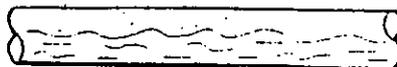
Flujo alternante : bolsas de gas formados por la coalescencia de muchas burbujas, fluyendo dentro de una fase líquida continua.



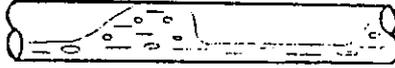
Flujo estratificado : el líquido fluye por la parte inferior del tubo, mientras el gas lo hace por la superior, sin formar ninguna ondulación.



Flujo ondulado : este patrón es similar al estratificado, pero presenta ondas en la interfase con arrastre de pequeñas gotas de líquido en el gas.



Flujo "slug": las ondas que aparecen en el flujo ondulado crecen ahora hasta formar olas que alcanzan la parte superior de la tubería, formándose de esta manera, los tapones o "slugs" que caracterizan a este patrón.



Flujo anular: el líquido es impulsado hacia la pared de la tubería debido a la mayor velocidad del gas, el cual fluye por la parte central, arrastrando pequeñas gotas de líquido.



Madhane, Gregory y Aziz (1974), establecieron, a partir de observaciones experimentales y en términos de las velocidades superficiales de aire y agua, una carta dimensional conocida brevemente como Mapa de Madhane (fig.1.1) en la cual se establecen los límites de los distintos patrones de flujo.

Algunos autores han corroborado los límites de este mapa con fundamentos teóricos (Hubbard y Dukler, 1966) y los resultados han sido similares a los obtenidos experimentalmente, por lo que su utilización es ventajosa, ya que apoya la localización de las zonas experimentales en los diferentes casos de estudio.

Los límites de los patrones de flujo que se forman dentro una instalación experimental específica, en algunos casos coinciden exactamente con el mapa de Madhane, en otros presentan algunos desplazamientos, por lo que es recomendable comprobarlos.

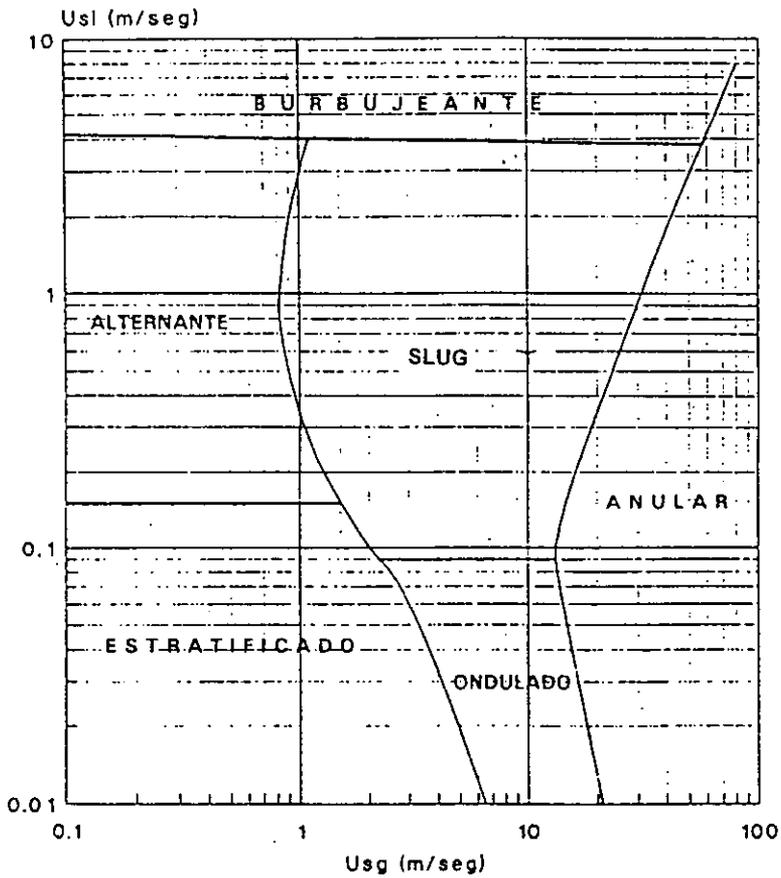


Fig. 1.1. Mapa de Mandhane para patrones de flujo en tuberías horizontales. (Mandhane, J.M., Gregory, G.A., Aziz K. 1974)

PARÁMETROS DE LOCKHART Y MARTINELLI

Como se comentó en la parte introductoria de este trabajo, la aplicación de los estudios sobre flujos bifásicos tiene efecto en diversas áreas de la industria, petrolera, química -incluida la de alimentos, nuclear, medio ambiente, etc. Y su usos en estas áreas están relacionados directamente con el diseño y dimensionamiento de equipo. Existen dentro del estudio de las mezclas bifásicas una variedad de correlaciones empíricas y semiempíricas, sustentadas en análisis dimensionales, adimensionales, de semejanza o teorías de modelos iniciadas principalmente por ingenieros.

Uno de los trabajos más importantes en el estudio de las mezclas bifásicas es el de Lockhart y Martinelli (1949), quienes fueron los primeros en presentar una correlación para la caída de presión, generalizada para flujo bifásico en tuberías horizontales.

Se trata fundamentalmente de una correlación empírica con algunas bases teóricas, para la caída de presión de los distintos regímenes de flujo bifásico. Es simple de usar, debido a que involucra variables macroscópicas fáciles de medir, como las velocidades superficiales de los fluidos; ha sido la más utilizada hasta la fecha, en las bases de diseño de sistemas o procesos bifásicos, aunque en algunas aplicaciones se cometen errores de arriba del 50%.

La correlación está basada en la hipótesis de que la caída de presión para la fase líquida debe ser igual a la caída de presión para la fase gaseosa, sin importar el patrón de flujo, considerando que no existe diferencia en la presión radial.

A continuación mostramos la secuencia de pasos para la obtención de los parámetros de Lockhart y Martinelli:

1. Lockhart y Martinelli proponen inicialmente expresiones para las caídas de presión individuales en cada una de las fases por medio de la ecuación de Fanning:

$$(\Delta P / \Delta L)_L = 2f_L \rho_L v_L^2 / D_L g$$

$$(\Delta P / \Delta L)_G = 2f_G \rho_G v_G^2 / D_G g$$

donde $(\Delta P / \Delta L)_L$ y $(\Delta P / \Delta L)_G$, es la caída de presión que ocurriría a cada una de las fases considerándolas como fluido monofásico. Los factores de fricción se calculan a partir de la relación de Blasius:

$$f = c / Re^n$$

$$(c=16, n=1 \text{ para flujo laminar y } c=0.316, n=1/4 \text{ para flujo turbulento})$$

2. Calculan la caída de presión bifásica a partir del conocimiento de las pérdidas monofásicas, suponiéndolas ligadas por un parámetro experimental (ϕ_L) que involucra las características de los fluidos en la mezcla:

parámetro para la fase líquida:

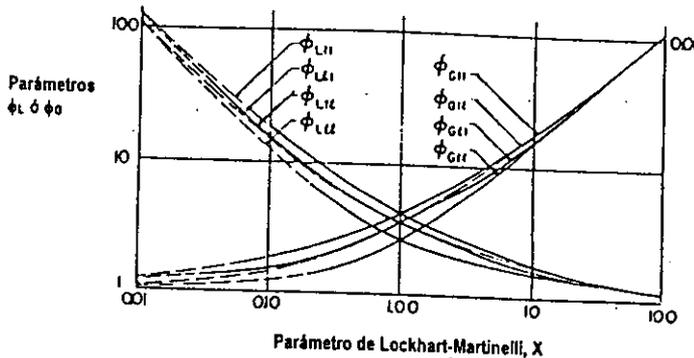
$$\phi_L^2 = (\Delta P / \Delta L)_{BIF} / (\Delta P / \Delta L)_L \dots\dots\dots (1.2.1)$$

parámetro para el gas :

$$\phi_G^2 = (\Delta P / \Delta L)_{\text{air}} / (\Delta P / \Delta L)_G \dots\dots\dots(1.2.2)$$

3. Lockhart y Martinelli encuentran los valores experimentales de ϕ_L y ϕ_G y los grafican en función de otro parámetro adimensional (X), conocido como el parámetro de Lockhart y Martinelli:

$$X^2 = (\Delta P / \Delta L)_L / (\Delta P / \Delta L)_G \dots\dots\dots(1.2.3)$$



Gráfica I.1 Correlación, Lockhart- Martinelli. (Lockhart- Martinelli, Chem, Eng, Progress, 45, 39, 1949)

El parámetro de Lockhart- Martinelli puede ser obtenido a partir de otras variables asociadas a la caída de presión individual :

$$X^2 = (v_{SL} / v_{SG})^2 [(\rho_L f_{SL} / \rho_G f_{SG})] \dots\dots\dots(1.2.4)$$

donde f_{SL} y f_{SG} es el factor de fricción de las fases individuales del líquido y del gas respectivamente. El factor de fricción está en función de la relación de Blasius, por lo que obtenemos para el caso de un flujo turbulento la siguiente expresión:

$$X = (v_{SL} / v_{SG})^{7/8} (\rho_L / \rho_G)^{3/8} (\mu_L / \mu_G)^{1/8} \dots\dots\dots(1.2.5)$$

Existen diversas modificaciones al parámetro de Lockhart y Martinelli debidas a numerosos trabajos que ajustan sus resultados experimentales a los parámetros propuestos por estos autores, Chisholm (1963), Baker (1954, 1961), entre otros.

Chisholm (1963) por ejemplo ajusta las gráficas experimentales de Lockhart- Martinelli, a una expresión analítica como :

$$\phi_L^2 = 1 + c / X + 1 / X^2$$

en el cual :

	<u>Líquido</u>	<u>Gas</u>
c=20	turbulento	turbulento
c=15	laminar	turbulento
c=10	turbulento	laminar
c=5	laminar	laminar

Pudiendo con esta relación abreviar el cálculo de $(\Delta P / \Delta L)_{BIF}$.

La importancia de esta correlación es que es adimensional y aplicable a cualquier patrón de flujo bifásico. Además de que correlaciona variables importantes con respecto al diseño de tuberías y equipos, como son la caída de presión y las velocidades superficiales de los fluidos. De aquí que un gran número de trabajos tomen en cuenta o incluyan (Taitel y Dukler, 1976, Tronconi, 1990) relaciones con respecto a estos parámetros.

En particular la caída de presión para el flujo slug correlaciona bien con este parámetro, lo que aunado al hecho de que el cálculo teórico de dicha caída de presión requiera del conocimiento del valor de la frecuencia son indicio de que ambas magnitudes -frecuencia y parámetro de Lockhart y Martinelli pueden correlacionarse bien. Más adelante, en este trabajo, explicaremos esta relación.

ESTABILIDADES HIDRODINÁMICAS

El fenómeno físico del flujo "slug" ha sido explicado por varios autores (Kordyban, 1961, 1985, Vermeulen y Ryan, 1971, Hubbard y Dukler, 1975, Tronconi, 1990) y son diversas las consideraciones fisicomatemáticas (inestabilidad de Kelvin-Helmholtz, energía cinética, inestabilidad lineal) en las cuales se sustentan las teorías y modelos de formación o transición hacia al flujo "slug". Una de las teorías más recurridas por numerosos autores (Kordyban y Ranov, 1970, Mishima e Ishii, 1980, entre otros) corresponde a la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz.

Las teorías de estabilidad de sistemas bifásicos fluidos, estabilidad de Raleigh-Taylor, en estado estático y la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz, para fluidos estratificados en movimiento relativo, conforman las teorías clásicas de inestabilidad hidrodinámica (Chandrasekhar, 1961) ,basadas en las ecuaciones de movimiento de Navier-Stokes, escritas para perturbaciones en términos de modos normales.

En el análisis de la estabilidad de Kelvin-Helmholtz se consideran inicialmente condiciones estacionarias en el deslizamiento del fluido bifásico estratificado, introduciendo en la ecuación de Navier-Stokes perturbaciones de naturaleza sinoidal cuya longitud de onda barre todo el espectro de frecuencias. Investigando posteriormente la respuesta del sistema ante dichas perturbaciones expresadas en modos normales.

Inestabilidad de Kelvin-Helmholtz.

Tomando en cuenta al flujo estratificado para el análisis de perturbación, la teoría de inestabilidad de Kelvin-Helmholtz considera que en la superficie interfacial existe una competencia entre las fuerzas de presión y las de gravedad.

$$\Delta P = \Delta(\rho U^2) = g \Delta \rho.$$

Por lo que establece, que el flujo estratificado es estable si la diferencia de presiones entre los fluidos es menor que las fuerzas de gravedad estabilizadoras. Si la diferencia de presión entre las fases supera los efectos gravitacionales, surgirá la inestabilidad y la transición hacia otro patrón de flujo, como la formación de pequeñas ondas que crecen y eventualmente forman "slugs".

Esta condición de inestabilidad del flujo estratificado, desde el punto de vista clásico de Kelvin-Helmholtz, queda especificada con la ecuación :

$$U_1 - U_2 > \sqrt{\frac{g}{k} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 \rho_2} \frac{1}{\cos \theta}}$$

donde $U_1 - U_2$ es la diferencia de velocidad de las fases, 1 fase gaseosa, 2 fase líquida, ρ_1, ρ_2 , densidad de las fases, g , aceleración de la gravedad, k , vector de onda, y $\cos \theta$, es el ángulo entre las direcciones de k y el componente del vector velocidad en la dirección de x .

En el siguiente capítulo, veremos que varios investigadores han utilizado perturbaciones que se caracterizan por funciones matemáticas que corresponden a una pequeña modificación de los modos normales representados por esta ecuación.

TEORÍAS EXISTENTES DE LA FORMACIÓN DEL FLUJO "SLUG" EN TUBERÍA HORIZONTAL.

Durante los últimos 25 años han aparecido en publicaciones especializadas, numerosos modelos, que apoyados en diversas consideraciones, tratan de explicar el fenómeno físico de la formación o transición hacia el flujo "slug" en una tubería horizontal.

Kordyban en 1990, realiza una recopilación de algunos de los trabajos existentes que se presentan en esta sección. El autor agrupa los trabajos considerando la base físicomatemática que explica el fenómeno y sustenta cada uno de los modelos propuestos, clasificándolos en cuatro grupos:

1. Inestabilidad de Kelvin-Helmholtz con base en la ecuaciones de movimiento de onda.
2. Inestabilidad de Kelvin-Helmholtz con base en la ecuación de Bernoulli.
3. Energía Cinética.
4. Inestabilidad Lineal.

Inestabilidad de Kelvin-Helmholtz con base en las ecuaciones de movimiento de onda.

El primer grupo de investigadores considera la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz como responsable de la formación de los "slugs" y analiza la estabilidad de las ondas interfaciales con base en las ecuaciones de movimiento de las ondas. El desarrollo teórico se fundamenta principalmente en la ecuación de Milne-Thompson para la propagación de ondas senoidales pequeñas aunque algunos otros autores se apoyan en el análisis de onda de amplitud finita. La relación de dispersión de Milne-Thompson para la propagación de las ondas es:

$$k_{\alpha} (U_L - C)^2 \coth(kh_L) + k_{\beta G} (U_G - C)^2 \coth k h_G = g (\rho_L - \rho_G) + \sigma k^2$$

Esta expresión se sustituye en lugar de las funciones que se proponen para el análisis clásico en términos de modos normales. Las ondas son estables mientras la velocidad de onda sea real. Para ondas largas, cuando se puede desprestigiar la tensión superficial, la ecuación que predice la inestabilidad se reduce a :

$$(U_G - U_L)^2 > (\rho_L - \rho_G) g (h_L / \rho_L + h_G / \rho_G).$$

Para $\rho_L \gg \rho_G$ y $U_G \gg U_L$ esta ecuación se transforma en :

$$\rho_G U_G^2 \geq g (\rho_L - \rho_G) h_G .$$

Realmente hay dos factores cuya influencia debe considerarse aquí. En primer lugar, las ondas de amplitud finita pueden ser inherentemente menos estables, y en segundo lugar, conforme las ondas se aproximan a la superficie superior de un canal cerrado, la variación de presión se incrementa con el cuadrado de las velocidades remarcando la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz. Varios investigadores, Kordyban y Ranov (1970), Mishima e Ishii (1980), Ahmed y Banerjee (1985), han demostrado que esta correlación sobrepredice la velocidad crítica del gas por un factor de 2 y, consecuentemente, prefirieron el análisis de ondas de amplitud finita.

Kordyban y Ranov (1970) desarrollaron un análisis aproximado sobre ondas de amplitud finita y Mishima e Ishii retoman este trabajo en 1980, introduciendo nuevos criterios y análisis de estabilidad, obteniendo buenos resultados con numerosos datos experimentales y algunas correlaciones empíricas. Ahmed y Banerjee (1985) utilizaron teorías sofisticadas para analizar la estabilidad de ondas finitas.

Los resultados de todos estos análisis indican que la transición a flujo "slug" es una función fuerte de la longitud de onda, en el sentido de que las ondas más cortas son menos estables, consideración que no concuerda con las observaciones experimentales, las cuales demuestran que la mayoría de las ondas que forman un "slug", parecen tener similar longitud de onda de paso. Es decir, las ondas más largas son las más altas y son invariablemente las únicas que crecen hasta formar "slugs". Además, los datos experimentales no indican una sensibilidad respecto a la longitud de onda. Por lo que se ofrece una explicación alterna, la cual supone que la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz ocurre solamente en la cresta de la onda, según el estudio fotográfico de la formación del "slug" de Kordyban (1985), por lo que la onda larga representaría solamente un vehículo que trae a la superficie líquida hasta la proximidad de la superficie de la pared superior del canal y su longitud no es significativa para la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz.

Inestabilidad de Kelvin-Helmholtz con base en la ecuación de Bernoulli

Un segundo grupo considera que la formación de los "slugs" es producida por la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz, pero analizan la estabilidad con base en la ecuación de Bernoulli. En comparación con el primer grupo, el enfoque parecería ser idéntico, pero en este caso se ignora el movimiento de las ondas y solamente se consideran los niveles altos y bajos de líquido en la tubería. Las variaciones de presión sobre las ondas se calculan después con base en la ecuación de continuidad de la fase gaseosa y la ecuación de Bernoulli.

El trabajo de Taitel y Dukler (1976), incluido en este grupo, propone un modelo para la transición entre todos los diferentes patrones de flujo. La transición al flujo "slug" es solo una parte del estudio, en donde se define que el mecanismo de transición de los patrones de flujo tanto del estratificado al "slug", como del estratificado al anular es exactamente el mismo. En el análisis respecto a la estabilidad de las ondas se considera que la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz ocurre cuando hay una disminución de presión en la cresta de la ola, superando los efectos estabilizadores de la gravedad.

El artículo de 1977 de Kordyban también está incluido en este grupo. Y tanto Wallis y Dobson (1973) como Minato *et al.* (1986) se refieren en algún punto de sus estudios a este enfoque.

Estas teorías parecen estar más en concordancia con los datos y observaciones experimentales, debido a que indican que la transición en la formación del "slug" no está en función de la longitud de la onda, sino que depende de la cercanía de la superficie líquida con el tope de la tubería y de la velocidad del gas. El trabajo de Wallis y Dobson (1973) sirve como ejemplo para este caso, ya que incluye pruebas de flujo a corriente, contracorriente y líquido estancado, describiendo

con detalle una gran variedad de formas y comportamientos de onda, y en el que concluye que la transición al flujo "slug" es parecida bajo todas las condiciones.

Sin embargo este enfoque no está libre de problemas, la incapacidad de predecir la altura de las ondas directamente es uno de ellos; en este punto los investigadores consideran diferentes alternativas. Kordyban (1977) no provee método alguno para la determinación de las alturas de las ondas, simplemente compara los resultados de la solución de la ecuación de Bernoulli a las alturas medidas de las ondas. La teoría de Wallis y Dobson da como resultado que la longitud de las ondas es un medio de la profundidad del paso del gas, mientras que Taitel y Dukler (1976) introducen el factor empírico:

$$C_1 = 1 - h_L / D$$

el cual, según Gardner (1979), lleva a la siguiente ecuación, a partir de la cual se puede calcular la altura h_c de la onda:

$$\frac{H - h_c - h_L}{H - h_L} = 1 - 0.25 \left[1 - \frac{h_L}{H} \right]^2 - 0.25 \left[1 - \frac{h_L}{H} \right] \left\{ \left[1 - \frac{h_L}{H} \right]^2 + 8 \right\}^{1/2}$$

El segundo problema de este enfoque es que, aún introduciendo varios factores empíricos, La ecuación de Bernoulli sobrepredice la velocidad crítica del gas. Si consideramos la posibilidad de que la inestabilidad ocurra únicamente en la cresta de la onda, entonces deberíamos tomar en cuenta el gradiente de presión exclusivamente en la cresta en lugar de las diferencias de presión en la onda completa. No es tarea fácil determinar gradientes de presión locales ya sea experimental o analíticamente, pero a partir de algunas mediciones de presión en la superficie de la onda, el gradiente de presión parece tener un comportamiento particular en la cresta de la onda (Kordyban, 1990)

Análisis de la Estabilidad en Función de la Energía Cinética

El tercer grupo consiste de trabajos en los que la energía cinética entra en consideración. Los artículos de Wallis y Dobson (1973) caen dentro de esta categoría, aunque en su trabajo no se refieren exclusivamente a la energía cinética. El trabajo de Gardner (1979), es el que mejor desarrolla esta teoría, ya que calcula las energías cinéticas de las fases y determina la diferencia de los fluxes de energía entre los niveles altos y bajos del líquido. El máximo de esa diferencia de energía corresponde a la aparición del "slug". Debido a una buena concordancia con otras teorías y con datos experimentales y a que se involucran variables semejantes, parece que el enfoque de la inestabilidad de Kelvin - Helmholtz y el de diferencia máxima de energía, son análisis semejantes del fenómeno físico, pero analizados desde diferentes puntos de vista. El hecho significativo de la teoría de Gardner es que predice la transición al flujo "slug", sin necesidad de calcular la altura de la onda a partir de otra correlación.

El trabajo de Minato considera la energía cinética, pero los resultados están trazados en coordenadas del líquido superficial y la velocidad del gas. La correlación es buena para sus datos experimentales, pero es difícil comparar con los datos experimentales de otros autores debido, a que se necesitan valores del esfuerzo interfacial confiables, y normalmente no se hallan disponibles.

Análisis de Inestabilidad Lineal

En este último grupo están agrupados análisis como el de Lin y Hanratty (1986). La consideración principal se basa en que se produce una inestabilidad lineal que incluye los efectos de inercia y fricción, dando como resultado una disminución de la velocidad del gas en el punto crítico. Parece ser que la inclusión de estos términos en el análisis de la inestabilidad permitirá eventualmente la solución de este problema. El punto débil de esta teoría estriba en la suposición de una inestabilidad de amplitud pequeña. Se supone que los "slugs" se desarrollan a partir de un nivel de líquido esencialmente liso. Las observaciones experimentales para flujo de agua y aire indican que al principio las olas crecen sin volverse "slug", probablemente de acuerdo al mecanismo de Miles (Miles, 1957). Siendo solamente las olas más escarpadas, las que eventualmente se vuelven inestables y crecen explosivamente hasta convertirse en "slugs". No hay razón para creer que esta situación fuese diferente para presiones más altas o viscosidades diferentes. Para ondas escarpadas con variaciones de velocidad del gas entre la cresta y el valle y con separación en la cresta, la teoría lineal no se aplica. Por otra parte, incluir los términos de fricción y de inercia para las olas ayudaría en la búsqueda de una comprensión más completa de la transición hacia el flujo "slug".

En resumen, en opinión de Korabyan hay poca duda acerca de que la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz sea la responsable de la aparición de la formación del "slug", la cual es particularmente importante en la proximidad del tope de la tubería. Esta inestabilidad ha sido estudiada analfiticamente tanto por la ecuación de onda como por la ecuación de Bernoulli, a través de la cual se determina la diferencia de presión en la onda. El último método concuerda satisfactoriamente con datos experimentales. Sus resultados parecen indicar que la forma de la onda no importa, sino que basta la morfología de la perturbación para elevar el nivel del líquido hasta cierta distancia del tope del ducto.

Este enfoque aunque no predice la longitud de onda, correlaciona excelentemente con los datos experimentales graficados sobre las coordenadas de Wallis y Dobson, indicando que debe haber una interrelación entre la altura de la onda y la transición al "slug". Hasta ahora esta interrelación no ha sido teóricamente explicada, excepto parcialmente por Gardner.

Un análisis más refinado debe contemplar varios factores que no han sido considerados: la inestabilidad de la onda depende principalmente de la distribución de presión en la superficie de la onda y esta a su vez del perfil de velocidad. Es en esta parte donde no se han considerado los datos experimentales disponibles. La mayoría de los autores suponen un fluido no viscoso mientras que Miles supone un perfil de velocidades logarítmico. Tal como ocurriría sobre una superficie rugosa.

Sin embargo Chang (1968) midió el perfil de velocidad del gas en la vecindad de la superficie de la onda y encontró que la velocidad en la cresta es mayor que la velocidad de la corriente libre. Existen otras evidencias experimentales que también indican una separación en la cresta.

Cierto número de investigadores ignoran el movimiento de la ola en el líquido. Gardner, Minato *et al.*, consideran el nivel alto y el bajo del líquido para calcular la energía cinética de este. La evidencia experimental indica que en las etapas iniciales de inestabilidad, la ola posee aún movimientos orbitales hacia afuera de la cresta.

Otros refinamientos en las teorías son también poco probables a menos que se obtengan datos experimentales adicionales. En particular dos áreas carecen de información experimental. Para una explicación completa de la transición hacia el flujo "slug" se requiere de mediciones de perfiles de velocidad y distribución de presión en la vecindad de las ondas. La otra de mayor naturaleza práctica debe cubrir la transición hacia el flujo "slug" para fluidos de diferentes cocientes de densidad, viscosidad y tensión superficial. Los primeros datos están limitados prácticamente a agua y aire a presión atmosférica.

Las primeras investigaciones con agua y aire indican que la viscosidad no es una variable relevante mientras que la tensión superficial puede ser significativa o no, dependiendo del tamaño de la onda en cuestión. Otros datos (Wu, H.L., 1987, Wallis, G.B., 1969, Bendiksen, K.H., 1986) involucran experimentaciones con hidrocarburos fluidos, algunos a alta presión. Encontrando que las teorías clásicas no los representan bien y parece que la inclusión de la tensión interfacial es importante.

MODELOS DE FORMACIÓN DE LOS "SLUGS"

Kordyban.

Los primeros trabajos que intentaron explicar el fenómeno del flujo "slug" partían de consideraciones y análisis de la cantidad de movimiento. Kordyban en 1961, basado en observaciones experimentales, propone el primer modelo descriptivo del fenómeno, basado en balances de pérdida de carga del líquido contenido en el tapón y en la película. Según fue demostrado en posteriores trabajos experimentales (Kordyban y Ranov, 1963), el modelo era inadecuado debido a que se despreciaban términos importantes y la descripción resultaba ser excesivamente simplificada:

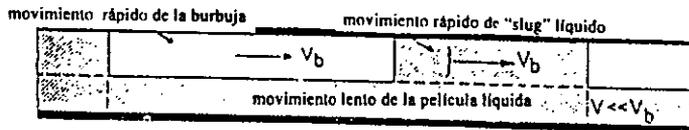


Fig. I.1.4.1. Esquema del Modelo de Kordyban

El líquido que se encuentra en la parte inferior del tubo obedece las leyes de flujo en canales abiertos y se desplaza a la velocidad (V), mientras que el resto del líquido fluye en la parte superior del tubo en "slugs" de forma geométrica de discos truncados alternado con burbujas de gas. En este modelo el "slug" líquido debe moverse a la velocidad promedio de la burbuja de gas (V_b) y deslizarse sobre la parte superior del líquido que se mueve más lentamente debajo de él. Basado en este concepto se desarrolla una expresión para la caída de presión que contiene un término de fricción y un término de aceleración. El componente fricativo predicho por este método, se encuentra que es menos satisfactorio que el predicho por la correlación empírica de Lockhart y Martinelli.

Vermeulen y Ryan.

En 1971 Vermeulen y Ryan, apoyados en observaciones experimentales, presentan un modelo sustentado en la representación de un "slug" idealizado, cuyas ecuaciones son una descripción simple del mecanismo físico que rige el fenómeno y debido a que las aproximaciones son demasiado burdas el modelo se alejó sensiblemente de la realidad física:

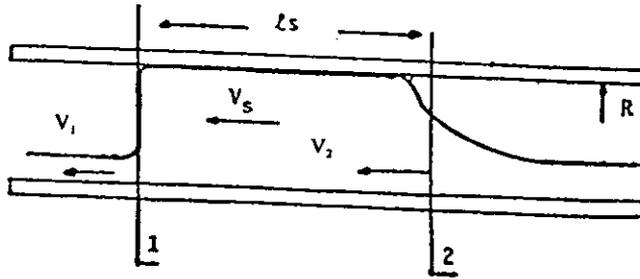


Fig. 1.4.2 Esquema del Modelo de Vermeulen y Ryan

$$\Sigma F = 0 = (P_1 - P_2) \pi R^2 - 2\pi R l_s \tau_w - (\rho Q_1 V_1 - Q_2 \rho V_2)$$

en donde : F= fuerza, P= presión, R= radio del tubo, l_s = longitud del "slug", τ_w = esfuerzo a la pared, ρ = densidad, Q= gasto volumétrico, V= velocidad de la película,

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho_s V_s f.$$

en esta relación la densidad, la velocidad y el factor de fricción son relativas al "slug". Y el factor de fricción f, se obtiene mediante :

$$f = 0.079 / Re^{1/4} \text{ (para flujo turbulento)}$$

Hubbard y Dukler.

Los trabajos de Hubbard (1965) y de Hubbard y Dukler (1968) se conjuntan para presentar en 1975 un modelo, (Dukler A.E., Hubbard M.G. A model for gas-liquid "slug" in horizontal and near horizontal tubes), fundamentado en estudios cuantitativos y observaciones experimentales filmadas, en el que se propone básicamente un mecanismo de formación y propagación del "slug". Debido a que es uno de los modelos que comúnmente se exponen, lo detallamos a continuación:

1.- Considerando una sección de la tubería como el sistema a estudiar, inicialmente observaremos un flujo bifásico en forma estratificada. Dadas las condiciones de formación del "slug", la capa líquida se desacelera, lo que produce un aumento en su nivel dentro del tubo; simultáneamente y como consecuencia del aumento en la velocidad del gas, se forman olas en la superficie del líquido que, eventualmente, debido al aumento en el nivel del líquido crecerán hasta formar tapones o "slugs", bloqueando así el paso del gas.

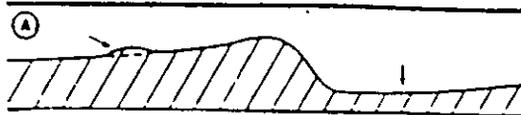
2.- El líquido que forma el "slug" se acelera a la velocidad del gas y en consecuencia envuelve a la película líquida que se encuentra al frente.

3.- El líquido que forma la parte trasera del "slug", se desacelera formando así una película.

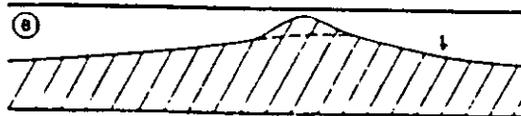
4.- Los procesos 2 y 3 estabilizan el cuerpo del "slug" y su avance.

5.- El "slug" tiene una energía cinética mayor que la que posee la película, por lo que, esta, al penetrar al cuerpo del "slug" recorre una distancia antes de adquirir la velocidad a la que se desplaza el tapón.

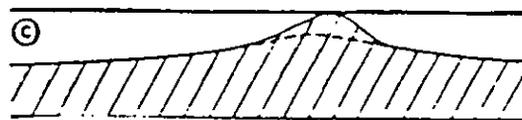
6.- Una parte del gas se dispersa dentro del tapón y otra forma una fase continua dentro del cuerpo del "slug", cuyo flujo determina la velocidad con que se propaga el tapón.



Incremento de nivel de líquido y formación de ola:



Lo sumo de ambos aumentos: de nivel eventualmente bloquea el tubo



Puente de líquido en el tubo



el "slug" atrapa al líquido que se encuentra adelante

Fig. 1.4. 3. Proceso de formación de "slug"

Esquemáticamente la representación del cuerpo del "slug" se conoce como "slug" unitario, el cual se considera una unidad que al propagarse por medio del mecanismo descrito, forma el régimen de flujo "slug".

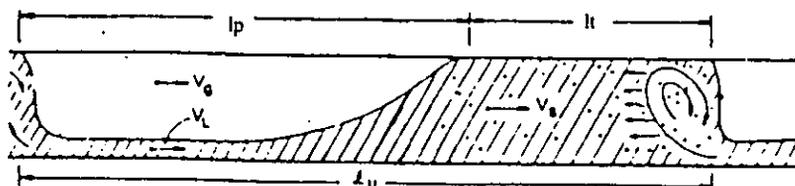


Fig. 1.4. 4 "Slug unitario" (l_u , longitud del "slug" unitario, l_t , longitud del tapón, l_p , longitud de la película, V_s , cantidad de gas dentro del tapón)

Nicholson *et al.* (1978) retoman este trabajo, y Kokal y Stanislav (1989) reportan que algunas modificaciones hechas a las ecuaciones de este modelo, para el cálculo de gradientes de presión y retenciones de líquido y gas, corroboran satisfactoriamente.

En 1985 Kordyban publica un estudio fotográfico en detalle de la formación de los "slugs" para una tubería rectangular, obteniendo el historial fotográfico de su desarrollo. Como se comentó previamente Kordyban fundamenta su estudio en la suposición general de que la formación de los "slugs" son una consecuencia de la inestabilidad interfacial en las ondas.

La observación principal de este trabajo experimental indica que la aparición del "slug" se presenta cuando pequeñas ondas en la cresta de la onda larga crecen rápidamente hasta formarlo. Lo interesante de esta observación radica en que modifica la forma de usar la teoría de la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz para explicar el surgimiento del "slug", pues el autor postula que la inestabilidad se presenta localmente en la cresta en lugar de la ola entera.



Fig. 1.4. 5. Fotografías de la formación de crestas en las olas. (Kordyban, 1985)

Otros trabajos

Debido a que la predicción de detalles hidrodinámicos y modelos mecanicistas requieren de diversos datos importantes, como la fracción de gas contenida en el "slug", la longitud del "slug" y la frecuencia del "slug", entre otros, paralelamente encontramos una gran cantidad de trabajos incorporándose a este estudio del fenómeno del flujo "slug". Hughmark en 1965 ideó una correlación empírica simple para determinar la fracción de gas y el gradiente de presión en la región del "slug" y Gregory y Scott (1969), proponen una correlación empírica de la frecuencia del paso del "slug". En 1985 Barnea y Brauner reportan un modelo físico para la retención del gas en flujo "slug". Otros trabajos en el área son los de: Greskovich and Shrier (1972), Heywood and Richardson (1979), Knervold *et al.* (1984), Kago *et al.* (1987).

TRABAJOS RELATIVOS AL CÁLCULO DE LA FRECUENCIA DEL PASO DEL "SLUG".

Los datos de frecuencia del "slug" han sido reportados por varios autores, pero los intentos de correlacionar o predecir esta variable han sido escasos: Gregory y Scott (1969), y Greskovich and Shrier (1972), publicaron correlaciones dimensionales de datos de frecuencia sin bases físicas. Taite! y Dukler (1977) proponen el único modelo disponible en el cual la frecuencia del paso del "slug" se determina por el proceso de formación del "slug"; y Tronconi (1990), retoma este trabajo, añadiéndole nuevos criterios y tratamientos de las ecuaciones del modelo.

Gregory y Scott

Gregory y Scott, reportan resultados experimentales de velocidades del "slug" y frecuencias del paso del "slug", para una mezcla bifásica de dióxido de carbono y agua en una tubería de ¾ de pulgadas de diámetro, efectuadas a presión atmosférica y una temperatura de 25°C. El método utilizado para medir la velocidad del "slug" es igual al usado por Hubbard (1965), consiste en registrar el tiempo que tarda en pasar un pulso de presión del "slug" de un punto a otro, por medio de transductores de presión montados en la parte inferior de la tubería, y cuyas señales de respuesta (voltaje) eran ampliadas y registradas en dos canales distintos. Los valores obtenidos de velocidad de "slug" representan el promedio de aproximadamente 10 determinaciones para un conjunto dado de variaciones de gas y líquido, reportando aproximadamente una desviación para los valores individuales de $\pm 18\%$ con respecto al valor promedio.

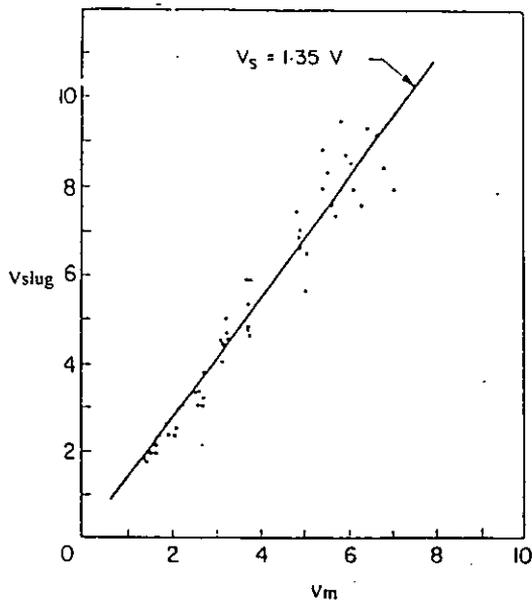
Para la medición de la frecuencia del "slug" Gregory y Scott utilizaron dos técnicas; la primera consistió en el simple conteo visual del número de "slugs" que pasan en un punto dado durante un periodo de tiempo y la segunda, contando el número de pulsos de presión de "slug" impresos en la carta del registrador del sistema de medición barométrica para un intervalo de tiempo dado. En este caso, la desviación máxima de la frecuencia y velocidad del "slug", con respecto a las 10 observaciones hechas para cada serie de datos, fue de aproximadamente un 20% del valor promedio.

En su desarrollo, los autores de este artículo definen una velocidad no deslizante (V_m) como la suma de las velocidades superficiales de gas y líquido y se dedican a la búsqueda de una correlación empírica entre esta variable y la velocidad del "slug" (V_{slug}). La mejor recta de ajuste (Gráfica 1.4.1) que obtienen está dada por la ecuación:

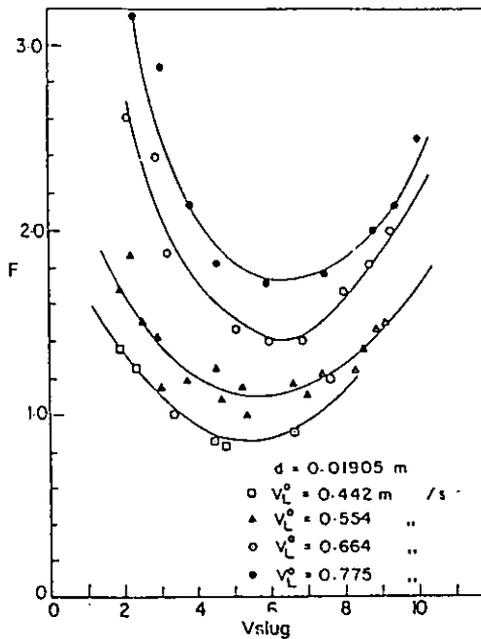
$$V_{slug} = 1.35 V_m \dots\dots (1.4.8)$$

Hubbard en 1965 había obtenido una relación semejante pero con un coeficiente de proporcionalidad de 1.25. Sin embargo, Gregory y Scott comentan que los propios datos de Hubbard se ajustan mejor a la ecuación (1.4.8).

Al graficar los datos de la frecuencia del "slug" contra la velocidad del "slug", Gregory y Scott obtienen una serie de parábolas con concavidad hacia arriba para cada valor de velocidad superficial de líquido constante, tal como se muestra en la figura siguiente:



Gráfica I.4.1. Correlación de velocidad del "slug" vs. velocidad combinada. (Gregory y Scott, 1969)



Gráfica I.4.2 Correlación frecuencia del "slug" vs. velocidad del "slug". (Gregory y Scott, 1969)

Hacen notar los autores, que todas las curvas presentan un mínimo a una velocidad del "slug" $V_{slug} \approx 6$ m/seg. Y señalan que la forma de la curva sugiere una dependencia entre la frecuencia del "slug" (F) y su velocidad de la forma:

$$F = A / V_{slug} + B V_{slug} + C \dots \dots \dots (1.4.9)$$

Debido a que se observa en el comportamiento de las curvas (F vs V_{slug}), una velocidad del "slug" mínima (V_s^*), derivan la expresión anterior con respecto a la velocidad del "slug" e igualan a cero para obtener la ecuación para V_s^* :

$$A = (V_s^*)^2 B \dots \dots \dots (1.4.10)$$

Sustituyendo finalmente la ecuación (1.4.10) en la expresión polinomial inicial (1.4.9), obtienen:

$$F = B [(V_s^*)^2 / V_{slug} + V_{slug}] + C \dots \dots \dots (1.4.11)$$

Un examen más detallado de la figura anterior indica una dependencia de proporcionalidad directa entre la frecuencia del "slug" con la velocidad superficial del líquido y una relación de proporcionalidad inversa de F con el diámetro de la tubería. Por lo tanto, Gregory y Scott sugieren que la frecuencia del "slug" podría correlacionarse con el número de Froude mediante una función del tipo:

$$(N_{FR})_{SLUG} = V_{sl} / g D [(V_s^*)^2 / V_{slug} + V_{slug}] \dots \dots \dots (1.4.12)$$

Con sus datos experimentales y los de Hubbard, relacionan la frecuencia del "slug" (F) con el número de Froude para el "slug" ($(N_{FR})_{slug}$), tomando $V_s^* \approx 6$ m/seg. que es aproximadamente el valor mínimo de las curvas en las gráficas (F vs V_{slug}), obtenidas a partir de sus datos experimentales. Obteniendo del ajuste logarítmico la siguiente expresión:

$$F = 0.0157 (N_{FR})_{slug}^{1.2} \dots \dots \dots (1.4.13)$$

con una desviación estándar de 15.8% y ordenada al origen igual a cero.

Sustituyendo en (1.4.13) las ecuaciones (1.4.10) y (1.4.12), obtienen finalmente una correlación empírica para el cálculo de la frecuencia del "slug":

$$F = 0.0226 [(V_{sl}/g D) (19.75 \sqrt{Vm} + Vm)]^{1.2}, \text{ seg}^{-1}$$

(1.4.14) [S. Internacional]

Al final del presente trabajo se comentaran algunas observaciones al trabajo de Gregory-Scott.

Taitel y Dukler

Los autores analizan el fenómeno físico que gobierna el proceso entero de la formación del "slug" e introducen el concepto interesante de que la frecuencia del "slug" puede ser determinada por el mecanismo de formación del "slug". El trabajo de Taitel y Dukler considera básicamente que la frecuencia del "slug" es determinada por el proceso de formación del "slug" en la región de entrada,

donde el crecimiento de ondas inestables sobre una película estratificada eventualmente bloquea el paso del gas y genera un "slug" líquido. Inmediatamente después el nivel del líquido decae y las fuerzas hidrostáticas reconstruyen la película hasta su nivel original, completando el ciclo. Los autores suponen que la frecuencia del paso iguala al recíproco del intervalo de tiempo necesario para reconstruir el nivel de equilibrio de la película y desarrollan ecuaciones de conservación no estacionarias unidimensionales para los transportes de masa y momentum en flujos en canales abiertos, con el fin de determinar el tiempo característico para este proceso. Reportan que comparando con los datos de Hubbard (1965) y Gregory y Scott (1969), correlacionan satisfactoriamente.

Taitel y Dukler, considerando la normalización de las siguientes variables: el diámetro de la tubería con respecto a su longitud, el diámetro al cuadrado respecto al área, las velocidades superficiales del gas y líquido para las velocidades del gas y el líquido, respectivamente y D/V_{SL} para el tiempo. En el caso de flujo horizontal, delinearon una representación generalizada para su teoría, donde la frecuencia del "slug" adimensional calculada se grafica como una función de 5 grupos adimensionales:

$$\frac{V_D}{V_{SL}} = f(X, Z, F_L, F_G, Y)$$

$$X = [(dP/dx)_{SL} / (dP/dx)_{SG}]^2, \quad Z = \sqrt{(\rho_L (V_{SL})^2 / 2D) / |(dP/dx)_{SG}|}$$

$$F_L = V_{SL} / \sqrt{g D \cos \alpha}, \quad F_G = [V_{SG} / \sqrt{D g \cos \alpha}] \sqrt{(\rho_G / \rho_L - \rho_G)}$$

$$Y = \frac{g (\rho_L - \rho_G) \sin \alpha}{(dP/dx)_{SG}}$$

El modelo sufre de una contradicción fundamental: al escribir la ecuación de movimiento para la fase gaseosa, los autores intencionalmente desprecian el término de "efecto de Bernoulli", el cual describe la formación de ondas inestables, precursoras del "slug", como resultado de una reducción de la presión en la cresta de la onda debido a la aceleración del gas. Esta simplificación evita dificultades intratables en la solución numérica de la ecuación modelo.

Para llenar el requisito de la condición inicial para la resolución de la ecuación diferencial no estacionaria, identificaron arbitrariamente el nivel del líquido inferior a partir del cual la película empieza a reconstruirse, como el "nivel de estabilidad", denominación que dan al nivel mínimo en el cual el flujo "slug" existe en la tubería.

Tronconi

El trabajo de Tronconi básicamente propone algunas relaciones simples para el cálculo de la frecuencia del paso del "slug" a partir de un análisis del flujo bifásico intermitente horizontal, el cual relaciona la frecuencia del "slug" con las condiciones de flujo en la región de entrada de la tubería, donde ocurre el mezclado de las fases gas - líquido.

Supone que la frecuencia del "slug" es inversamente proporcional al período de las ondas inestables formadas en la interfase gas - líquido del flujo originalmente estratificado y tales ondas eventualmente crecen para generar los "slugs" líquidos.

Las predicciones de la frecuencia de los "slugs" derivadas de este análisis se ajustan satisfactoriamente a los datos experimentales de varios investigadores (Hubbard and Dukler, 1965, 1975, Heywood and Richardson, 1979, Kago et al, 1987) que cubren un rango representativo de condiciones de flujo.

Se ha establecido bien que los "slugs" se originan a partir de ondas inestables que se forman en la interfase de un flujo estratificado, las cuales crecen hasta bloquear el paso del gas. La inestabilidad de la onda se debe al "efecto de Bernoulli", el cual es responsable de la aparición de una

fuerza normal a la interfase que actúa sobre la cresta de la onda en la dirección opuesta a la gravedad. Con base en un extenso estudio fotográfico, Kordyban (1985) sugirió que los "slugs" se forman como resultado de una inestabilidad local en la cresta de la onda, en lugar de deberse a una inestabilidad hidrodinámica en la onda completa. El análisis de la estabilidad de la onda ha sido utilizado exitosamente para modelar la transición del régimen de flujo estratificado a intermitente (Kordyban y Ranov, 1970, Wallis y Dobson, 1973, Taitel y Dukler, 1977, Kordyban, 1977, Mishima e Ishii, 1980, Kokal y Stanislav, 1989), pero no se han hecho intentos para investigar si las características de las ondas responsables de la formación de los "slugs", correlacionan con las propiedades características de los "slugs" en flujo "slug" plenamente desarrollado

Tronconi propone una ecuación para el cálculo de la frecuencia del slug en función de las propiedades de los fluidos y sus condiciones de flujo. Podemos resumir su metodología en los siguientes pasos :

1. Supone que la frecuencia del paso de los "slugs" por un punto corriente abajo de la tubería, es inversamente proporcional al periodo τ de las ondas precursoras de los "slugs". Usando la ecuación de la frecuencia de las ondas para calcular la del "slug" propone

$$\omega = C_1 / \tau \dots\dots\dots (1.4.15)$$

La relación matemática entre la frecuencia del "slug" y el periodo de la onda precursora, subyacente en la ecuación (1.4.15), es bastante compleja. Dos factores contribuyen a hacer que ω sea menor que $1/\tau$:

- Solamente una fracción de las ondas precursoras se convierten en "slugs".
- Aún después de haber sido generados, algunos "slugs" pueden ser inestables y destruidos. (conatos de "slugs")

Las observaciones experimentales de Tronconi indican que en promedio (en sentido estadístico) cada onda precursora genera un "slug", pero solamente la mitad de ellos sobreviven como entidades simples mientras atraviesan la tubería. Por lo que Tronconi considera un valor de C_1 igual a $1/2$.

La frecuencia de la onda precursora, v , en relación a un sistema de referencia Lagrangiano, se puede determinar a partir del conocimiento de su velocidad C_0 y su número de onda k , como:

$$v = k C_0 / 2 \pi \dots\dots\dots (1.4.16)$$

2. Usando los resultados de Mishima e Ishii, que a partir de un análisis no lineal de flujo potencial bidimensional, obtienen una expresión para la velocidad de la onda, C_0 , Tronconi lo reescribe como :

$$C_0 = \frac{\phi_G kh_G}{\phi_L} \frac{\rho_G}{\rho_L} u_G \dots\dots\dots (1.4.17)$$

donde :

$$\phi_G(kh_G) = k\eta \coth(kh_G - k\eta) [1 + \frac{1}{2} k\eta \coth(kh_G - k\eta)] \quad \text{y} \quad \phi_L = k\eta(1 - \frac{1}{2} k\eta)$$

donde η es la altura de la interfase arriba del nivel de equilibrio.

3. Tronconi toma un valor de $k\eta=0.9$ en la ecuación (1.4.17) y combinándola con la ecuación (1.4.16), obtiene la frecuencia en función de la profundidad del gas en el flujo estratificado no perturbado:

$$v = (1/2\pi) kh_G \phi_G (kh_G) / \phi_L (\rho_G / \rho_L) (u_G / h_G) \dots \dots (1.4.18)$$

El número de onda, k, que aparece en la ecuación (1.4.18), puede determinarse a partir del concepto de que el "slug" es formado por la "onda más peligrosa", la onda precursora que alcanzará a formar un slug (Mishima e Ishi, 1980), es decir, al imponer la condición de que la velocidad de crecimiento de las ondas inestables alcancen un máximo:

$$\frac{d}{dk} k |C_i| = 0 \dots \dots \dots (1.4.19)$$

$$\text{donde: } |C_i| = \sqrt{\frac{g}{\phi_L k} - \frac{\phi_G \rho_G}{\phi_L \rho_L} u_G^2}$$

representa la parte imaginaria de la velocidad de onda cuando las ondas son estables.

En el umbral de la formación del "slug" $C_i = 0$, constituye la condición matemática para ondas neutramente estables (equilibrio indiferente).

Al resolver la ecuación (1.4.19) obtiene:

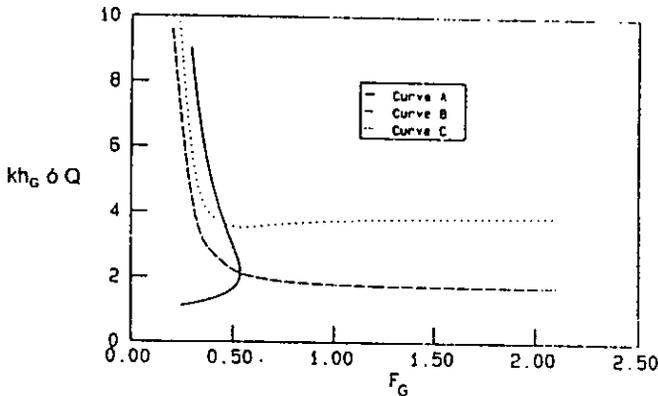
$$2kh_G \phi_G + (kh_G)^2 \phi_G' - \left(\frac{gh_G}{u_G^2} \frac{\rho_L}{\rho_G} \right) k \eta = 0 \dots \dots \dots (1.4.20)$$

$$\text{donde } \phi_G' = \frac{d}{dk} \phi_G$$

4. La solución de la ecuación (1.4.20) provee el número de onda adimensional kh_G correspondiente al máximo de la rapidez de crecimiento de onda como una función del número de Froude para el gas:

$$F_G = [\rho_G u_G^2 / (\rho_L g h_G)]^{0.5}$$

Graficando kh_G en función de F_G para $\eta = 0.9$ se obtiene la curva A en la Gráfica 1.4. 3 para velocidad máxima de crecimiento de la onda :



Gráfica 1.4. 3. Valores de kh_G ó Q contra F_G

La figura también representa los valores de kh_G en condiciones de estabilidad neutra para $kh_1=0.9$; La intersección entre las curvas A y B determina las condiciones del umbral del flujo "slug". Esto ocurre en $F_G=0.53$, según Tronconi, aunque Mishima e Ishi reportan un valor de 0.49. En ambos casos, tales resultados están en concordancia con los datos experimentales de Wallis y Dobson (1973). En la Gráfica I.4. 3, también se muestra la función:

$$Q = \frac{1}{2} kh_G \phi_G(kh_G) / \phi_L \dots \dots \dots (1.4.21)$$

contra F_G a velocidad máxima de crecimiento. La evaluación de esta función es requisito para la solución de la ecuación (1.4.18), con el fin de estimar la frecuencia de la onda. Los datos experimentales parecen indicar que Q es una función débil de F_G . Tomando la intersección de las curvas C y A, se obtiene:

$$Q = \frac{1}{2} kh_G \phi_G(kh_G) / \phi_L \approx 3.80 \dots \dots \dots (1.4.22)$$

5. Combinando las ecuaciones (1.4.15), (1.4.18) y (1.4.22), se llega finalmente a la ecuación que predice la frecuencia de paso del "slug":

$$F = 0.61 (\rho_G / \rho_L) (u_G / h_G) \dots \dots \dots (1.4.23)$$

la cual requiere estimar h_G , la profundidad del gas en equilibrio, y la velocidad real del gas u_G , que también está en función de h_G .

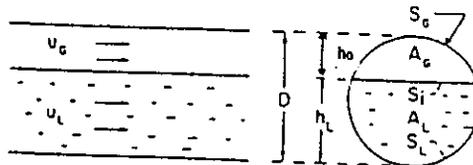


Fig. I.4. 6. Diagrama h_G , profundidad del gas en equilibrio.

Entonces, para este caso, la predicción de F se reduce a determinar la configuración del flujo estratificado en la región de entrada de la tubería, es decir a determinar los valores de h_G y u_G . Variables que pueden ser medidas experimentalmente o calculadas teóricamente.

El trabajo de Taitel y Dukler (1976 a,b) para la estimación de la configuración del flujo estratificado en la entrada de la tubería, muestra que bajo ciertas hipótesis, el nivel de equilibrio es únicamente una función del parámetro de Lockhart y Martinelli. Tomando en cuenta que el cociente del factor de fricción interfacial dividido entre el factor de fricción en el gas fuese una constante, y calculando el gradiente de presión en ambas fases, los autores encontraron la siguiente expresión adimensional para dicho parámetro, el cual involucra variables geométricas que están relacionadas directamente con h_G :

$$X^2 = \frac{[S_G/A_G + (S_L/A_L + S_G/A_G) f_l/f_G] (u_G D_G)^{-m} A_L (u_G/u_L)^2}{(u_L D_L)^{-n} S_L} \quad (1.4.24)$$

donde m y n son exponentes de expresión tipo Blasius para el factor de fricción del gas y líquido respectivamente :

$$f_G = C_G Re_G^{-m}, \quad f_L = C_L Re_L^{-n} \quad (1.4.25)$$

y

$$A_L = 0.25 \{ \pi - \arccos(2h_L - 1) + (2h_L - 1) \sqrt{1 - (2h_L - 1)^2} \}, \quad (1.4.26)$$

$$A_G = 0.25 \{ \arccos(2h_L - 1) - (2h_L - 1) \sqrt{1 - (2h_L - 1)^2} \}, \quad (1.4.27)$$

$$S_L = \pi - \arccos(2h_L - 1), \quad (1.4.28)$$

$$S_G = \arccos(2h_L - 1), \quad (1.4.29)$$

$$S_I = \sqrt{1 - (2h_L - 1)^2}, \quad (1.4.30)$$

$$u_L = A/A_L \quad (1.4.31)$$

$$u_G = A/A_G \quad (1.4.32)$$

El cálculo del valor de h_G , a partir de este conjunto de ecuaciones, puede obtenerse aplicando algún método numérico como el de Newton-Raphson, Webstein para funciones trascendentes, aunque este último requiere de un valor aproximado de h_G para limitar el rango de convergencia o a través de mediciones experimentales.

Tronconi además propone una representación adimensional para la frecuencia del "slug", considerando los siguientes grupos adimensionales:

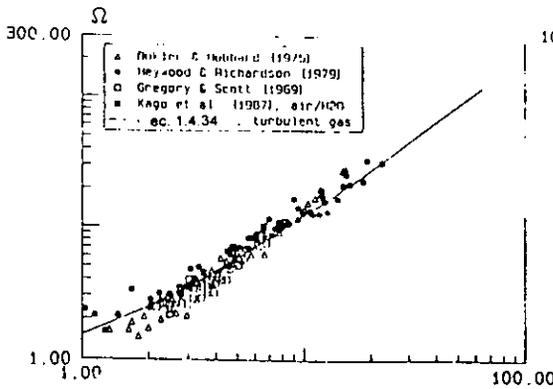
$$h_G^* = h_G/D; \quad u_G^* = u_G / V_{SG}; \quad \Omega = (\rho_L \omega D) / \rho_G V_{SG} \quad (1.4.33)$$

Entonces, la ecuación (1.4. 23) puede ser rearreglada en forma adimensional :

$$\Omega = 0.61 u_G/h_G \quad (1.4.34)$$

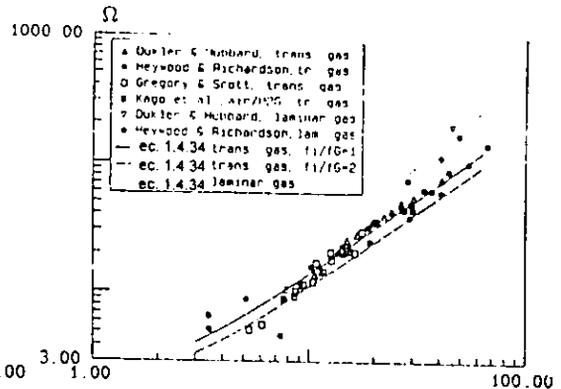
donde h_G y u_G son funciones únicas del parámetro de Lockhart y Martinelli, y si f_l/f_G es constante, entonces la ecuación adimensional para la frecuencia del "slug" es una función única del parámetro de Lockhart y Martinelli.

Con el fin de probar la validez de esta correlación, los datos experimentales de Dukler y Hubbard (1975), Heywood y Richardson(1979), Gregory y Scott (1969), y Kago *et al.* (1987), han sido graficados, desplegando la frecuencia adimensional en función del parámetro de Lockhart y Martinelli (figs. 1.4.4 y 1.4.5).



Párametro de Lockhart-Martinelli, X

Gráfica 1.4.4. Frecuencia generalizada del "slug", (Tronconi, 1990)
 Caso de fluido turbulento dentro de un flujo estratificado en la entrada de la tubería.



Párametro de Lockhart-Martinelli, X

Gráfica 1.4.5. Frecuencia generalizada del "slug", (Tronconi, 1990)
 Caso de transición de laminar a flujo estratificado, en la entrada de la tubería.

En cada una de las gráficas, las curvas teóricas correspondientes a la aplicación de la ecuación (1.4.34), correlacionan adecuadamente con los resultados experimentales.

El conjunto de datos para gas turbulento ajustan bien cuando se utilizan valores de $f_l/f_g > 2$, lo cual corresponde al efecto esperado de la velocidad del gas en la estructura interfacial. Sin embargo en ausencia de expresiones disponibles para cuantificar tal influencia, la consideración de f_l/f_g parece resultar adecuada para el conjunto completo de datos experimentales en cuanto a exactitud y simplicidad.

Para flujo gas en estado de transición la gráfica 1.4.5, muestra las curvas calculadas tanto para $f_l/f_g = 1$ como $f_l/f_g = 2$. Los valores de la frecuencia adimensional calculadas utilizando la expresión del factor de fricción interfacial caen dentro de estos dos límites.

Las curvas teóricas de la gráfica 1.4.5 también ajustan con precisión a los datos experimentales de flujo laminar de gas.

Las predicciones de la frecuencia del "slug" derivadas a partir de este análisis concuerdan satisfactoriamente con los datos que gobiernan un amplio rango de condiciones de flujo, exhiben las mismas características de los datos y toman en cuenta los efectos observados de flujo volumétrico gas-líquido, diámetro de tubería y propiedades de los fluidos.

Por lo que Tronconi concluye que su correlación constituye un modelo generalizado para la representación de los datos de frecuencia disponibles para flujo "slug".

Al final de este trabajo se comentarán algunas observaciones más con respecto al trabajo de Tronconi.

TÉCNICAS EXPERIMENTALES PARA LA DETECCIÓN DE LOS "SLUGS"

El flujo de gas y líquido en una tubería horizontal muestra una gran cantidad de configuraciones, denominadas patrones de flujo. Numerosos trabajos han abordado el problema relativo a la detección del régimen de flujo. Un resumen interesante de las diferentes técnicas de detección fue publicado por Hewitt (1978) y por Jones (1979).

Entre algunas de las técnicas utilizadas podemos mencionar las de absorción de rayos X, utilizadas por Jones y Zuber (1974) que tiene la desventaja de ser de alto costo. Barnea *et al* (1980), Reinmann *et al* (1981) entre otros, han utilizado sondas de conductancia que detectan la presencia de una fase particular haciendo uso de la diferencia de la conductividad eléctrica entre la fase gaseosa y la fase líquida. Jones y Zuber (1978) hicieron uso de un anemómetro de película caliente, pero su fragilidad y corta vida ha limitado su aceptación. Hubbard y Dukler (1966), usaron el espectro de potencia de las fluctuaciones de la presión local para caracterizar diferentes patrones de flujo. Weisman *et al* (1979) usaron una señal de presión diferencial de tiempo real y sugirieron un esquema que usa la amplitud y frecuencia de la señal para caracterizar un patrón de flujo particular. Tutu (1982) propuso usar la densidad de probabilidad de las fluctuaciones de la diferencia de presión para sistemas verticales. Lin y Hanratty (1985) exploraron el uso de las técnicas de conductancia para detectar la transición "slug" -anular. Debido a que los "slugs" son altamente invadidos por aire fue difícil con esta técnica diferenciar un "slug" de amplitud larga que no bloquea la sección transversal de la tubería.

En tuberías horizontales transparentes y a velocidades bajas de gas, la transición a flujo "slug" es muy fácil de detectar visualmente. A velocidades altas de gas, los "slugs" son mucho más cortos y rápidamente invadidos por aire, de manera que no es posible detectarlos. Por lo cual Lin y Hanratty (1987) propusieron una técnica instrumental. Exploraron el uso de un par de transductores de presión separados por cierta distancia (1.3 a 5 metros) en la dirección del flujo como dispositivo de detección. Esta técnica es distinta de la utilizada por Weisman *et al* (1979). Lin y Hanratty midieron presiones locales en dos sitios diferentes, en lugar de la caída de presión diferencial sobre distancias cortas. Se intula que el análisis de la caída de presión diferencial es más adecuado para patrones de flujo estacionario que para flujos intermitentes y la interpretación de las medidas es también muy diferente a las realizadas por Weisman.

El concepto de "slug" utilizado en el trabajo de Lin y Hanratty corresponde a aquella perturbación que bloquea la sección transversal de la tubería y mantiene su identidad hasta que alcanza la salida del conducto, moviéndose aproximadamente a la velocidad del gas. Visualmente se observan algunas perturbaciones grandes que parecen "slugs", pero no tienen todas las características anteriores y por lo tanto se les denomina pseudo-"slugs". Hubbard y Dukler (1975) reportaron que la caída de presión en flujo "slug" horizontal toma la forma de un salto cuando un "slug" está entre los dos extremos. La presión en el frente del "slug" es baja y se incrementa agudamente a un valor mucho más alto detrás del "slug". El gradiente de presión detrás del "slug" es pequeño pero la presión permanece alta. Este es el tipo de comportamiento de presión que fue utilizado por Lin y Hanratty para distinguir los "slugs". En los "slugs" plenamente identificados, se observó que la toma de presión corriente arriba detectó bloqueo visible de manera notable por las características de la señal de presión. Las medidas de presión corriente abajo fueron utilizadas para determinar si el "slug" permanecía coherente.

En las siguientes páginas se hará una descripción de la instalación experimental e instrumentación utilizada para llevar a cabo las mediciones presentadas en este trabajo.

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

DIAGRAMA GENERAL DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La instalación experimental en donde se efectuaron las pruebas que se reportan en el presente trabajo (fig.II.1), pertenece al Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), paraestatal que entre sus diversas áreas de estudio, tiene la enfocada a desarrollar metodología de análisis y diseño de tuberías para la conducción de mezclas bifásicas, especialmente utilizadas en las Centrales Geotérmicas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), para la obtención de energía eléctrica.

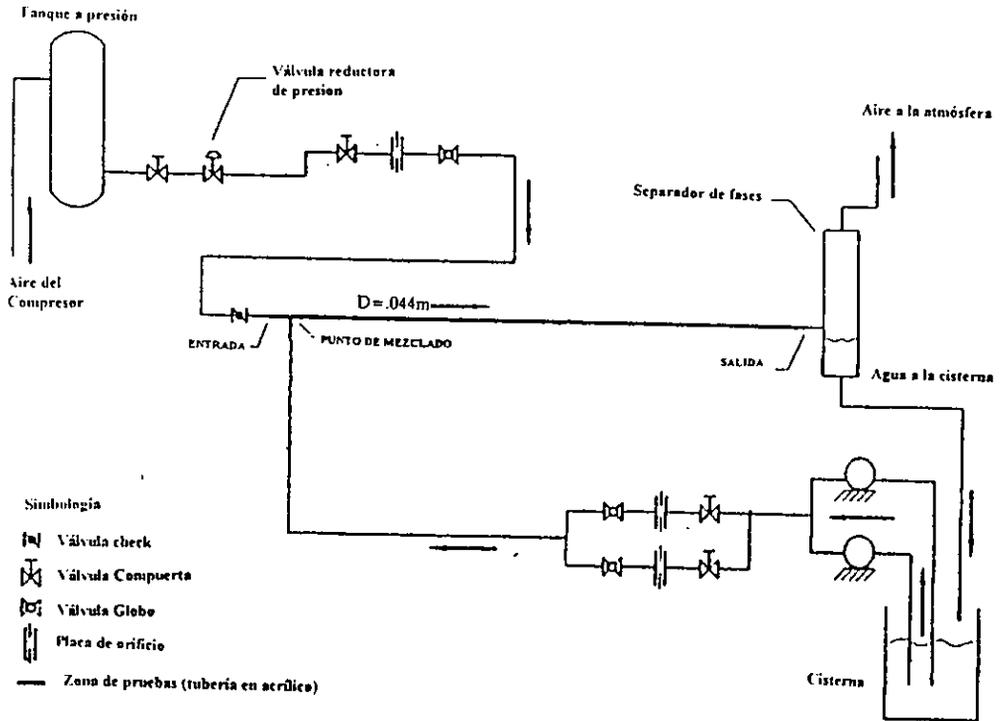
La instalación experimental, ubicada en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos del IIE en la localidad de Palmira en el estado de Morelos, fue diseñada fundamentalmente para el estudio de la confluencia de dos corrientes bifásicas y la observación de los patrones de flujo pulsante ("slug") y anular, aunque puede utilizarse para otros patrones de flujo, utilizando como fluidos modelos agua y aire.

Básicamente la instalación se compone de:

- SISTEMA DE SUMISTRO DE AGUA
- SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE
- SECCION DE PRUEBAS
- SECCION DE MEDICION DE FLUJOS
- SEPARADOR DE FASES
- SISTEMA DE ADQUISICION AUTOMÁTICA DE DATOS

Es importante aclarar que como se mencionó al inicio de este capítulo, la instalación experimental fue diseñada para varios propósitos, por lo que la descripción de los componentes de la instalación se limitará a los utilizados en la realización de este trabajo. Una descripción completa de la instalación puede verse en la siguiente figura :

Fig. II. 1. Instalación Experimental. IIE - Cuernavaca, Morelos.



SISTEMA DE SUMISTRO DE AGUA

Este sistema se compone de una cisterna y dos bombas de 1HP de potencia y 1 Kg/s de flujo másico, conectadas en paralelo.

El agua se bombea desde la cisterna y se conduce por medio de una tubería galvanizada de 2 pulgadas de diámetro a la sección de medición de flujos. En este punto la tubería de llegada de 1 1/2" se divide en tres del mismo diámetro, y cada una cuenta con una placa de orificio para la medición del flujo. Una de ellas alimenta únicamente a la línea ramal de acrílico (estudio de confluencias), mientras que la línea de pruebas (nuestro estudio) puede ser atendida según convenga por las dos restantes, las cuales cuentan con placas de orificio de diferente relación de diámetros. Las tuberías en la sección de medición cuentan a su entrada con una válvula de compuerta, que permite controlar el suministro de agua y al final con una válvula de globo para regular el flujo. Una vez medido el flujo, se envía a través de tuberías de PVC hacia las líneas de acrílico correspondiente.

SISTEMA DE SUMISTRO DE AIRE

Para el suministro de aire se utilizó un compresor de 58.5 KW, el cual alimenta un recipiente a presión de 2.3 m³ y 6.5 Kg/cm². La línea de conducción de aire, a la salida del recipiente a presión, cuenta con una válvula de compuerta de 2" de diámetro y una válvula reguladora de presión de 1" de diámetro y 0.125 m³/s de caudal nominal, la cual controla la presión del aire requerido. El aire se conduce a la sección de medición de flujos por una tubería galvanizada de 2" de diámetro; al llegar a esta sección, el flujo se divide en dos líneas del mismo diámetro, una que proveerá a la línea ramal de acrílico (estudio de confluencias bifásicas) y otra a la de pruebas (nuestro estudio). Cada una cuenta con una placa de orificio y el flujo es regulado por válvulas de globo. Posteriormente el aire es enviado a las T's mezcladoras por tuberías de PVC. Las tuberías de entrada del aire a las T's mezcladoras están provistas de una válvula check, que evitan el paso de agua a las líneas.

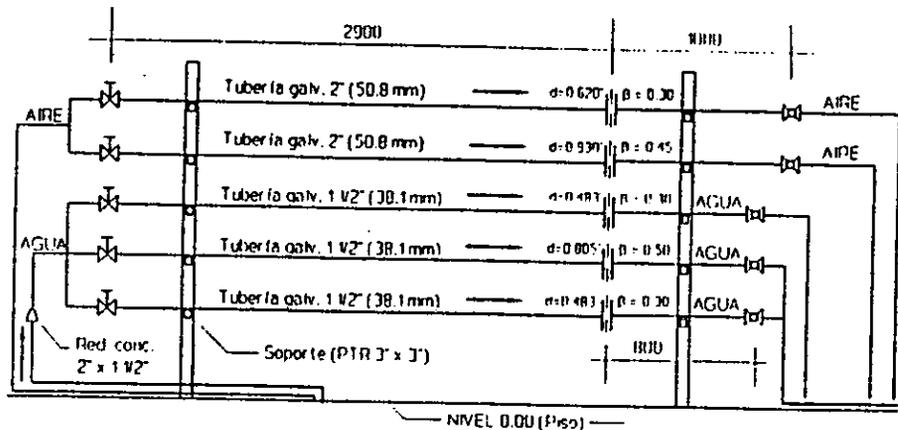


Fig. II.2. Arreglo de tuberías (sección de medición de flujos)

SECCIÓN DE PRUEBAS

La sección de pruebas construida totalmente en acrílico, con excepción de la estructura metálica de soporte, está conformada por :

- Tubería de acrílico de 2" de diámetro nominal (línea principal), 44 mm de diámetro interno y espesor de 3 mm. Su longitud desde la entrada hasta la salida es de 18.02 metros, (230 diámetros).
- Bridas para tubería de 2" .
- Boquillas de mezclado para tubería de 2" . La inyección de las fases se realiza por medio de una "T" mezcladora, en la que el aire entra axialmente al tubo y el agua perpendicular al flujo, lo que permite un mezclado rápido de los fluidos.
- 29 Tomas de presión localizadas a lo largo de la tubería de acrílico, de las cuales 16 se encuentran aguas arriba del punto geométrico utilizado para el análisis de confluencias bifásicas, ubicado a 10.74 metros a partir de la entrada y 13 tomas de presión corriente abajo de este punto. La mayor parte de las tomas de presión se encuentran en la vecindad del punto de unión de la confluencia debido a que la presión cambia rápidamente en esta zona y es importante su medición para ese tipo de estudio. El diámetro de las tomas de presión es de 1mm, el cual asegura que los registros de presión sean únicamente de la presión estática, no perturben el flujo y eviten la vorticalidad en su entrada. Las tomas utilizadas en este estudio fueron las 3, 10, 16, 22, 28, 27, localizadas a 4.10m, 9.63m, 12.53m, 14.03m, 15.30m, 17.05m de la entrada respectivamente.

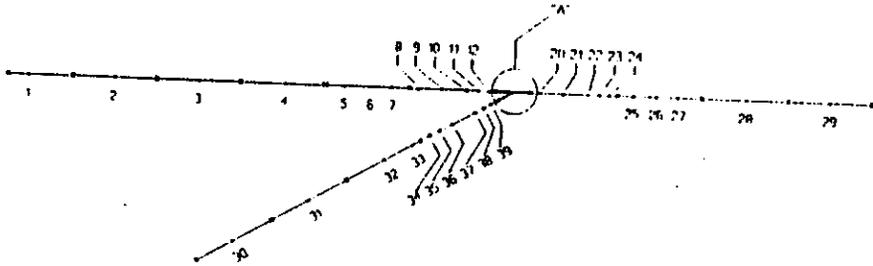
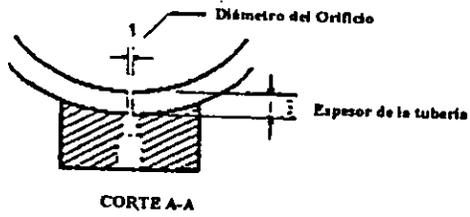
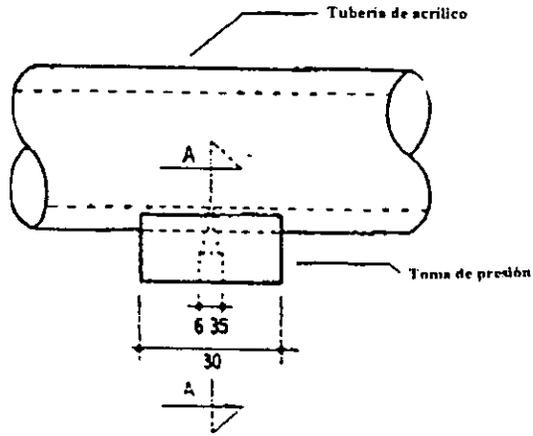


Fig. II.3. Distribución de las tomas de presión

Fig. II.4. Detalle toma de presión



- Separador de fases : está localizado al final de la tubería de acrílico y su función es separar las fases líquida y gaseosa una vez que han pasado por todo lo largo de la línea de prueba. Es un recipiente cilíndrico con entrada tangencial del flujo de mezcla. El aire se descarga a la atmósfera en el interior del laboratorio y el agua separada regresa por fuerza de gravedad a la cisterna por medio de una tubería de PVC de 2" de diámetro.
- Soporte: La estructura de soporte de la tubería de acrílico mide 18 m de largo y está compuesta de canaleta de lámina, pedestal, soportes ajustables para la tubería de acrílico. Sobre la superficie superior de la canaleta se perforaron 29 orificios, correspondientes a cada una de las tomas de presión realizadas sobre la línea de prueba.

SECCIÓN DE MEDICIÓN DE FLUJOS

Como se mencionó en la descripción de los sistemas de suministro de agua y aire, es en esta área donde se controlan los flujos. Por medio de válvulas de compuerta y globo (fig. II.2) y de placas de orificio instaladas en cada una de las líneas de conducción de flujos, 1 de aire y 2 de agua, para nuestro estudio. Las placas fueron diseñadas conforme a las normas ASME, y con base en los parámetros físicos de la instalación (tubería de 2" de diámetro, rango de velocidades para gas de 6 a 20 m/s y 0.10 a 0.50 m/s para agua, entre otros), se obtuvieron los siguientes coeficientes :

AGUA

$$\beta=0.30$$

para velocidades : $0.10 < = V_l < = 0.32 \text{ m/s}$

$$\beta=0.50$$

para velocidades : $0.27 < = V_l < = 0.93 \text{ m/s}$

AIRE

$$\beta= 0.45$$

Las placas de orificio cuentan con tomas de presión en las bridas, por lo que la caída de presión se mide por medio de transductores de presión diferencial, sistema que se describe en la siguiente sección.

* $\beta=d$ (orificio) / D (tubería)

SISTEMA DE ADQUISICIÓN AUTOMÁTICA DE DATOS

En esta sección se enumera y describe el total de equipos y aditamentos utilizados para la captura automatizada de los datos experimentales y su procedimiento :

EQUIPO

- Transductores de presión diferencial, piezorresistivos : utilizados en las placas de orificio tanto para la medición de flujo de aire como agua en la sección de medición de flujos.
- Transductores de presión absoluta, piezorresistivos : utilizados en la línea de pruebas
- Adquisitor de datos digital HP-3852A, equipado con 3 tarjetas multiplexoras HP-44709A de 20 canales, 1 tarjeta multiplexora de alta velocidad HP-44713A de 24 canales con compensación de temperatura, 1 voltímetro HP-44702B de alta velocidad : 100 kHz y 13 bits, 64 kB de memoria interna RAM y capacidad para adquisición de 64000 datos, tarjeta HP-IB 82321B, y programa de control en lenguaje HP-Basic 5.0
- Computadora personal Hyundai mod. Super 386D/33L, procesador 80386DX/33MHz, coprocesador PO387 DV 33 MHz, monitor SVGA color 14", disco duro de 120 MB, memoria RAM 8MB, unidades de disco flexible de 5 ¼ y 3 ½
- Fuente de alimentación digital : B&K-PRECISION, mod. 1660 :
 - Dos salidas independientes regulables de 0-30 volts CD ; 0-2 amperes,
 - una salida independiente regulable de 4-6,5 volts CD : 0-5 amperes,
 - las salidas de 0-30 volts se pueden utilizar a voltaje o a corriente constante,
 - Capacidad para conexión en serie 0-60 volts ; 0-2 amperes, para conexión en paralelo 0-30 volts ; 0-4 amperes.
- Caja de conectores : capacidad para 36 señales de presión por medio de conectores tipo BNC.

CONEXIÓN DE LOS TRANSDUCTORES DE PRESIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS

Los transductores de presión, distribuidos a lo largo de la línea de prueba y en las placas de orificio en la sección de medición de flujos, son conectados a la caja de conectores por medio de cable coaxial y se alimentan con la fuente digital. Para el caso de los transductores de presión absoluta, la tensión de abastecimiento es de 10 volts y producen una señal de salida de 1 a 6 volts. Para los transductores de presión diferencial, la alimentación es de 24 volts y de 4 a 29 mA de salida. La caja de conectores concentra todas las señales capturadas por los transductores y las adecúa según el caso, dado que el adquisitor de datos no puede leer corriente, convirtiendo sus mediciones entre 1.56 y 7.8 volts, antes de enviarlas a las tarjetas multiplexoras correspondientes.

Posteriormente las señales pasan a las tarjetas multiplexoras del Adquisitor de datos. Las señales de presión diferencial se conectan a la tarjeta HP-44704A y las de presión absoluta a la HP-44713A, que a su vez se conectan al voltímetro de alta velocidad.

El adquisitor de datos envía a su vez la información a la memoria RAM de la PC por medio de un cable tipo HP-IB y finalmente la PC controla y captura la información del adquisitor por medio de una serie de programas realizados por el personal del IIE (Ramón Sánchez S, 1993) en lenguaje HP Basic.

SOFTWARE

El sistema de adquisición de datos automatizado está controlado por tres programas esencialmente :

- CAPDI (captura digital): adquiere las señales de voltaje provenientes de los transductores de presión de la sección de medición de flujos (placas de orificio) las despliega y obtiene el promedio de una muestra de 100 datos. No almacena los datos procesados.
- CALIBRA : despliega señales de voltaje de los transductores de presión absoluta y es utilizado únicamente para la calibración de los transductores.
- CAPDATA : controla y adquiere las señales de voltaje de los transductores de presión de la línea de prueba, transformándolas a datos de presión, previa obtención e inserción en la rutina de la ecuación de calibración, almacenando finalmente los resultados de presión en el disco duro de la computadora.
- TRANSF : transforma los datos almacenados por CAPDATA en código binario HP-Basic a código ASCII estándar.

El control de algunas de las variables experimentales, tales como el número de transductores de presión a utilizar simultáneamente, el tiempo y el intervalo de muestreo de cada uno de ellos, se maneja editando el programa CAPDATA bajo algunas consideraciones y limitaciones físicas, como la memoria de la tarjeta del adquisitor de datos. El número máximo de datos de adquisición, delimitado por la memoria RAM, es de 64,000, pero tomando en cuenta que cada dato experimental capturado como un voltaje de corriente directa necesita 2 bytes, prácticamente el número máximo de datos es de 32,000 por corrida experimental.

Las ecuaciones que relacionan estas variables son :

$$T = n s$$

donde :

T= tiempo total de muestreo para cada sensor (seg)

s= intervalo de tiempo de muestreo (seg)

n= número de datos de adquisición para cada sensor

y

$$n = N/r$$

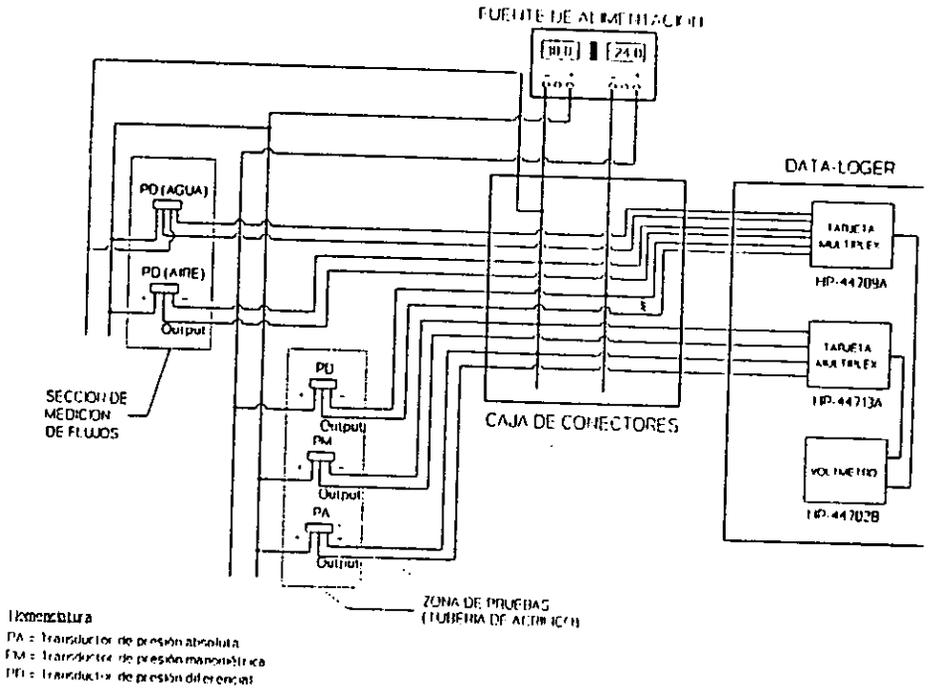
donde :

N= número máximo de datos de adquisición (32,000 datos)

r= número de puntos adquisición de datos (número de sensores a utilizar simultáneamente)

Por lo que una vez establecidas las variables experimentales, tiene que modificarse el programa CAPDATA, antes de ejecutarlo. Este programa, además de capturar y almacenar los datos adquiridos por los sensores, tiene la opción de despliegue gráfico, muy útil pues nos permite conocer el desarrollo de la experimentación antes de tener que procesar la información, aunque tiene el inconveniente de que no es posible imprimirlas en papel.

Fig. II.5. Arreglo de la conexión eléctrica de los transductores de presión



CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS

Las técnicas utilizadas para la calibración de los instrumentos de medición, se desarrollaron a partir de estándares de laboratorio y apoyados con el Sistema automatizado de adquisición de datos.

La calibración de los transductores de presión (fig. III.1) se realizó en estático por medio de un montaje hidráulico realizado en el laboratorio sobre la línea de pruebas (tubería de acrílico). Con los transductores instalados a lo largo de la línea, se cerró uno de los extremos de la tubería y se colocó en el otro un accesorio "T", alimentando agua en uno de los extremos de la "T" por medio de una bomba. Mientras que del otro lado se adoptó una salida hacia la columna hidrostática. Controlando con esta última la variación y el valor verdadero de la presión. La experimentación se apoyó con los programas CALIBRA y CAPDI.

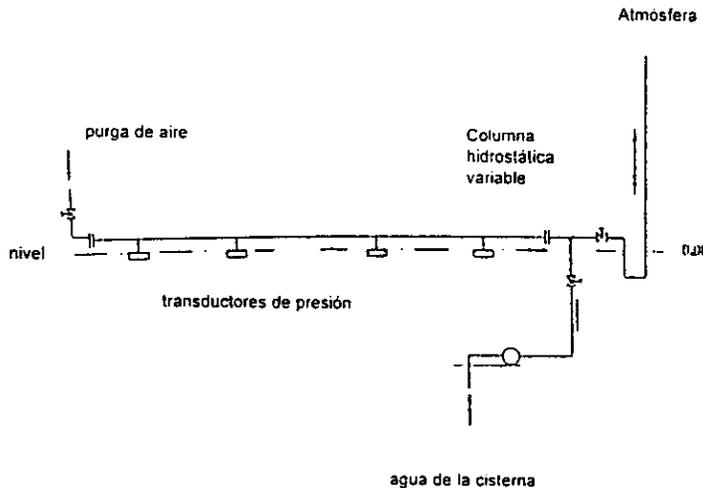


Fig. III.1. Calibración de transductores de presión absoluta

La calibración de las placas de orificio para agua se logró a partir de un método volumétrico y utilizando el programa CAPDI. El método consistió en medir el flujo volumétrico de agua, cronometrando los tiempos de llenado de un recipiente colocado en el extremo final de la línea de pruebas. Considerando algunas relaciones teóricas¹ se obtuvieron las ecuaciones de calibración correspondientes, que se muestran en la siguiente tabla:

¹ relación teórica entre la caída de presión a través del orificio de la placa y el flujo volumétrico
 $[Q = C (\Delta P)^{1/2}]$

Tabla III.1 Ecuaciones resultantes de la calibración

TIPO DE INSTRUMENTO	UBICACIÓN	EC. DE CALIBRACION	OBSERVACIONES
transductor de presión absoluta. PA-01	toma de presión 3, 28	$P=34898.23 V - 35295.30$	la ecuación se integra al programa CAPDATA
transductor de presión absoluta. PA-05	toma de presión 16	$P=34414.74 V - 26426.90$	la ecuación se integra al programa CAPDATA
transductor de presión absoluta. PA-06	toma de presión 22,	$P=34728.90 V - 32729.40$	la ecuación se integra al programa CAPDATA
transductor de presión absoluta. PA-11	toma de presión 10, 29	$P=34844.10 V - 32687.20$	la ecuación se integra al programa CAPDATA
transductor de presión diferencial para agua y placa de orificio de $d=0.805"$. PD-D	placa de orificio medición flujo de agua	$P=741496.6 V - 45.9664$ $Q=0.008738 (V)^{1/2} - 0.00001$	la ecuación se integra al programa VELOAGUA ²
transductor diferencial para aire y placa de orificio de $d=0.93"$. PD-B	placa de orificio medición flujo de aire	$P= 5389.79 V - 5783.60$	la ecuación se integra al programa VELOAIR ³

TÉCNICA EXPERIMENTAL DE DETECCIÓN DE LOS "SLUGS"

La técnica experimental utilizada en este trabajo para la detección de los "slugs", está apoyada en el uso del sistema de adquisición automática de datos descrito en el capítulo anterior. La técnica consiste en medir las variaciones de presión absoluta durante un tiempo de muestreo, para un valor puntual de velocidad superficial de líquido y gas determinado, a partir de sensores de presión instalados a lo largo de la línea de pruebas. Obteniendo con estos valores experimentales las gráficas de presión respectivas, en las cuales se puede observar la formación y desarrollo de los "slugs" y calcular su frecuencia de paso.

El programa CAPDATA (ver software, Sistema de adquisición automática de datos) captura las lecturas de presión registradas por los sensores de presión, en función del tiempo, procesándolas y almacenándolas posteriormente en un archivo como datos de presión absoluta (Pa) en código ASCII.

Los datos de presión absoluta, representados en código ASCII, posteriormente son leídos y desplegados gráficamente por LabVIEW, software para el manejo de datos que se detallará en el capítulo siguiente, para su análisis.

DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE EXPERIMENTACIÓN

La zona de pruebas se determinó obteniendo experimentalmente los límites para flujo "slug" en la instalación, apoyándonos con el mapa de Mandhane y tomando en consideración que dentro de ella no existiera ningún riesgo o daño físico tanto para la línea de pruebas, como para los instrumentos de medición.

Los rangos establecidos para las velocidades del gas fueron de 10.7 a 17 m/seg y para las velocidades de líquido de 0.21 a 1.11 m/seg, como puede observarse en la figura III.2 :

² secuencia de cálculo, que muestra la velocidad y el gasto volumétrico del flujo de agua

³ secuencia de cálculo, que muestra la velocidad y el gasto volumétrico del flujo de aire

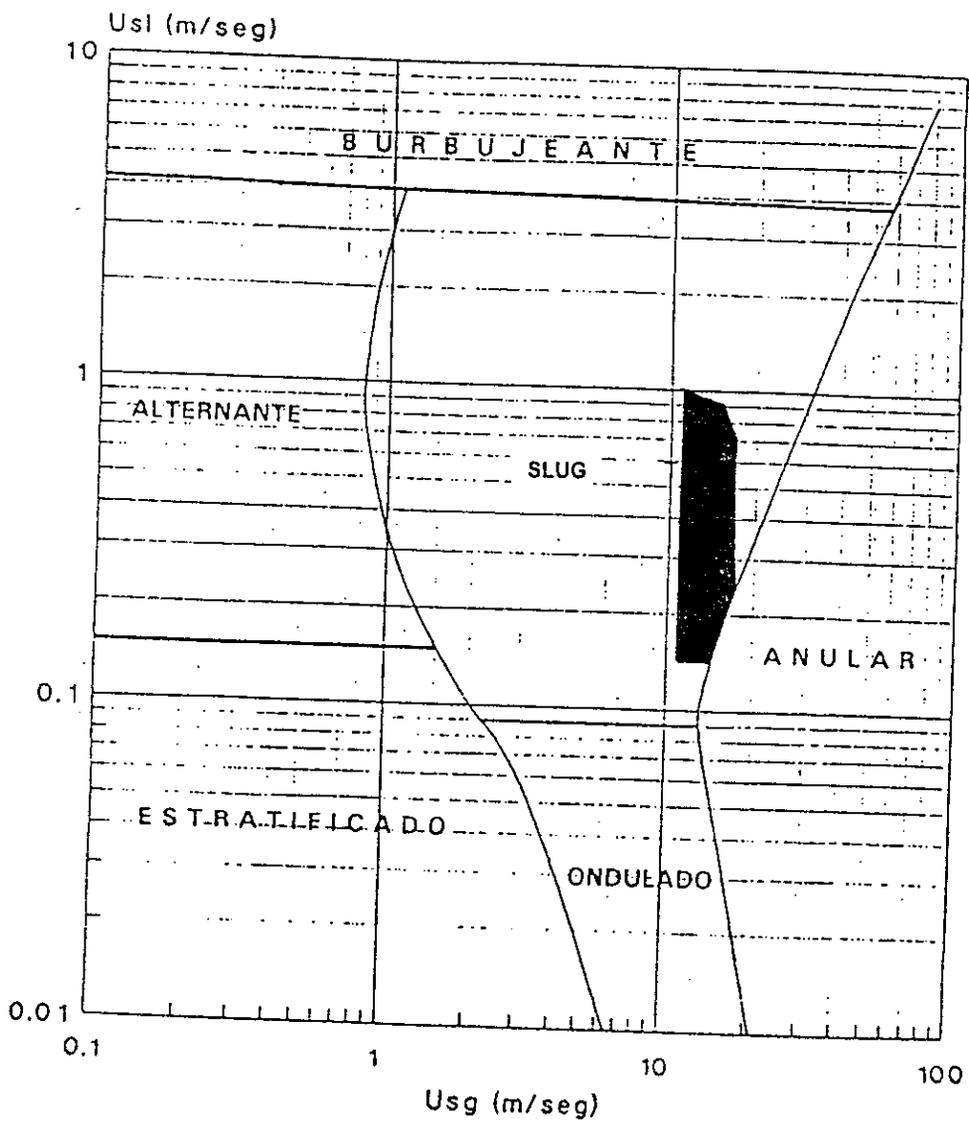


Fig.III.2. Localización zona experimental en el mapa de Madhane.

Dentro de esta zona de experimentación se efectuó un mallado (fig. III. 3) para seleccionar algunos puntos experimentales agrupados en series con respecto a la velocidad superficial del líquido y variando la velocidad superficial del gas, obteniendo finalmente un total de 45 puntos experimentales, en 7 series:

Serie 1

Punto	Qliq(m ³ /s)	Qgas(m ³ /s)
1	0.000361	0.02574
2	0.000361	0.0235
3	0.000361	0.0226
4	0.000361	0.02184
5	0.000361	0.019709
6	0.000361	0.01936
7	0.000361	0.01905
8	0.000361	0.01817

Serie 2

Punto	Qliq(m ³ /s)	Qgas(m ³ /s)
9	0.000507	0.02523
10	0.000507	0.02507
11	0.000507	0.02151
12	0.000507	0.02132
13	0.000507	0.01764
14	0.000507	0.01627

Serie 3

Punto	Qliq(m ³ /s)	Qgas(m ³ /s)
15	0.000644	0.02528
16	0.000644	0.02327
17	0.000644	0.02277
18	0.000644	0.02012
19	0.000644	0.01949

Serie 4

Punto	Qliq(m ³ /s)	Qgas(m ³ /s)
20	0.000931	0.0254
21	0.000931	0.0254
22	0.000931	0.02406
23	0.000931	0.0222
24	0.000931	0.02132
25	0.000931	0.02126
26	0.000931	0.01862
27	0.000931	0.018402

Serie 5

Punto	Qliq(m ³ /s)	Qgas(m ³ /s)
28	0.001226	0.02361
29	0.001226	0.023
30	0.001226	0.02277
31	0.001226	0.01991
32	0.001226	0.01928

Serie 6

Punto	Qliq(m ³ /s)	Qgas(m ³ /s)
33	0.001361	0.02322
34	0.001361	0.02151
35	0.001361	0.02091
36	0.001361	0.02069
37	0.001361	0.02058
38	0.001361	0.018402
39	0.001361	0.0184
40	0.001361	0.01694

Serie 7

Punto	Qliq(m ³ /s)	Qgas(m ³ /s)
41	0.001592	0.02085
42	0.001592	0.01949
43	0.001592	0.01851
44	0.001592	0.01794
45	0.001592	0.01697

V_{SL} (m/s)

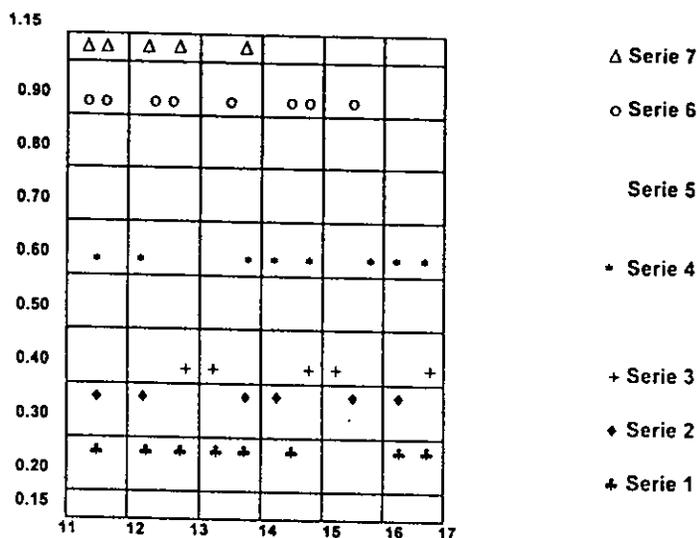


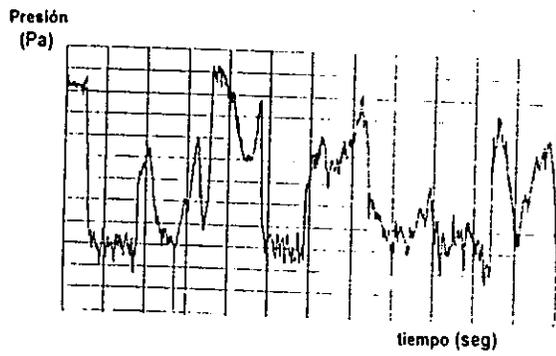
Fig. III.3 Ubicación de los puntos experimentales.

DETERMINACIÓN DE VARIABLES EXPERIMENTALES

Experimentaciones previas.

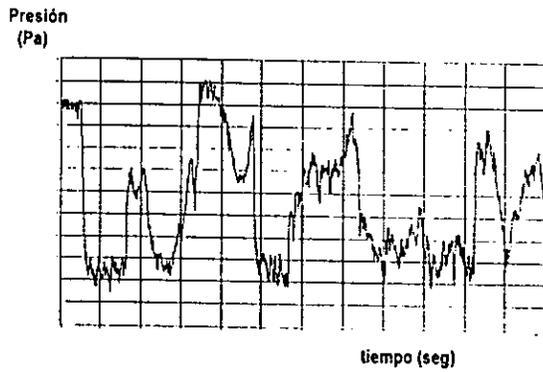
Con objeto de planificar la campaña de medición, se realizaron una serie de mediciones de exploración. Uno de los aspectos importantes observados durante las primeras experimentaciones, fue el aspecto que tomaban las gráficas de presión contra el tiempo, en relación a la ubicación de la toma de presión en la línea de pruebas (fig. III.4). Seleccionando cuatro tomas de presión con distancias distintas, con respecto a la entrada de la tubería (4.10 m, 9.63m, 11.53 y 17.06m) y utilizando los transductores de presión (PA-01 y el PA-11 PA-05 y PA-06) y el Sistema de adquisición automática de datos para la obtención de las lecturas de presión en cada punto simultáneamente, se obtuvieron las siguientes gráficas (gráficas III.1, III.2, III.3, III.4) respectivamente:

Gráfica III.1



señal adquirida a 4.10 m de distancia con respecto a la entrada de la tubería

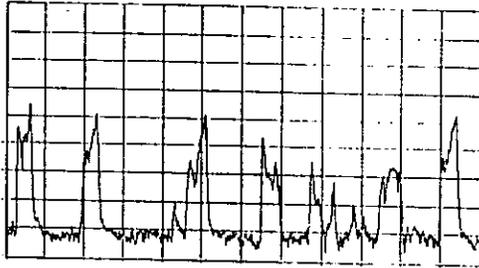
Gráfica III.2



señal adquirida a 9.63m de distancia con respecto a la entrada de la tubería

Gráfica III.3

Presión
(Pa)

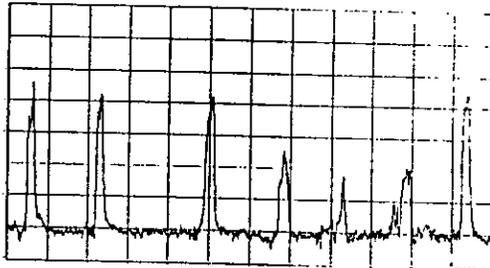


tiempo (seg)

señal adquirida a 11.53m de distancia con respecto a la entrada de la tubería

Gráfica III.4

Presión
(Pa)



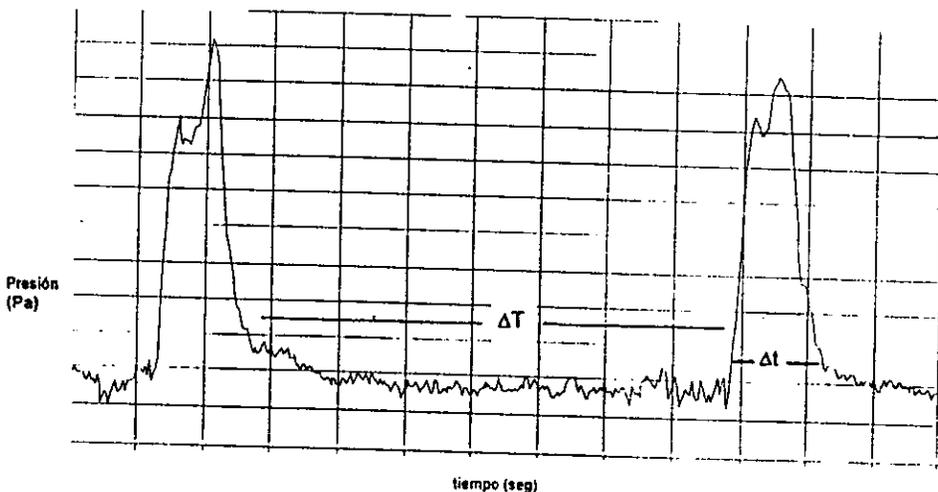
tiempo (seg)

señal adquirida a 17.06m de distancia con respecto a la entrada de la tubería

En las gráficas III.1 y III.2 observamos que hay sensibilidad con respecto al mezclado de los fluidos (agua - aire) y no se presentan las señales características de los "slugs", visualizando solamente las perturbaciones de presión del mezclado bilásico

En las gráficas III.3 y III.4 ya observamos definitivamente la señal referente a la presencia de los "slugs" completamente desarrollados. Es importante recordar que solamente una fracción de las ondas precursoras de "slugs" se convierten en "slugs" y que aun después de haber sido generados, algunos "slugs" pueden ser inestables y destruidos y es lo que nosotros llamamos conatos de "slugs". Por lo que realizar su seguimiento adquiriendo señales en dos puntos distintos a lo largo de la tubería nos ayuda a obtener valores confiables en nuestro estudio. Es decir donde podamos distinguir un "slug" completamente desarrollado y no confundirlo con un conato de "slug" que altere el cálculo de la frecuencia de paso, objetivo de nuestro trabajo.

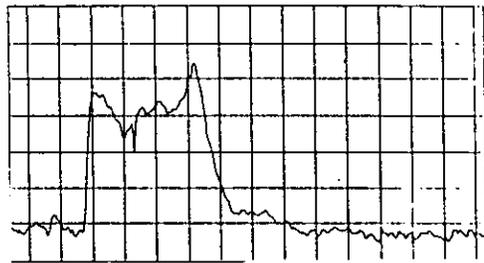
Otro aspecto importante de estas experimentaciones previas, fue que gracias a la capacidad de adquisición de datos de nuestro sistema de adquisición automática y la posibilidad de realizar mediciones de presión en intervalos de tiempo pequeños (milisegundos), podíamos observar en detalle, a partir de las gráficas de presión, la formación y desarrollo de un solo "slug" o "pico". Como se muestra a continuación :



Gráfica. III.5. Detalle de "slugs" de una gráfica de presión

En esta gráfica (III. 5), podemos observar la formación y desarrollo de un "slug", como va aumentando la presión (frente del "slug" pico) hasta alcanzar un máximo y después va decayendo hasta el punto de origen (final del slug) . Si cambiamos la escala de la gráfica y observamos de cerca (gráfica III.6) el cuerpo del "slug", distinguimos en realidad una meseta accidentada en lo que es el punto máximo y la diferencia de las pendientes de presión al frente y al final del "slug", siendo más pronunciada al final. Distinguimos el intervalo de tiempo que abarca el cuerpo de un "slug" o pico, Δt , y el intervalo de tiempo entre la formación de un siguiente "slug" o "pico" ΔT .

Presión
(Pa)



Tiempo (seg)

Fig. III.6. Detalle del "slug" de la gráfica de presión

Todos estos datos permiten realizar diversos estudios de este patrón de flujo y no solamente el que en este trabajo se propuso, por ejemplo obtener un modelo de formación y desarrollo del "slug". Para nuestro caso estas experimentaciones previas nos ayudaron, aparte de mostrarnos las características del cuerpo del "slug", a determinar el intervalo de tiempo de muestreo "necesario" para captar el "slug" o "pico".

Si consideramos que el cuerpo de un "slug" en promedio abarca 0.25 segundos el rango en el cual es posible rastrear un "slug", considerando nuestro Sistema de adquisición, tenemos que va de 0.0006 a 0.02 seg. Es importante recordar que el intervalo de tiempo de muestreo se relaciona directamente con el tiempo de muestreo total y con el número de sensores a utilizar en la corrida experimental, por lo que para seleccionar este intervalo dependerá de nuestros objetivos experimentales.

Ubicación de los transductores de presión.

Uno de los objetivos propuestos en este trabajo implicaba conocer la velocidad del "slug". Considerando que para su cálculo se estableció la ecuación de velocidad instantánea :

$$V = \Delta x / \Delta t$$

se requería seleccionar dos puntos de registro de la presión, a lo largo de la línea de pruebas, en los cuales se observarían los picos característicos de los "slugs", completamente desarrollados. Tomando en cuenta los resultados de las experimentaciones previas se seleccionaron las tomas de presión 27 y 29, (15.30 m y 17.05 m, con respecto al origen de la línea de pruebas, respectivamente) con una distancia de 1.75 m entre ellas y los transductores de presión PA-01 y PA-11 respectivamente.

El cálculo de la velocidad del slug para cada punto experimental se realizaría con el valor del incremento del tiempo de paso del slug, a partir de las gráficas de presión obtenidas en estos dos puntos de medición, y la distancia entre ellos:

$$V_{slug} = 1.75 \text{ m} / \Delta t$$

Tiempos de muestreo experimental.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el sistema de adquisición automática de datos contempla 32,000 datos de adquisición, como máximo, por corrida experimental. Considerando las ecuaciones involucradas en el programa de control de variables experimentales (CAPDATA) y que se requieren mediciones en dos puntos distintos, el número de datos de adquisición para cada sensor es de:

$$n^* = 32,000/2 = 16,000 \text{ datos}$$

La determinación del intervalo de tiempo de muestreo implica directamente el tiempo total de muestreo de cada sensor**, por lo que era importante considerar un intervalo de tiempo de muestreo que nos permitiera seguir en detalle la formación del slug y obtener un tiempo de muestreo total en el cual pudiéramos observar un número de "slugs" suficientes para realizar un análisis estadístico significativo. Considerando las experimentaciones previas se determinó :

- intervalo de tiempo de muestreo :

$$s = 0.006 \text{ seg}$$

- y tiempo total de muestreo para cada sensor:

$$T = 16,000 (0.006) = 96 \text{ seg}$$

n = N/r, n = número de datos de adquisición de cada sensor, N = número máximo de adquisición de datos, r = número de sensores a utilizar simultáneamente

** T = n s, T = tiempo total de muestreo para cada sensor, s = intervalo de tiempo de muestreo de cada sensor

TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

PROGRAMA PARA EL DESPLIEGUE GRÁFICO DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Los resultados de las experimentaciones, como se comentó anteriormente, son datos de presión absoluta (Pa) capturados con respecto al tiempo (seg), disponibles en código ASCII. Debido a que el estudio de la frecuencia de paso de los "slugs", en nuestro caso, se basa en el análisis de las gráficas de presión, se requería de un software que nos permitiera la manipulación gráfica.

LabView (Graphical Programming for Instrumentation. National Instruments) es una herramienta de desarrollo gráfico de aplicaciones específicas a medición e instrumentación, que trabaja bajo el entorno Windows. Esencialmente es un programa de uso general por medio del cual es posible muestrear datos de sistemas físicos, adquiridos por sistemas sensores, controlar su proceso de adquisición, almacenamiento, y despliegue gráfico. Además de numerosos elementos visuales que permiten la manipulación gráfica

En nuestro caso se desarrolló una aplicación específica, sobre esta herramienta, (**programa para el análisis de las muestras de presión**), la cual básicamente lee los datos experimentales, adquiridos previamente por nuestro sistema de adquisición automática de datos y disponibles en archivos en código ASCII, y los despliega gráficamente, permitiendo utilizar las ventajas visuales generales del LabView para el manejo de datos.

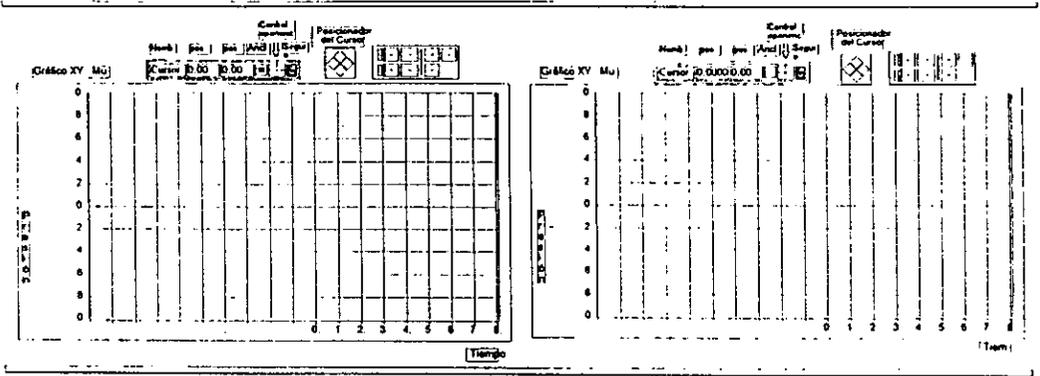
En la fig IV.1 se muestra las pantallas de interfase gráfica de este programa. La cual proporciona 6 pantallas individuales, cada una con botones de control que permite la interacción independiente con ellas: un menú de opciones de la herramienta (labView), una pantalla de control del programa análisis de muestras de presión y cuatro más que corresponden al despliegue de la señales de presión adquiridas de los distintos canales de captura y contenidas en el archivo de datos (ASCII).

La barra de menú, nos proporciona opciones generales de control de la herramienta LabView, cargar, editar, imprimir, etc.

La pantalla de control del programa (**análisis de muestras de presión**) nos permite seleccionar el archivo de datos que deseamos visualizar, cargarlo y detener su lectura en cualquier momento. Además nos va mostrando las líneas que va leyendo del archivo cargado.

Las pantallas que nos despliegan las gráficas de presión, nos permiten cambiar las escalas de graficación, movernos sobre los ejes y leer las coordenadas de los puntos que conforman las señales (valores de presión o tiempo), además de poderlas mandar a imprimir individualmente.

Fig. IV.1 Pantalla del Programa para el despliegue de muestras de presión



CARGAR ARC

¿ Se desea de cualquier modo del archivo?

Contenido del archivo
11 01 84056 6 84131.2

Lista donde se cargó
R.C. UNISDOC 143. ASC

Valor Límite de Picos
82500.0000
Máximo número de Puntos para un Pico

SELECCIONADOR de Señal a analizar
1

Balanceador de Pico de la Señal
80

Valor de P.C. Inicial
47.00

ESTADO ACT:
EJECUCIÓN CORRECTA HASTA EL MOMENTO

ETENE **CONTINU**

PROGRAMA PRINCIPAL

CALCULO DE LA FRECUENCIA DE PASO DEL "SLUG"

Identificación de los "slugs"

Si observamos con cuidado las gráficas de presión (gráficas IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5), podremos distinguir algunos "picos" que sobresalen con respecto a la línea de referencia marcada sobre la gráfica y otros se encuentran por debajo de ella. Recordando que bajo condiciones de flujo "slug", solamente una fracción de ondas precursoras de "slugs" se convertirán en "slugs" y otros aún después de haber sido generados, pueden ser inestables y destruidos ("seudoslugs"). Podemos considerar que algunos de los "picos" que observamos en estas gráficas corresponden a "slugs" y otros a "seudoslugs". Por lo que se hace necesario establecer un criterio que nos ayude a distinguir y a seleccionar "slugs" dentro de este total de "picos" registrados.

Las observaciones experimentales de Tronconi (1990) indican que en promedio cada onda precursora genera un slug, pero que solamente la mitad de ellos sobreviven mientras atraviesan la tubería.

Como se mencionó en capítulo 2, Lin y Hanratty (1987) desarrollaron un método gráfico para identificar los "slugs" y distinguirlos de los "seudoslugs" o perturbaciones que se mueven sin llegar a bloquear la sección transversal de la tubería. Ellos proponen analizar la pendiente del "pico" tanto en el frente como en la parte posterior. La presión en el frente es baja y se incrementa hacia un valor mucho más grande detrás cuando se trata de un "slug". El gradiente de presión detrás del slug es pequeño pero la presión se mantiene alta. En general un "slug" es identificado por que mantiene su identidad hasta alcanzar la salida de la tubería moviéndose aproximadamente a la velocidad del gas y permaneciendo coherente. Lo cual puede corroborarse experimentalmente midiendo la presión en dos puntos separados.

En nuestro caso los "slugs" alcanzan presiones altas en comparación con los "seudoslugs". Al comparar las gráficas de presión en los dos puntos de medición, se observó que las perturbaciones de presión que alcanzaban valores más bajos al 40% de la amplitud máxima se desvanecían al llegar a la segunda toma, por lo que se consideró conveniente tomar como valor crítico dicho límite para distinguir entre un slug y un "seudoslug". Coincidiendo finalmente con Lin y Hanratty en que en la mayoría de los casos basta tomar el análisis de la amplitud de las fluctuaciones de presión en un solo punto asignando un valor crítico

Entonces el criterio que establecimos para distinguir un "slug" es : un "pico" podrá ser considerado un "slug" si su amplitud rebasa el 40% del valor de la amplitud máxima registrada, para cada caso experimental, límite de presión (L_p).

Debido a que los picos no tienen un origen de presión igual a cero, es necesario involucrar en el cálculo del límite de presión (L_p), el valor de la presión de origen de los picos (P_o). Por lo que la expresión para el cálculo del límite de presión (L_p) es :

$$L_p = (P_{max} - (P_o) (0.40) + (P_o)$$

Cálculo de la frecuencia de paso de los "slugs".

Una vez establecido el criterio de selección de "slugs", la frecuencia de paso de los "slugs" (F), esta considerada como el número de "slugs" que pasan, por un punto fijo, en unidad de tiempo [1/seg ó hz].

Entonces el cálculo para cada caso experimental, se realiza contando manualmente el número total de "slugs" que aparecen en la gráfica de presión y dividiendo entre el tiempo de muestreo total (seg).

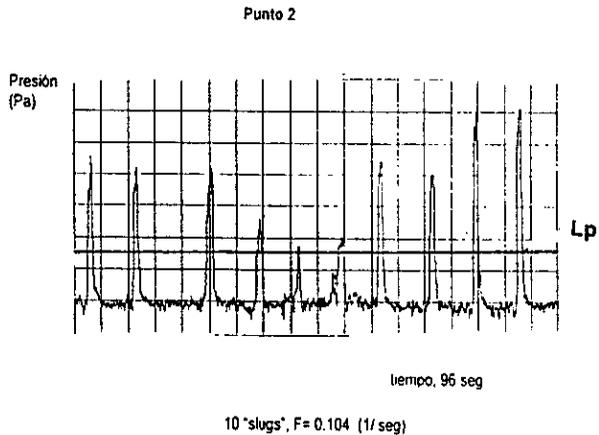
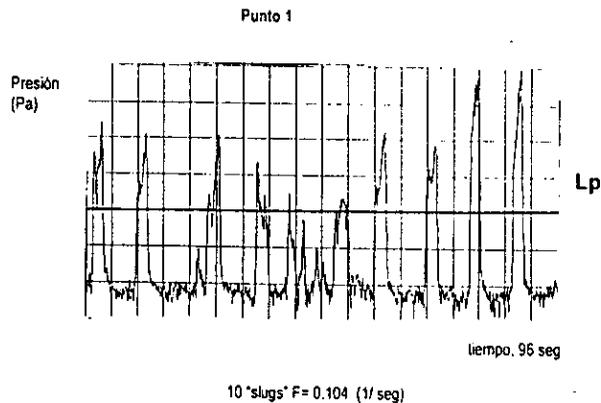
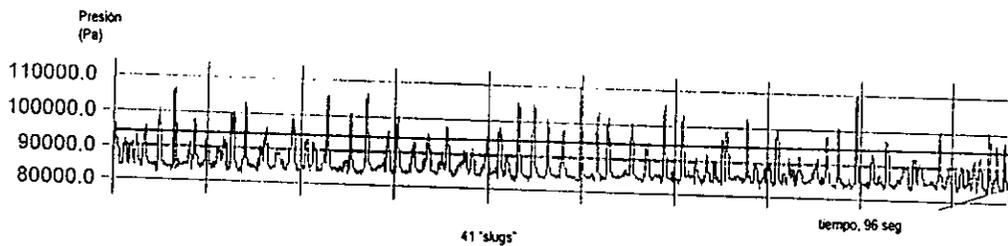


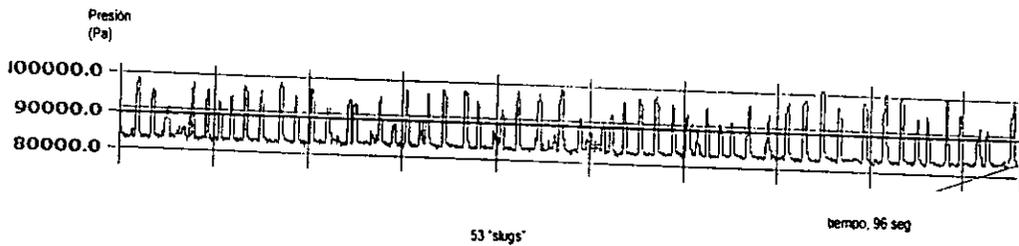
Fig. IV. 2. Conteo número de "slugs" de las gráficas de presión

ALGUNOS EJEMPLOS DE LAS GRÁFICAS DE PRESIÓN OBTENIDAS
EXPERIMENTALMENTE

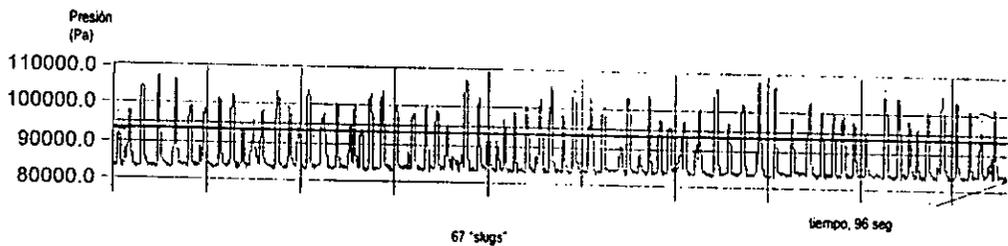
Gráfica IV.1
Punto experimental 1



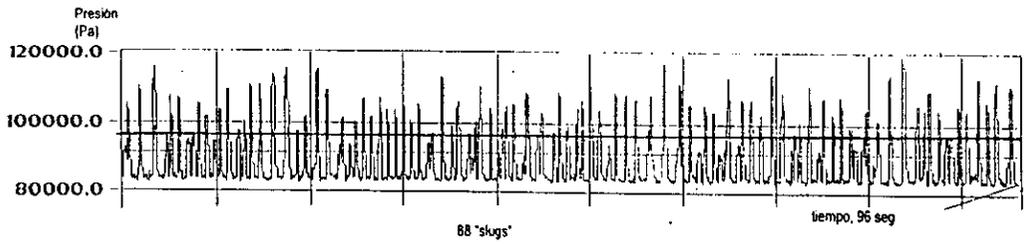
Gráfica IV.2
Punto experimental 13



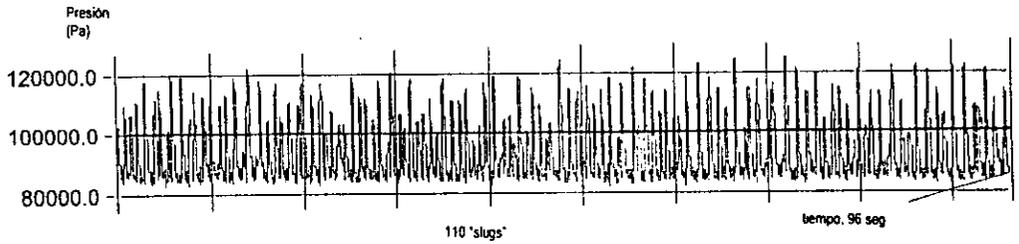
Gráfica IV.3
Punto experimental 18



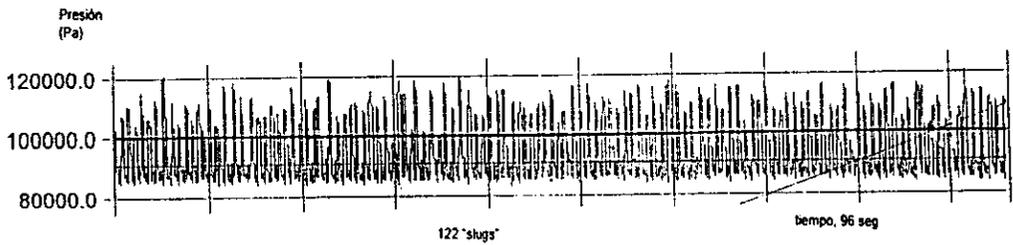
Gráfica IV.4
Punto experimental 23



Gráfica IV.5
Punto experimental 28



Gráfica IV.6
Punto experimental 42



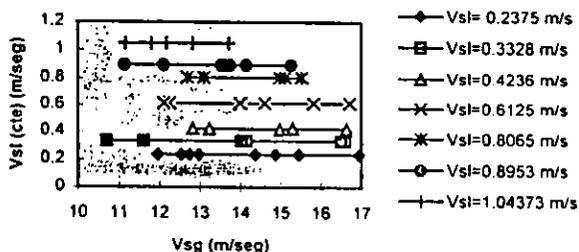
De este conjunto de gráficas de presión seleccionadas, podemos observar, (revisar localización de los puntos experimentales, capítulo III, pag. 45), que conforme aumentamos la relación de velocidades superficiales de líquido y gas, va aumentando el número de "slugs" y por lo tanto la frecuencia.

VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL LÍQUIDO

Los datos están agrupados en series con respecto a la velocidad superficial del líquido. Para cada serie se obtuvo el promedio de la velocidad superficial del líquido V_{sl} .

Gráfica IV.6

V_{sl} (cte) vs V_{sg}



El agrupar los datos experimentales en series con respecto a la velocidad superficial de líquido, es adoptada por varios autores, Gregory y Scott (1969), Tronconi (1990). Las velocidades superficiales del líquido son de menor magnitud en comparación con las velocidades superficiales del gas. La velocidad del "slug" es aproximadamente la de la velocidad superficial del gas, por lo que en un estudio de la frecuencia del "slug" la observación de la variación de la velocidad del "slug" con respecto a la frecuencia es indispensable.

Tabla IV.1. Resultados Experimentales

Serie 1.

Punto	V_{sl} (m/s)	V_{sg} (m/s)	F_{exp}	V_{slug} (m/s)	X	V_m
1	0.2375	11.95	0.375	11.66	0.5	17.17
2	0.2375	12.53	0.4375	9.66	0.54	15.69
3	0.2375	12.73	0.37	9.74	0.56	15.1
4	0.2375	12.96	0.4791	11.14	0.58	14.6
5	0.2375	14.36	0.5208	10.02	0.64	13.2
6	0.2375	14.86	0.4791	8.68	0.65	12.97
7	0.2375	15.46	0.5937	10.32	0.66	12.77
8	0.2375	16.93	0.427	10.2	0.68	12.19

Serie 2.

Punto	V_{sl} (m/s)	V_{sg} (m/s)	F_{exp}	V_{slug} (m/s)	X	V_m
9	0.3328	10.7	0.44	11.86	0.69	16.93
10	0.3328	11.6	0.55	12.68	0.69	16.82
11	0.3328	14.02	0.52	11.32	0.79	14.48
12	0.3328	14.15	0.57	11.32	0.8	14.35
13	0.3328	16.493	0.54	10.29	0.94	11.93
14	0.3328	16.598	0.66	9.51	1.01	11.03

Serie 3.

Punto	V_{sl} (m/s)	V_{sg} (m/s)	F_{exp}	V_{slug} (m/s)	X	V_m
15	0.4236	12.82	0.6875	14.29	0.85	17.05
16	0.4236	13.23	0.6979	13.56	0.91	15.73
17	0.4236	14.98	0.666	12.32	0.93	15.4
18	0.4236	15.3	0.7395	12.27	1.04	13.66
19	0.4236	16.63	0.7083	11.78	1.07	13.24

Serie 4.

Punto	V_{sl} (m/s)	V_{sg} (m/s)	F_{exp}	V_{slug} (m/s)	X	V_m
20	0.6125	12.1	0.8125	16.12	1.17	17.32
21	0.6125	12.25	0.7812	16.5	1.17	17.32
22	0.6125	13.98	0.8541	15.35	1.23	16.44
23	0.6125	14.02	0.8125	14.64	1.32	15.21
24	0.6125	14.6	0.927	13.3	1.37	14.63
25	0.6125	15.82	0.8958	13.25	1.37	14.59
26	0.6125	16.71	0.8437	13.15	1.54	12.86
27	0.6125	16.71	0.9375	12.77	1.55	12.71

Serie 5.

Punto	V_{ai} (m/s)	V_{vg} (m/s)	F_{exp}	V_{slug} (m/s)	X	V_m
28	0.8065	12.68	1.04	16.2	1.59	16.33
29	0.8065	13.09	1.01	16.35	1.63	15.93
30	0.8065	14.98	1.0208	15.62	1.64	15.78
31	0.8065	15.13	1.03	14.28	1.85	13.9
32	0.8065	15.53	1.1354	13.61	1.9	13.49

Serie 6.

Punto	V_{ai} (m/s)	V_{vg} (m/s)	F_{exp}	V_{slug} (m/s)	X	V_m
33	0.8953	11.14	1.01	18.71	1.77	16.17
34	0.8953	12.1	1.052	15.02	1.89	15.04
35	0.8953	12.1	1.0729	15.02	1.94	14.65
36	0.8953	13.53	1.1979	15.4	1.96	14.5
37	0.8953	13.6118	1.22	15.41	1.97	14.43
38	0.8953	13.75	1.104	14.11	2.17	13
39	0.8953	14.15	1.25	13.04	2.17	13
40	0.8953	15.27	1.27	12.45	2.33	12.04

Serie 7.

Punto	V_{ai} (m/s)	V_{vg} (m/s)	F_{exp}	V_{slug} (m/s)	X	V_m
41	1.0473	11.16	1.1979	15.35	2.23	14.76
42	1.0473	11.8	1.2395	13.61	2.37	13.86
43	1.0473	12.17	1.2083	13.72	2.47	13.22
44	1.0473	12.82	1.2604	13.3	2.54	12.84
45	1.0473	13.71	1.25	13.51	2.67	12.21

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DEL "SLUG".

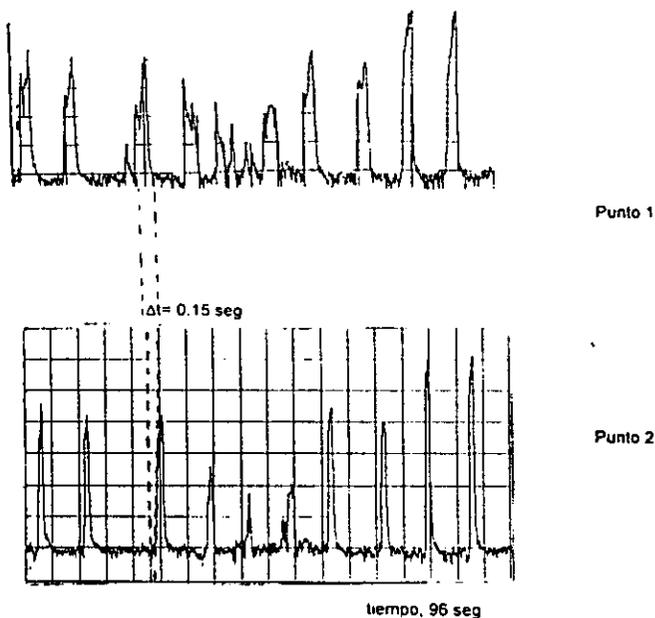
Apoyándonos en las ventajas visuales que proporciona el paquete LabView y a partir de las gráficas de presión obtenidas de los dos puntos de medición de manera simultánea, fue posible medir el intervalo de tiempo (Δt) en el cual un "slug" recorre la distancia que separa los dos puntos (1.75 m), permitiendo el cálculo de la velocidad de los "slugs" (V_{slug}) como :

$$V_{slug} = 1.75/\Delta t$$

La velocidad del "slug" que se reporta para cada caso experimental es una velocidad promedio, tomando en cuenta los primeros 20 "slugs" identificados en las gráficas de presión. Esta muestra representa entre 20 y 50% del total de los "slugs" existentes en cada caso experimental.

Gráfica IV.7
Cálculo de la velocidad del "slug"

Presión
(Pa)



CÁLCULO DE LA VELOCIDAD COMBINADA (V_m)

La velocidad combinada, V_m , es igual a suma de los valores de las velocidades superficiales de los fluidos componentes de la mezcla bifásica:

$$V_m = V_{SG} + V_{SL}$$

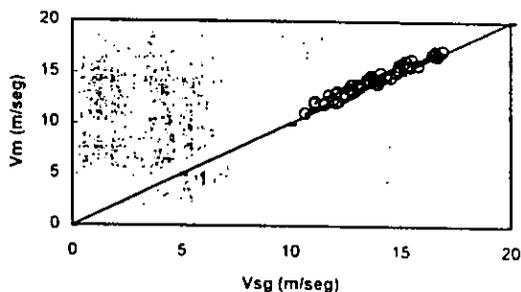
Gregory y Scott, 1968, relacionan la velocidad combinada, V_m con la velocidad del "slug", $V_{slug} = 1.35 V_m$, fundamento de su correlación experimental para el cálculo de la frecuencia de paso del "slug" (ver página 29).

Analizando esta variable para nuestros valores experimentales, obtenemos que si graficamos la velocidad combinada (V_m) contra la velocidad superficial del gas (V_{sg}), observamos que son muy cercanos (gráfica IV.8). Si consideramos que el rango de los valores experimentales de la velocidad superficial del líquido esta entre 0.21y 1.11 m/s y de la

velocidad superficial del gas entre 10.7 y 16.9 m/s. En nuestro caso la velocidad combinada no es un buen parámetro para correlacionar, ya que enmascara el valor de la velocidad superficial del líquido.

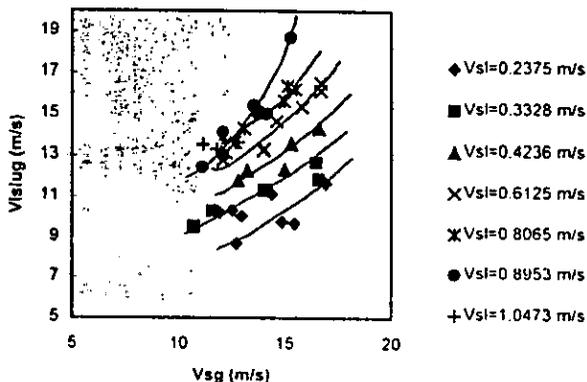
Gráfica IV.8

V_m vs V_{sg}



Gráfica IV.9

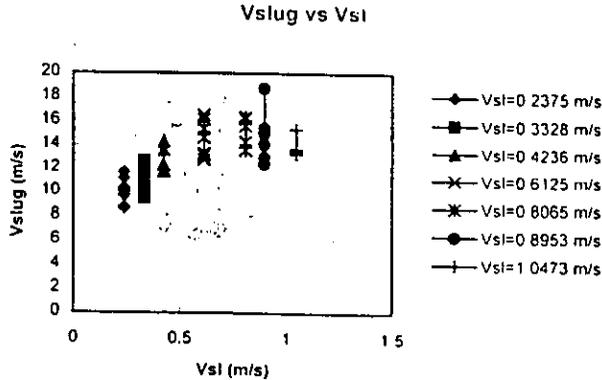
V_{slug} vs V_{sg}



Al correlacionar la velocidad del slug con la velocidad superficial del gas, que es cercana al valor de velocidad combinada (V_m), y comparando con la gráfica obtenida por Gregory - Scott para el mismo caso, observamos que no hay una tendencia lineal para el conjunto de datos, como en el caso de Gregory -Scott. Sino curvas diferenciadas para cada serie (gráfica IV.9).

Tomando en cuenta las observaciones de la gráfica anterior y recordando que el valor de la velocidad superficial del líquido es pequeña con respecto a la del gas, se podría concluir que la velocidad del "slug", V_{slug} , está dominada por la velocidad superficial del gas. Pero al graficar la V_{slug} con respecto a la velocidad superficial del líquido (gráfica IV.10), observamos que de manera general la velocidad del slug aumenta con la velocidad superficial del líquido.

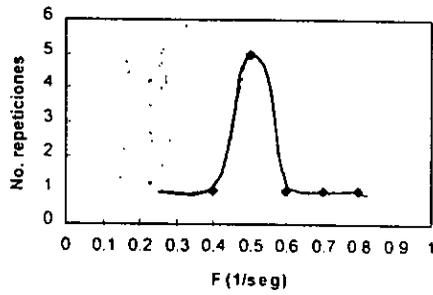
Gráfica IV.10



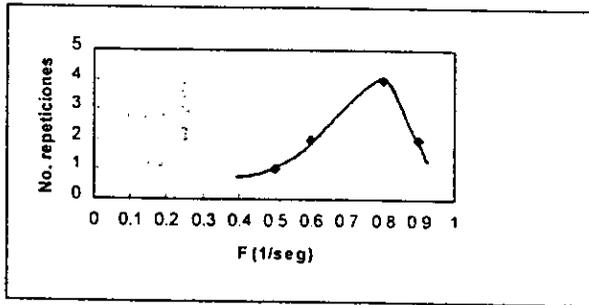
DISTRIBUCIÓN DE LA FRECUENCIA DE PASO DE LOS SLUGS

La frecuencia calculada a partir de los resultados experimentales (gráficas de presión), se obtuvo considerando el número de "slugs" existentes en el intervalo de tiempo total de muestreo, igual a 96 segundos. Como se comentó en el capítulo correspondiente a la experimentación, el propósito de obtener muestras con un intervalo de tiempo considerable, era el de poder subdividirlo y considerar entonces estas secciones o subintervalos como repeticiones experimentales. Considerando que uno de nuestros objetivos es analizar el comportamiento de la frecuencia en el tiempo, es decir, analizar si es correcto hablar de una frecuencia de paso del "slug" o de una distribución de frecuencias, realizamos los siguientes histogramas :

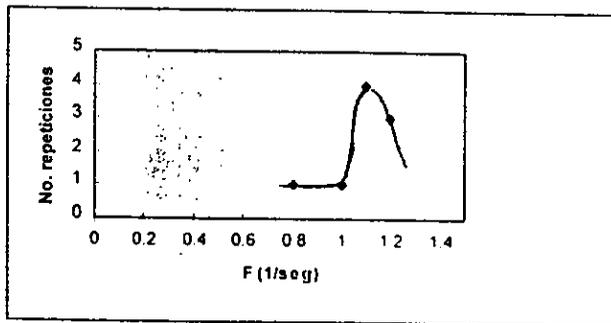
Gráfica IV. 15
Histograma caso 10



Gráfica IV.16
Histograma caso 16



Gráfica IV.17
Histograma caso 38



De las gráficas IV.15, IV.16 y IV.17, podemos apreciar que existe cierto grado de aleatoriedad en el fenómeno.

A continuación presentamos un análisis de la frecuencia promedio. Se seleccionaron 12 casos experimentales aleatoriamente, (25% de la población total), para realizar el cálculo de la frecuencia de paso del "slug" (de las gráficas de presión) de subintervalos de 10 segundos cada uno y obtener una frecuencia promedio, así como un análisis de su desviación estándar :

Tabla IV.2. Distribución de Frecuencias

caso	Fexp (promedio)	σ	C.V. (%)
9	0.677	0 1092	16 13
10	0.555	0 1230	22 16
11	0.555	0 1230	22 17
12	0.544	0 1013	18.52
16	0.744	0 1420	19.09
17	0.655	0 1130	17 25
29	1.033	0 1323	7 78
30	1 011	0 1054	10 42
34	1 117	0 0970	8 68
35	1.100	0 0700	6 36
38	1.088	0 1269	11 66
39	1.066	0 1118	10 48

En el trabajo experimental de Gregory-Scott (1969) se reporta una desviación máxima de alrededor del 20% del valor medio para la frecuencia

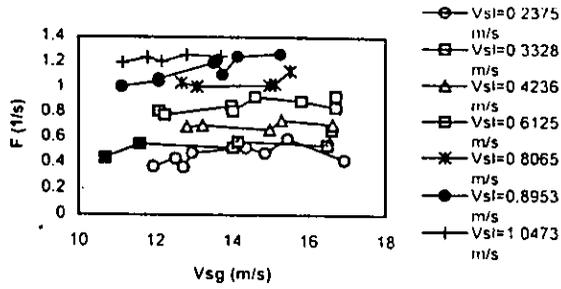
Consideramos que no existe una frecuencia de paso del "slug" sino una distribución de frecuencias. Sin embargo para efectos prácticos se puede considerar una frecuencia representativa o una frecuencia promedio.

LA FRECUENCIA PROMEDIO EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FLUJO

Uno de los objetivos de este trabajo es relacionar la frecuencia de paso de los "slugs" con parámetros que caracterizan al flujo y a los cuales el ingeniero tiene acceso, como son los gastos de cada fase o equivalentemente las velocidades superficiales, V_{sl} , V_{sg} , la velocidad del "slug", V_{slug} y el parámetro de Lockhart-Martinelli (X)

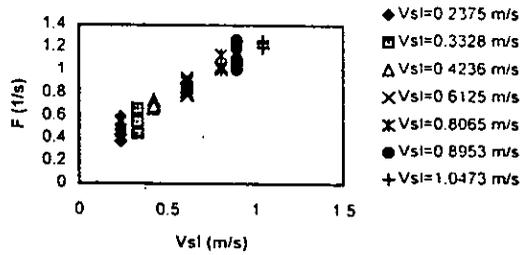
Gráfica IV.11

F vs Vsg



Gráfica IV.12

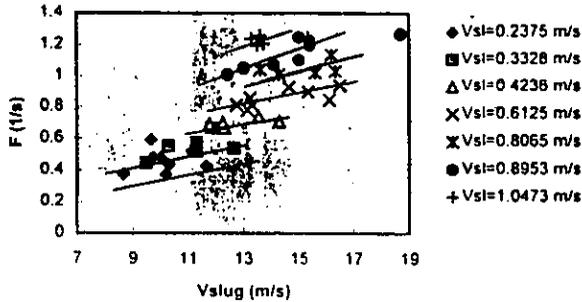
F vs Vsl



Podemos observar de la gráfica IV.11, que la frecuencia de paso del slug es prácticamente constante para cada velocidad del gas y aumenta conforme aumenta la velocidad superficial del líquido (gráfica IV.12).

Gráfica IV.13

F vs Vslug



Cabe esperar que la frecuencia del "slug" y su velocidad tenga una relación lineal, $V_{slug} = L \times F$, donde L es la longitud del "slug". Al graficar F en función de la V_{slug} , esperamos rectas cuyas pendientes son el inverso de la longitud.

Lo que podemos observar de la gráfica IV.13, es que la longitud del "slug", es función de la velocidad superficial del líquido y que al igual que la frecuencia, la longitud del "slug" es una variable aleatoria.

En esta perspectiva la idea de Gregory y Scott de ajustar la gráfica de frecuencia en términos de la velocidad del "slug" como parábolas nos parece incorrecta

Todas estas consideraciones muestran la importancia que ambas velocidades superficiales tienen sobre la frecuencia de paso del "slug", por lo que al buscar una correlación para F, es natural pensar en un parámetro adimensional que los considere, por eso el de Lockhart y Martinelli (X), es un candidato natural.

Cálculo del parámetro de Lockhart-Martinelli (X)

Como se comentó en capítulos anteriores, la importancia de considerar el parámetro de Lockhart-Martinelli en nuestro estudio radica en que involucra las caídas de presión en el flujo bifásico, permitiendo su aplicación en el dimensionamiento de tuberías y equipo. La ecuación que utilizaremos para su cálculo es:

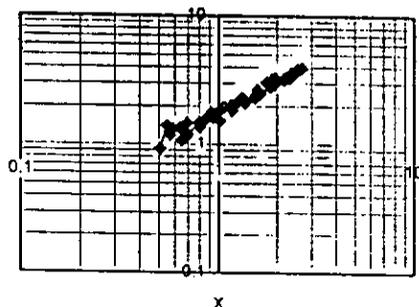
$$X = (v_{sl}/v_{sg})^{2/3} (\rho_l/\rho_g)^{3/8} (\mu_l/\mu_g)^{1/8} \dots (1.2.5)$$

El problema que presenta el utilizar este parámetro adimensional, para correlacionarlo con la frecuencia de paso del "slug" es la necesidad de utilizar una frecuencia adimensional. Tronconi propone una ecuación para calcular la frecuencia adimensional (Ω), involucrando las densidades de los fluidos, el diámetro de la tubería y la velocidad superficial del gas :

$$\Omega = (\rho_l F D) / (\rho_g V_{sg}) \dots (1.4.33)$$

Sustituyendo en la ecuación (1.4.33) nuestros valores experimentales, ρ_t , ρ_G , D , V_{SG} y F . Obteniendo entonces una frecuencia de paso de los "slugs" adimensional correlacionamos con el parámetro de Lockhart-Martinelli (X):

Gráfica IV.14
 Ω vs X



obteniendo, con nuestros datos experimentales, que existe una relación logarítmica entre el parámetro de Lockhart-Martinelli (X) y la frecuencia adimensional (Ω).

La selección de un parámetro adimensional para el caso de flujos bifásicos adquiere un grado de complejidad superior con respecto al de un proceso monofásico. La razón es que cualquier parámetro adimensional, obtenido por análisis dimensional puede multiplicarse por un cociente de magnitudes de cada una de las fases, densidades, viscosidades o velocidades, elevadas a una potencia n , dando origen así a una familia infinita de posibles parámetros adimensionales.

Para el caso de la frecuencia, Tronconi al reescribir la relación de Mishima-Ishii (ec. 1.4.18 de este trabajo) introduce el cociente adimensional ρ_G / ρ_L y explícitamente deja de lado los efectos de tensión superficial. El problema de adimensionalizar la frecuencia es entonces el de encontrar un tiempo adimensional. Esto se logra escogiendo escalas de longitud y velocidades características. Taitel y Dukler (1977), como se mencionó ya, usan el cociente D / V_{SL} mientras que Tronconi utiliza D / V_{SG} .

Puesto que la frecuencia es sensible a variaciones de ambas velocidades, el usar V_m como escala de velocidad resulta conveniente. Sin embargo en las condiciones experimentales en que se presente el slug ($V_{SG} \gg V_{SL}$) V_m se puede aproximar por V_{SG} , lo que justificaría la selección de Tronconi.

Como ya se mencionó, el motivo para adimensionalizar la frecuencia es explorar su relación con X el parámetro adimensional de Lockhart-Martinelli. Una de las razones para pensar que la frecuencia adimensional Ω , correlacionará bien con X es que la caída de presión para el flujo slug, que depende de la frecuencia, puede calcularse en términos de X .

Frecuencia del "slug"

◊ A partir del análisis de los resultados experimentales obtenidos en el presente estudio del patrón de flujo "slug", concluimos que no existe una frecuencia de paso del "slug", sino una distribución de frecuencias. Sin embargo dentro del margen de variación puede aceptarse un valor promedio para fines de diseño en ingeniería.

Correlaciones de la frecuencia con parámetros de flujo.

◊ Diversos investigadores encuentran una correlación directa entre la frecuencia de paso de los "slugs" y algunas de las variables experimentales que en nuestro trabajo fueron consideradas : V_{SG} , V_{SL} , V_{SLUG} , X .

Gregory y Scott (1969) obtienen una correlación empírica para la predicción de la frecuencia en función de la velocidad del "slug" correspondiente a una parábola para velocidades de líquido constantes. Ajuste incorrecto si consideramos que la relación entre la frecuencia del "slug" y la velocidad del "slug" es lineal, ($V_{SLUG} = L F$), y en la cual se involucra la longitud del "slug", L . Variable aleatoria al igual que la frecuencia.

Tronconi (1990) propone una correlación, con bases teóricas, para la frecuencia del slug, con buenos ajustes. El único inconveniente radica en que involucra variables, que presentan cierta dificultad en su medición o que simplemente no son de uso común, como es la velocidad real del gas, V_G , y la profundidad o altura del gas en equilibrio, h_G .

◊ La velocidad superficial del líquido y la velocidad superficial del gas, son variables distintivas del fenómeno del flujo "slug". Por lo que al buscar una correlación de la frecuencia deben ser consideradas.

◊ Tronconi (1990) establece una frecuencia adimensional, Ω , la cual correlaciona con éxito con el parámetro de Lockhart-Martinelli y al igual que con los datos experimentales de varios investigadores, los nuestros ajustan bastante bien a esta relación.

El acierto de esta correlación, dentro de la caracterización del fenómeno del flujo "slug", radica en involucrar parámetros adimensionales, X , Ω , y por tanto generalizados, los cuales nos dan un amplio margen de utilidad en el dimensionamiento y diseño de arreglos de tuberías, accesorios y equipos industriales.

Flujo "slug"

◊ El fenómeno del flujo "slug" es intrínsecamente no estacionario, por lo que algunos modelos que parten de la hipótesis contraria no logran una predicción acertada de la frecuencia. (Hubbard-Dukler 1975). Tronconi (1990), si considera un término de no estacionariedad, aunque de manera indirecta al tomar los resultados de Mishima-Ishii (1980). Por lo que su correlación para la frecuencia tiene mejores resultados.

◊ Entonces cualquier modelo o correlación para la frecuencia del "slug", debe contemplar el fenómeno del flujo "slug" como un fenómeno dependiente del tiempo.

Bibliografía

- Barnea D., Brauner N. (1985)
Holdup of the liquid slug in two phase intermittent flow
Int. J. Multiphase Flow, 11; 43
- Barnea D., Shoham O., Taitel Y (1980)
Flow pattern characterization in two phase flow by electrical conductance probe
Int. J. Multiphase Flow, 6; 387
- Chandrasekhar (1961)
"Hydrodynamic and hydromagnetic stability"
Dover Pub. New York
- Chisolm D. (1967)
A theoretical Basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow
Int. J. Heat Mass Transf, 10; 1767
- Dukler A.E., Hubbard M.G. (1975)
A Model for gas-liquid slug in horizontal and near horizontal tubes
Ind. Eng. Chem., Fundam, 14 (4); 337
- González H.R. (1993)
Análisis experimental de confluencias bifásicas
Tesis de licenciatura. Inst. Inv. Eléctricas
- Govier G.W., Aziz K. (1982)
The Flow of complex mixtures in pipes
Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar Florida.
- Gregory G.A., D.S. Scott (1969)
Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow
AIChE J. 15; 933

Jones O.C. (1979)
Two phase flow measurement techniques in gas-liquid systems
Presentado en un curso corto "Fluid Mechanics Measurements en Minnesota

Kago T., Saruwatari S., Ohno (1987)
Axial mixing of liquid in horizontal two phase slug flow
J. Chem. Eng. Japan, 20; 252

Knervold O., Vindoy V., Sontv (1984)
Velocity distribution in horizontal slug flow
Int. J. Multiphase Flow, 10; 441

Kokal S.L., Stanislav J.F. (1989)
An experimental study of two phase flow in slightly inclined pipes: II. Liquid holdup and pressure drop
Chem. Eng. Sci, 44; 681

Kokal S.L., Stanislav J.F. (1989)
An experimental study of two phase flow in slightly inclined pipes: I. Flow Patterns
Chem. Eng. Sci, 44; 665

Kordyban E (1990)
Horizontal slug flow: a comparison of existing theories
J. of Fluids Engineering, 112; 74

Kordyban E. (1985)
Some details of developing slugs in horizontal two-phase flow
AIChE J. 31(5); 802

Kordyban E.S. (1961)
A flow model for two-phase flow in horizontal tubes
J. Basic Eng., Trans. A.S.M.E., Ser.D, 83; 613

Kordyban E.S., Ranov T. (1970)
Mechanism of slug formation in horizontal two-phase flow
J. Basic Eng., Trans. A.S.M.E., 92; 857

Kubie J. (1979)
The presence of slug flow in horizontal two-phase flow
Int. J. of Multiphase Flow, 5; 327

Lin P.Y., Hanratty T.J. (1987)
Detection of slug flow from pressure measurements
Int. J. Multiphase Flow, 13 (1); 13

Lockhart R.W., Martinelli R.C. (1949)
Proposed correlation of data for isothermal two-phase flow component flow in pipes
Chemical Eng. Progress, 45; 1

Mandhane J.M., Gregory G.A. (1974)
A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes
Int. J. Multiphase Flow, 1; 537

Miles, J.W (1957)
On the generation of surface waves by shear flows
J. Fluid Mech, 3; 185

Mishima, K., and M. Ishii (1980)
Theoretical prediction of onset of horizontal slug flow
J. Fluid Eng, 102, 441

Nicholson M.K., Aziz K., Grego (1978)
Intermittent two phase flow in horizontal pipes: predictive models
Can J. Chem. Eng, 56; 653

Ramírez de Santiago Mario. (1992)
Estudio de confluencias bifásicas. Metodología de Análisis y descripción de la instalación experimental
Informe parcial, Inst. Inv. Eléctricas, Reporte 44151

Reinmann J., John H., Seeger (1981)
Experiments on the transition from slug to annular flow in horizontal air-water and steam-water flow
Presentado en Mtg Eur. Two-phase Flow Gp.

Sánchez Sánchez Ramón (1993)
Captura y Almacenamiento de datos experimentales
Informe parcial, Inst. Inv. Eléctricas, Reporte 44194

Taitel Y., Dukler A.E. (1977)
A model for slug frequency during gas-liquid flow in horizontal and near horizontal pipes
Int. J. Multiphase Flow, 3; 585

Taitel Y., Dukler A.E. (1976)
A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow
AIChE J. 22 (1); 47

Taitel Y., Dukler A.E. (1976)
A theoretical approach to the Lockhart-Martinelli correlation for stratified flow
Int. J. Multiphase Flow, 2; 591

Tronconi Enrico (1990)
Prediction of slug frequency in horizontal two-phase slug flow
AIChE J. 36 (5); 701

Tutu N.K. (1982)
Pressure fluctuations and flow pattern recognition in vertical two phase gas-liquid flows
Int. J. Multiphase Flow, 8; 443

Vermeulen L.R., Ryan J.T. (1971)
Two-phase slug flow in horizontal and inclined tubes
The Canadian J. of Chem. Eng, 49; 195

Wallis G. (1969)
One-Dimensional Two-phase Flow
McGraw-Hill Book Company

Weisman J., Duncan D., Gibso (1979)
Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines
Int. J. Multiphase Flow, 5; 437