

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VISCOSIDAD DEL LÍQUIDO EN LA TRANSICIÓN ESTRATIFICADO - NO ESTRATIFICADO PARA FLUJO BIFÁSICO GAS – LÍQUIDO EN TUBERÍA HORIZONTAL**

Presentado ante la Ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por la Br. Pesquera P., Mariangel D.

Para optar al Título

de Ingeniero Químico

Caracas, 2009

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VISCOSIDAD DEL LÍQUIDO EN LA TRANSICIÓN ESTRATIFICADO - NO ESTRATIFICADO PARA FLUJO BIFÁSICO GAS – LÍQUIDO EN TUBERÍA HORIZONTAL**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Andrés Rosales

TUTOR INDUSTRIAL: Msc. Adriana Brito

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Pesquera P., Mariangel D.  
Para optar al Título  
de Ingeniero Químico

Caracas, 2009

*A mi madre Luisa E. Piñango P.*

*A mis abuelos María Pérez de Piñango y Victoriano Piñango*

*Y a mi Tía Uhensa M. Piñango P.*

*Por ser los pilares fundamentales en mi vida,*

*Mis guías y ejemplo en todo momento.*

A *Dios*, por darme salud, vitalidad, voluntad, confianza y fuerza para lograr mis metas y enfrentar dificultades

A la *Universidad Central de Venezuela (Escuela de Ingeniería Química)*, por brindarme la oportunidad de crecer tanto intelectual como espiritualmente.

A mi madre *Luisa E. Piñango P.* por ser tan paciente, por su amor, cariño y apoyo incondicional en todo momento.

A mis abuelos *María Pérez de Piñango y Victoriano Piñango*, por ser ejemplo de lucha y constancia ante el deseo de ser cada día mejor.

A mi tía *Uhensa M. Piñango P.*, por haberme apoyado y orientado en todo momento en el transcurso de mi vida.

A la tutora *Msc. Adriana Brito*, por su confianza y colaboración en el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado.

Al prof. *Andrés Rosales* por su colaboración y asesoramiento en este Trabajo Especial de Grado.

Al prof. *Humberto Kum* por su orientación en mi vida profesional.

A todos los miembros de la pericia de transporte de fluidos y corrientes de producción de la gerencia EPMP que me ayudaron a comprender este tema de flujo bifásico e hicieron mi estadía en INTEVEP lo más placentera posible.

A todos mis amigos que compartimos alegrías y tristezas, dificultades y triunfos, a lo largo de la carrera profesional. De cada uno de ustedes aprendí muchísimo y siempre los tendré en mente y en el corazón.

A mis compañeros del **DIOC**, que siempre estuvieron dispuestos a colaborar con sus conocimientos y aporte en este trabajo.

A todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron con mi carrera profesional, pero que no he mencionado por falta de espacio...

**GRACIAS!!!**

Caracas, Noviembre de 2009

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Mariangel D. Pesquera P. titulado:

**“Evaluación del efecto de la viscosidad del líquido en la transición estratificado – no estratificado en flujo bifásico gas – líquido en tubería horizontal”**

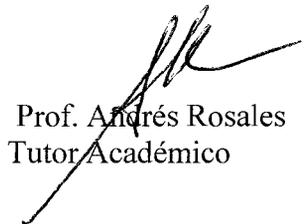
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Química y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Mary Luz Alonso  
Jurado



Prof. María Rodríguez  
Jurado



Prof. Andrés Rosales  
Tutor Académico



Msc. Adriana Brito  
Tutor Industrial



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**MENCIÓN HONORÍFICA**

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de la Escuela Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo de Grado, presentado por la Bachiller Mariangel Pesquera, portadora de la Cédula de Identidad CI: 18.039.953, bajo el título EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VISCOSIDAD DEL LÍQUIDO EN LA TRANSICIÓN ESTRATIFICADO-NO ESTRATIFICADO PARA EL FLUJO BIFÁSICO GAS-LÍQUIDO EN TUBERÍA HORIZONTAL, a los fines de cumplir el requisito legal para optar al título de Ingeniero Químico, acuerdan por unanimidad otorgar **Mención Honorífica**.

Para dar este veredicto, el Jurado estimó que la obra examinada representa un aporte importante de nuevos conocimientos en el área de FLUJO BIFÁSICO GAS -LÍQUIDO por contribuir con la validez de los modelos de transición estratificado-No estratificado de Kelvin Helmholtz en la predicción del patrón de flujo Rolling Wave en fluidos de alta viscosidad (1.5Pa.s)

En fe de lo cual se levanta la presente Acta, a los nueve días del mes de noviembre de dos mil nueve.

Prof. Mary Luz Alonso  
Jurado

Prof. María Rodríguez  
Jurado

MSc Adriana Brito  
Tutora Industrial

Prof. Andrés Rosales  
Tutor Académico

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>5</b>
<b>FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>5</b>
1.1.    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.2.    OBJETIVOS.....	7
1.2.1 <i>Objetivo General</i> .....	7
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	7
1.3.    ANTECEDENTES .....	8
<b>CAPITULO II .....</b>	<b>13</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
2.1.    ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL FLUJO BIFÁSICO .....	13
2.1.1 <i>Flujo Multifásico</i> .....	13
2.1.2 <i>Definiciones fundamentales de Flujo bifásico</i> .....	14
2.1.2.1  Fracción Volumétrica de Líquido.....	14
2.1.2.2  Velocidad Superficial de cada fase.....	15
2.1.2.3  Velocidad Actual (In-Situ) .....	15
2.1.2.4  Velocidad de Deslizamiento.....	16
2.2.    FENÓMENO FUNDAMENTAL DE FLUJO BIFÁSICO .....	16
2.3.    PATRONES DE FLUJO .....	19
2.3.1 <i>Patrón de Flujo en Tuberías Horizontales</i> .....	20
2.3.1.2.  Flujo estratificado .....	22
2.3.1.2.  Flujo Intermitente .....	22

---

2.3.1.3. Flujo Anular .....	23
2.3.1.4. Burbuja Dispersa .....	24
2.4. MAPA DE PATRÓN DE FLUJO .....	26
2.5. TRANSICIONES DE PATRONES DE FLUJO .....	29
2.5.1. <i>Transición Estratificado – No estratificado</i> .....	29
2.6. MODELOS MECANICISTAS PARA LA PREDICCIÓN DE LA TRANSICIÓN ESTRATIFICADO – NO ESTRATIFICADO .....	31
2.6.1. <i>Modelo de Taitel y Dukler (1976)</i> .....	31
2.6.2. <i>Modelo Kelvin-Helmholtz Viscoso y No Viscoso</i> .....	37
2.7. RELACIÓN ENTRE LOS MODELOS KELVIN-HELMHOLTZ VISCOSO Y NO VISCOSO EN TUBERÍA HORIZONTAL .....	43
2.8. EFECTO DE LA VISCOSIDAD DE LÍQUIDO EN EL FLUJO ESTRATIFICADO .....	45
2.9. PREDICCIÓN DEL PATRÓN DE FLUJO <i>ROLLING WAVE</i> .....	49
<b>CAPITULO III.....</b>	<b>51</b>
<b>METODOLOGÍA GENERAL .....</b>	<b>51</b>
3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	53
3.2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PATRONES DE FLUJO .....	53
3.3. PROGRAMACIÓN DE LOS MODELOS DE TRANSICIÓN ESTRATIFICADO - NO ESTRATIFICADO .....	55
3.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	61
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>62</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>62</b>
4.1. IDENTIFICACIÓN DEL PATRÓN DE FLUJO.....	62
4.2. DESARROLLO DEL PROGRAMA .....	69
4.3. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS PROGRAMADOS CON LA LITERATURA .....	75

---

4.4. COMPARACIÓN DE LOS MODELOS TD, IKH Y VKH CON DATOS EXPERIMENTALES Y PREDICCIÓN DE LA ZONA <i>ROLLING WAVE</i> .....	79
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>88</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>88</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>90</b>
<b>APÉNDICES.....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
[APÉNDICE A] TABLAS CON LOS DATOS EXPERIMENTALES AIRE - .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
AGUA .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
[APÉNDICE B] TABLAS CON LOS DATOS EXPERIMENTALES AIRE - KEROSENE .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
[APÉNDICE C] TABLAS CON LOS DATOS EXPERIMENTALES AIRE – PUROLUB 150 .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
[APÉNDICE D] TABLAS CON LOS DATOS EXPERIMENTALES AIRE – PUROLUB 320 .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
[APÉNDICE E] MÉTODO DE BISECCIÓN;	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
[APÉNDICE F] CODIFICACIÓN DEL ALGORITMO EN VISUAL BASIC .....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

**ÍNDICE DE FIGURAS**

FIGURA N° 1 FLUJO BIFÁSICO EN UNA TUBERÍA HORIZONTAL. (ADAPTADO DE SHOHAM, 2000).....	16
FIGURA N° 2 FLUJO MONOFÁSICO EN UNA TUBERÍA HORIZONTAL. (ADAPTADO DE SHOHAM, 2000).....	17
FIGURA N° 3 PARÁMETROS DEL FLUJO BIFÁSICO EN TUBERÍA HORIZONTAL. (ADAPTADO DE SHOHAM, 2000).....	18
FIGURA N° 4 PATRONES DE FLUJO EXISTENTES EN TUBERÍA HORIZONTAL. (ADAPTADO DE SHOHAM, 2006).....	25
FIGURA N° 5 MAPA DE PATRÓN DE FLUJO DE MANDHANE ET AL. (1974). (ADAPTADO DE SHOHAM, 2000).....	27
FIGURA N° 6 MAPA DE PATRÓN DE FLUJO DE BAKER (1954). (ADAPTADO DE HALE, 2000).....	28
FIGURA N° 7 CRECIMIENTO DE LA ONDA DE ESTRATIFICADO ONDULADO, <i>ROLLING WAVE</i> A FLUJO TAPÓN. (ADAPTADO DE KADRI ET AL., 2009).....	30
FIGURA N° 8 GEOMETRÍA DE FLUJO ESTRATIFICADO PARA TUBERÍA INCLINADA. (ADAPTADO DE SMITH, 1999) .....	33
FIGURA N° 9 ONDA FINITA EN TUBERÍA HORIZONTAL. (ADAPTADO DE SHOHAM, 2000).....	35
FIGURA N° 10 EFECTO DE LA VISCOSIDAD DEL LÍQUIDO EN LOS CRITERIOS DE ESTABILIDAD VKH E IKH. SISTEMA AIRE - LÍQUIDO, PRESIÓN ATMOSFÉRICA, TUBERÍA HORIZONTAL, DIÁMETRO 5CM. (ADAPTADO DE BARNEA, 1993) .....	44
FIGURA N° 11 EFECTO DE LA VISCOSIDAD DEL LÍQUIDO EN LAS CURVAS DE ESTABILIDAD NEUTRAL (AIRE - LÍQUIDO). (ADAPTADO DE BARNEA, 1991).....	46

FIGURA N° 12 LA INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD DEL LÍQUIDO EN LOS COEFICIENTES $K_V$ Y $K_{TD}$ . SISTEMA AIRE – LÍQUIDO, PRESIÓN ATMOSFÉRICA, TUBERÍA HORIZONTAL DE DIÁMETRO 5CM. (ADAPTADO DE BARNEA ,1991).....	47
FIGURA N° 13 CURVAS DE ESTABILIDAD NEUTRAL DE $h_L / D$ VS LA VELOCIDAD SUPERFICIAL DE GAS. SISTEMA AIRE – LÍQUIDO, PRESIÓN ATMOSFÉRICA, TUBERÍA HORIZONTAL, DIÁMETRO 5CM. (ADAPTADO DE BARNEA ,1991) .....	48
FIGURA N° 14 PREDICCIÓN DE PATRÓN DE FLUJO MEDIANTE LOS ANÁLISIS DE VKH E IKH. SISTEMA AIRE - AGUA, PRESIÓN ATMOSFÉRICA, TUBERÍA HORIZONTAL, DIÁMETRO DE 5CM. SL: FLUJO INTERMITENTE; ST: FLUJO ESTRATIFICADO; RW: <i>ROLLING WAVE</i> ; A: ANULAR. (ADAPTADO DE BARNEA, 1993).....	50
FIGURA N° 15 ESQUEMA DE ACTIVIDADES .....	52
FIGURA N° 16 SEGMENTO DE LA ZONA DE VISUALIZACIÓN DE LOS PATRONES/TRANSICIONES DEL CIRCUITO EXPERIMENTAL EN INTEVEP. ....	54
FIGURA N° 17 FOTOGRAFÍA DE LA UNIDAD TAPÓN CORRESPONDIENTE A FLUJO TAPÓN, CUANDO $V_{SL}$ : 0.099 m/s Y $V_{SG}$ : 0.69 m/s. (A) VISTA SUPERIOR, (B) VISTA FRONTAL .....	55
FIGURA N° 18 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO.....	57
FIGURA N° 19 IMAGEN DE PATRÓN DE FLUJO “ESTRATIFICADO LISO” EN SISTEMA AIRE - PUROLUB 320, EN TUBERÍA HORIZONTAL DE 5CM DE DIÁMETRO. ....	63
FIGURA N° 20 IMAGEN DE PATRÓN DE FLUJO “ESTRATIFICADO ONDULADO” EN SISTEMA AIRE - PUROLUB 320, EN TUBERÍA HORIZONTAL DE 5CM DE DIÁMETRO. ....	64
FIGURA N° 21 SUCESIÓN FOTOGRÁFICA DE FLUJO TAPÓN DE UN SISTEMA AIRE – PUROLUB 320 EN TUBERÍA HORIZONTAL DE 5CM DE DIÁMETRO A $V_{SL}=0.27$ M/S Y $V_{SG}=0.29$ M/S .....	65
FIGURA N° 22 SUCESIÓN FOTOGRÁFICA DE FLUJO BURBUJA ELONGADA DE UN SISTEMA AIRE –PUROLUB 320 EN TUBERÍA HORIZONTAL DE 5CM DE DIÁMETRO A $V_{SL}=0.011$ M/S Y $V_{SG}=0.295$ M/S .....	66

FIGURA N° 23 SUCESIÓN FOTOGRÁFICA DE FLUJO BURBUJA ELONGADA EN UN SISTEMA AIRE – PUROLUB 320 EN TUBERÍA HORIZONTAL DE 5CM DE DIÁMETRO A $V_{SL}=0.02\text{M/S}$ Y $V_{SG}=0.295\text{M/S}$ .....	67
FIGURA N° 24 FLUJO ANULAR EN AIRE-PUROLUB 150, EN TUBERÍA HORIZONTAL DE 5CM DE DIÁMETRO A $V_{SL}=0.036\text{M/S}$ Y $V_{SG}=7.58\text{M/S}$ .....	68
FIGURA N° 25 FLUJO BURBUJA DISPERSA EN AIRE-PUROLUB 150 EN TUBERÍA HORIZONTAL DE 5CM DE DIÁMETRO .....	69
FIGURA N° 26 HOJA INICIAL DEL PROGRAMA .....	71
FIGURA N° 27 HOJA DE GRÁFICO. “MAPA” .....	71
FIGURA N° 28 DIAGRAMA DE INESTABILIDAD DE FLUJO ESTRATIFICADO (ADAPTADO DE MATA ET AL. 2002) .....	75
FIGURA N° 29 VALIDACIÓN DEL MODELO DE TAITEL Y DUKLER PROGRAMADO CON LA LITERATURA.....	76
FIGURA N° 30 VALIDACIÓN DEL MODELO DE IKH PROGRAMADO CON LA LITERATURA.....	78
FIGURA N° 31 VALIDACIÓN DEL MODELO DE VKH PROGRAMADO CON LA LITERATURA.....	79
FIGURA N° 32 MAPA DE PATRÓN DE FLUJO DE UN SISTEMA AIRE – AGUA, EN TUBERÍA HORIZONTAL DE 5CM DE DIÁMETRO. ....	80
FIGURA N° 33 MAPA DE PATRÓN DE FLUJO DE UN SISTEMA AIRE – KEROSENE, EN TUBERÍA HORIZONTAL DE 5CM DE DIÁMETRO. ....	82
FIGURA N° 34 MAPA DE PATRÓN DE FLUJO DE UN SISTEMA AIRE – PUROLUB 150, EN TUBERÍA HORIZONTAL DE 5CM DE DIÁMETRO. ....	84
FIGURA N° 35 MAPA DE PATRÓN DE FLUJO DE UN SISTEMA AIRE – PUROLUB 320, EN TUBERÍA HORIZONTAL DE 5CM DE DIÁMETRO. ....	85
FIGURA N° 36 MÉTODO DE BISECCIÓN (ADAPTADO DE BURDEN, 2002) .....	<b>¡ERROR!</b>
<b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>	

---

---

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 1 CLASIFICACIÓN DE FLUJO DE DOS FASES (ADAPTADA DE ISHII Y HIBIKI, 2006).....	21
TABLA N° 2 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO ESTRATIFICADO LISO (AIRE - AGUA).....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
TABLA N° 3 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO ESTRATIFICADO ONDULADO (AIRE - AGUA).....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
TABLA N° 4 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO ANULAR (AIRE - AGUA).....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
TABLA N° 5 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE FLUJO INTERMITENTE – ANULAR (AIRE - AGUA).....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
TABLA N° 6 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE FLUJO INTERMITENTE –ESTRATIFICADO LISO (AIRE - AGUA).....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
TABLA N° 7 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO INTERMITENTE (AIRE - AGUA).....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
TABLA N° 8 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE FLUJO ANULAR - ESTRATIFICADO ONDULADO (AIRE - AGUA).....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
TABLA N° 9 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO INTERMITENTE (AIRE - KEROSENE).....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
TABLA N° 10 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO ANULAR (AIRE - KEROSENE).....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
TABLA N° 11 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO ESTRATIFICADO ONDULADO (AIRE - KEROSENE).....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

- TABLA N° 12 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN BURBUJA DISPERSA (AIRE - KEROSENE). ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 13 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE ESTRATIFICADO LISO – ESTRATIFICADO ONDULADO (AIRE - KEROSENE). **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 14 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE FLUJO INTERMITENTE –ESTRATIFICADO LISO (AIRE - KEROSENE). ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 15 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE ESTRATIFICADO ONDULADO – ANULAR (AIRE - KEROSENE). ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 16 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE INTERMITENTE – BURBUJA DISPERSA (AIRE - KEROSENE).. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 17 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO ESTRATIFICADO LISO (AIRE – PUROLUB 150). ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 18 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO ESTRATIFICADO ONDULADO (AIRE – PUROLUB 150). ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 19 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO INTERMITENTE (AIRE – PUROLUB 150). ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 20 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO BURBUJA DISPERSA (AIRE – PUROLUB 150). ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 21 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE FLUJO ESTRATIFICADO LISO –ESTRATIFICADO ONDULADO (AIRE – PUROLUB 150). ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 22 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO ANULAR (AIRE – PUROLUB 150). ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 23 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE FLUJO INTERMITENTE –ESTRATIFICADO LISO (AIRE – PUROLUB 150). .... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

- TABLA N° 24 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE FLUJO INTERMITENTE –ANULAR (AIRE – PUROLUB 150).**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 25 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE FLUJO ESTRATIFICADO ONDULADO-ANULAR (AIRE – PUROLUB 150)..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 26 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE FLUJO INTERMITENTE –BURBUJA DISPERSA (AIRE – PUROLUB 150). ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 27 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO ESTRATIFICADO LISO (AIRE – PUROLUB 320)..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 28 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO ESTRATIFICADO ONDULADO (AIRE – PUROLUB 320)..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 29 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE FLUJO ESTRATIFICADO LISO –ESTRATIFICADO ONDULADO (AIRE – PUROLUB 320)..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 30 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE FLUJO INTERMITENTE –ESTRATIFICADO LISO (AIRE – PUROLUB 320)..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 31 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO *ROLLING WAVE* (AIRE – PUROLUB 320).. ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 32 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO INTERMITENTE (AIRE – PUROLUB 320). ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 33 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO ANULAR (AIRE – PUROLUB 320)..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 34 DATOS EXPERIMENTALES CON EL PATRÓN DE FLUJO BURBUJA DISPERSA (AIRE – PUROLUB 320)..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
- TABLA N° 35 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE FLUJO INTERMITENTE –ANULAR (AIRE – PUROLUB 320).**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

TABLA N° 36 DATOS EXPERIMENTALES CON LA TRANSICIÓN ENTRE LOS PATRONES DE  
FLUJO ESTRATIFICADO ONDULADO-ANULAR (AIRE – PUROLUB 320)..... **¡ERROR!**  
**MARCADOR NO DEFINIDO.**

**NOTACIÓN DE VARIABLES**

A	:Área [m <sup>2</sup> ]
AN	:Anular
a,b	:Parámetros del modelo de estabilidad de Kelvin-Helmholtz [m/s]
BD	:Burbuja dispersa
BE	:Burbuja Elongada
c,e	:Parámetros del modelo de estabilidad de Kelvin-Helmholtz [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
d	: Parámetros del modelo de estabilidad de Kelvin-Helmholtz [(m.s <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]
C	:Coeficientes para determinar el factor de fricción [adimensional]
<i>d</i>	:Diámetro de la tubería [m]
D	:Diámetro hidráulico [m]
f	:Factor de fricción [adimensional]
H <sub>l</sub>	:Fracción volumétrica de líquido (volumen de líquido/volumen total) [adimensional]
H <sub>l</sub> (r,t)	:Fracción volumétrica de líquido instantáneo [adimensional]
h <sub>l</sub>	:Nivel de líquido [m]
$\hat{h}_l$	:Relación entre el nivel de líquido y diámetro [adimensional]
i	:Número imaginario
I	:Intermitente

---

IKH	:Kelvin-Helmholtz No Viscoso
$k$	:Número de onda
$K_{TD}$	:Factor de corrección Taitel y Dukler [adimensional]
$K_v$	:Factor de corrección Kelvin-Helmholtz Viscoso [adimensional]
$m, n$	:Constantes en la corrección del factor de fricción [adimensional]
$P$	:Presión [Pa]
$Q$	:Caudal volumétrico [m <sup>3</sup> ]
$t$	:Tiempo [s]
$Re$	:Número de Reynolds [adimensional]
$R$	:Relación entre áreas [adimensional]
RW	: <i>Rolling Wave</i>
$S$	:Perímetro [m]
EL,SS	:Estratificado Liso
ES	:Estratificado
EO,SW	:Estratificado Ondulado
TL,SL	:Flujo Tapón
$V, v$	:Velocidad real [m/s]
$V_{sl}, V_{sg}$	:Velocidad superficial de líquido y gas, respectivamente [m/s]
VKH	:Kelvin-Helmholtz Viscoso

$W$  :Caudal másico del fluido [kg/s]

### Símbolos sobre los literales

$\sim$  :Variable adimensionalizada

$'$  :Derivada con respecto a  $h_1$

### Letras Griegas

$\alpha$  :Ángulo de inclinación

$\varepsilon$  :Amplitud

$\mu$  :Viscosidad [cP]

$\rho$  :Densidad del fluido [kg/m<sup>3</sup>]

$\sigma$  :Tensión Superficial [N.m]

$\tau$  :Magnitud del esfuerzo de corte [N/m<sup>2</sup>]

$\varphi$  :Fracción vacía de gas [adimensional]

$\omega$  :Frecuencia Angular [s<sup>-1</sup>]

$\varepsilon/d$  :Rugosidad relativa de la tubería [adimensional]

### Subíndices

g	:Correspondiente al gas
l	:Correspondiente al líquido
i	:Correspondiente a la interfase fluido – fluido
m	:Correspondiente a la mezcla
t	:Correspondiente a la tubería
T	:Transversal
V	:Viscoso
IV	:No Viscoso
w	:Pared

## INTRODUCCIÓN

El flujo bifásico gas – líquido es de gran importancia debido al amplio rango de aplicaciones y se puede encontrar frecuentemente en la industria petrolera, química, nuclear y geotérmica. En la industria química se presenta en tuberías de entrada y/o salida de los reactores, calderas, columnas de destilación, condensadores y evaporadores, mientras en la industria petrolera se contempla a lo largo del sistema de producción, extracción y transporte de crudo y gas.

En consecuencia se han desarrollado innumerables investigaciones que abordan como tema central el flujo bifásico, dentro de este marco de ideas García (2004) expone que la necesidad de estudiar este tipo de flujo se orienta a la reducción de los costos asociados a la construcción y operación de los equipos, mediante la optimización del diseño de los diferentes componentes del sistema de producción. A su vez se requiere el estudio del flujo simultáneo de gas y de líquido en una tubería, para resolver los problemas presentes en la industria debido a la complejidad y las distintas distribuciones de patrones de flujo que puede adoptar este sistema bifásico.

Los problemas de ingeniería han sido resueltos vía soluciones rigurosas, simulación numérica y modelados mecanicistas. Los problemas asociados a flujo bifásicos según Shoham (2006) son abordados mediante los modelos mecanicistas; debido a la dificultad de resolver los sistemas de ecuaciones de flujo bifásico que contienen un gran número de variables y posee una configuración compleja de los fenómenos físicos relacionados a este tipo de flujo.

En general, los modelos mecanicistas combinan el análisis integral con el enfoque experimental, donde adoptan aproximaciones del fenómeno físico en estudio, tomando en cuenta los principios de conservación de la masa, cantidad de movimiento y de energía en un volumen de control; considerando la existencia de

patrones de flujo, el deslizamiento entre las fases, los promedios de las propiedades de los fluidos y las velocidades superficiales y reales de cada fase en la tubería.

Debido a la complejidad de los sistemas de flujo multifásico es necesario simplificar la descripción de los fenómenos físicos, de tal manera que el efecto predominante sea reflejado por modelos mecanicistas con un esfuerzo de cálculo razonable y sin influencia considerable en la solución final (Taitel, 1994). Básicamente, los modelos mecanicistas están limitados a un rango acotado de datos experimentales, sin embargo los resultados pueden ser extrapolados cubriendo una región más allá de la sostenida por los datos experimentales, aplicables a variaciones del sistema estudiado, como cambios en los flujos y propiedades físicas de los fluidos o propiedades geométricas de la tubería.

En este sentido, los modelos mecanicistas en flujos bifásicos permiten identificar los regímenes de flujo para una distribución de gas y líquido en la tubería y a través de ellos se puede representar mapas de patrones de flujo donde se muestran las transiciones entre cada patrón de flujo en función de variables independientes. De acuerdo a esto, cabe mencionar algunos de los modelos mecanicistas de flujo bifásico para la predicción de las transiciones de los patrones de flujo estratificado – no estratificado, como por ejemplo el modelo de Taitel y Dukler (1976) para tuberías horizontales y ligeramente inclinadas, junto al planteamiento propuesto por Barnea en 1980 para tuberías completamente verticales y además en el año 1987 Barnea presentó un modelo unificado válido para cualquier ángulo de inclinación. Así mismo, se tiene para la predicción del régimen de flujo tapón un modelo mecanicista de Hubbard y Dukler (1975) y los modelos de Wallis (1969) y Oliemans (1986) para el patrón de flujo anular.

En líneas generales, la investigación abarca el estudio de los modelos mecanicistas para la transición estratificado – no estratificado en tubería horizontal y como se comportan a medida que aumenta la viscosidad del líquido; teniendo como objetivo la evaluación del efecto de la viscosidad en las curvas de transición que

generan los modelos mecanicistas Taitel y Dukler (1976), Kelvin – Helmholtz Viscoso y No Viscoso. A partir de la identificación de los patrones de flujo existente en una tubería horizontal con datos experimentales en sistemas gas – líquido con viscosidad comprendida entre 1cP y 1500cP, establecer un algoritmo que permita construir las curvas de transición estratificado – no estratificado de los modelos mecanicistas, analizar el efecto de la viscosidad sobre las curvas ya descritas y a su vez evaluar la sensibilidad de las curvas de transición en la zona de patrón de flujo *Rolling Wave* en alta viscosidad.

La motivación del estudio de la transición estratificado – no estratificado ha surgido por la necesidad de identificar los patrones de flujo en tuberías bifásicas gas – líquido, útil para seleccionar las correlaciones en el cálculo de la caída de presión, término indispensable para el diseño de la tubería y a su vez para determinar la presión en cualquier punto del proceso, garantizando las condiciones requeridas por los equipos, la producción de la industria y por último y no menos importante el cumplimiento de las normas de seguridad.

El presente trabajo consta de cinco capítulos definidos de la siguiente manera: en el capítulo I se encuentran los fundamentos de la investigación, incluyendo el planteamiento del problema, el objetivo general, objetivos específicos y los antecedentes de la investigación. Luego en el capítulo II se hace referencia al marco teórico donde se destacan los fundamentos teóricos necesarios para comprender este trabajo especial de grado como las definiciones básicas en flujo bifásico, los patrones de flujo, los mapas de patrones de flujo, la transición estratificado con respecto al resto de los patrones de flujo y los modelos que la predicen, variante del patrón de flujo estratificado y el efecto de la viscosidad del líquido sobre la transición estratificado – no estratificado. En el capítulo III se describe la metodología aplicada en este trabajo de grado, la cual consiste básicamente en una revisión bibliográfica, seguida de la identificación de los patrones de flujo, la programación de los modelos de transición y finalmente el análisis de los resultados. El capítulo IV consiste en

presentar los resultados y su respectivo análisis. Y finalmente en el capítulo V se expondrán las conclusiones y recomendaciones originadas de la investigación.

## CAPÍTULO I

### FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se trata el problema a estudiar y sus generalidades, el objetivo general y los objetivos específicos, el propósito y antecedentes de la investigación.

#### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las corrientes bifásicas gas - líquido presentan un patrón de flujo según las propiedades y flujo volumétrico de cada fase, geometría del medio y condiciones de borde, las cuales tendrán un impacto sobre las variables de diseño de las tuberías, el desempeño de estas unidades de transporte y las condiciones requeridas en los equipos de la planta, que a su vez se asocia con los costos de inversión, operación y mantenimiento.

Al presentarse en la industria el flujo bifásico gas - líquido se pueden encontrar distintas distribuciones de cada fase, en la tubería horizontal se tienen los patrones de flujo estratificado liso o estratificado ondulado, donde las fases están separadas por la acción de la gravedad, adicionalmente se encuentra el no estratificado, donde sucede todo lo contrario e incluyen los patrones de flujo tapón de líquido, burbuja elongada, burbuja dispersa, anular y anular disperso. Todos estos patrones de flujo dependen básicamente de las razones másicas de gas y de líquido, las propiedades de los fluidos y el tamaño e inclinación de la tubería

Por lo tanto, al existir en la industria flujo bifásico se puede presentar cualquier patrón de flujo o simplemente encontrarse en la transición entre dos patrones de flujo y con el fin de realizar un diseño adecuado de las líneas de flujo que permita reducir los costos de inversión y los problemas operativos se plantea la necesidad de buscar herramientas que permitan predecir tanto la transición de los

patrones de flujo como su identificación en distintos sistemas a diferente viscosidad de líquido.

En este sentido, se genera este Trabajo Especial de Grado cuyo objetivo principal es evaluar el efecto de la viscosidad de líquido sobre las curvas de transición estratificado – no estratificado de los modelos mecanicistas: Taitel y Dukler, Kelvin-Helmholtz Viscoso y No Viscoso desarrollados para flujo bifásico gas - líquido en tubería horizontal. De esta manera, contribuiría con la industria petrolera con la evaluación de los modelos más usados en la industria, además de la formación académica dentro de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela.

Para evaluar el efecto de la viscosidad de líquido en los modelos de transición estratificado - no estratificado, se programará un algoritmo para los modelos mecanicistas que predicen esta transición, los cuales aplican las ecuaciones de balance de masa y de cantidad de movimiento forma simplificada para tubería horizontal y adicionalmente el criterio de inestabilidad de flujo estratificado para cada modelo. Pudiéndose evaluar los mapas de patrones de flujo a distinta viscosidad del líquido e identificar el patrón de flujo de los datos experimentales proporcionados por PDVSA-Intevep.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de la viscosidad de líquido en las curvas de transición estratificado – no estratificado de los modelos Taitel y Dukler, Kelvin-Helmholtz Viscoso y Kelvin-Helmholtz No Viscoso desarrollados para flujo bifásico gas - líquido en tubería horizontal.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar los patrones de flujos existentes en una tubería horizontal a partir de los datos experimentales en sistemas gas - líquido con viscosidad de líquido comprendida entre 1cP y 1500 cP.
- Desarrollar un algoritmo a partir de los modelos de Taitel y Dukler, Kelvin-Helmholtz Viscoso y Kelvin-Helmholtz No Viscoso, empleados para construir las curvas de transición de patrones de flujo estratificado liso, ondulado y no estratificado.
- Analizar el efecto de la viscosidad del líquido sobre las curvas de transición de patrones de flujo de Taitel y Dukler, Kelvin-Helmholtz Viscoso y Kelvin-Helmholtz No Viscoso, desarrollados para flujo bifásico gas - líquido en tubería horizontal.
- Validar con datos experimentales la capacidad de predicción de los modelos de transición estratificado – no estratificado de Taitel y Dukler, Kelvin-Helmholtz Viscoso y Kelvin-Helmholtz No Viscoso en la zona de patrón de flujo *Rolling Wave* en alta viscosidad de líquido.

### 1.3. ANTECEDENTES

A partir de 1950, los estudios de flujo bifásico fueron realizados en torno a la industria nuclear. Aún cuando cayó el trabajo de la industria nuclear en el área, propusieron otras aplicaciones como el aumento del uso de sistemas de flujo multifásico en la recuperación de crudo. Además ha estado en la mira una metodología de una solución generalizada para problemas de flujo bifásico, principalmente porque los sistemas de flujo bifásico gas – líquido, combinan la complejidad de la turbulencia con la deformación de las interfases. La simplificación de los problemas se ha obtenido tratando cada régimen de flujo de manera individual, debido al complejo comportamiento del flujo y la poca viabilidad para cálculos directos (Hewitt, 1996).

Los problemas de ingeniería asociados a flujo de dos fases han sido solucionados por modelado mecanicistas, de acuerdo a Taitel (1994); los modelos mecanicistas se han basado en simplificar la naturaleza del problema, verificar de forma experimental y extrapolar los resultados. Siendo este método de solución simple y logra alcanzar soluciones con menor esfuerzo, de allí surge la aplicación de este tipo de método, motivado por la complejidad del flujo bifásico y es necesario simplificar el problema capturando los efectos dominantes del fenómeno físico.

Dentro de los modelos mecanicistas que estudian el flujo bifásico asociado con el análisis de la transición de estratificado – no estratificado, se puede mencionar a Wallis y Dobson (1973) quienes realizaron aproximaciones para un sistema aire – líquido y consideraron el modelo de formación de tapones de líquidos como consecuencia de la inestabilidad de las pequeñas ondas sinusoidales en la interfaz. Con respecto a la representación de mapas de patrones de flujo se encuentra el trabajo realizado por Mandhane J., Gregory G. y Aziz K. (1974) quienes usaron datos experimentales aire – agua para trazar el mapa de patrón de flujo de velocidad superficial de líquido en función de la velocidad superficial del gas, dicho modelo predice correctamente la transición para sistema aire – agua, sin embargo al ser

aplicada a sistemas con diferentes propiedades, ya sea la variación del diámetro, cambio de los fluidos o ambos efectos la predicción del patrón de flujo comienza a dar resultados incorrectos (Alcalá, 2001).

Adicionalmente se presenta la primera propuesta de modelo mecanicista para predecir las transiciones de patrones de flujo en tubería horizontal y casi horizontal con flujo de gas - líquido de Taitel y Dukler (1976), donde se predice el régimen de flujo bifásico partiendo de la definición de flujo estratificado, considerándolo como el patrón de flujo de equilibrio y a partir de este patrón de flujo desarrollan las ecuaciones estableciendo las condiciones de transición. Lograron el modelo de transición mediante la recopilación de datos para distintos caudales y propiedades de los fluidos y la observación del flujo a través de una sección de tubería transparente; luego realizaron una búsqueda de mapa de datos en dos dimensiones para localizar los límites de transición entre los patrones de flujo intermitente, estratificado liso, estratificado ondulado, burbuja dispersa y anular - anular disperso

En 1980, Barnea et al. desarrollaron modelos matemáticos para predecir el patrón de flujo en toda la gama de baja inclinación, con datos sobre los patrones de flujo de transición para el flujo de gas - líquido en tuberías con flujo ascendente de  $0.25^\circ, 0.5^\circ, 1^\circ, 2^\circ, 5^\circ$  y  $10^\circ$  y flujo descendente de  $-1^\circ, -2^\circ, -5^\circ$  y  $-10^\circ$ . En el estudio emplearon probetas de conductancia y osciloscopio para la determinación de los patrones de flujo. Y concluyeron que las pequeñas desviaciones del ángulo de inclinación con respecto a la horizontal modifican considerablemente la transición de los patrones de flujo.

Lin y Hanratty (1987) trabajaron en la transición de flujo estratificado a los patrones de flujo: tapón de líquido y anular; observaron dos fenómenos, uno es el mojado de la pared superior de la tubería por las ondas de líquido de gran amplitud y el otro fenómeno es el desprendimiento de gotas de líquido que se van depositando y pegando en la parte superior de la tubería. Este último mecanismo está vinculado a

los altos valores de la velocidad del gas en la tubería. Además concluyeron que el mapa de patrón de flujo de Mandhane et al (1974) es bastante aceptable.

Andritsos et al. (1989) mostraron los resultados de sus experimentos y se encargaron de verificar el efecto de la viscosidad del líquido sobre la transición estratificado - tapón en tubería horizontal. Ellos sugirieron un mecanismo donde el precursor de la formación de los tapones de líquido es la aparición de ondas de corta longitud llamadas ondas de Kelvin-Helmholtz y presentaron evidencias de la aparición del flujo intermitente a bajas velocidades de gas y a la aparición de ondas irregulares de gran amplitud a altas velocidades del gas. Concluyendo que su mecanismo es aplicable para líquido con viscosidad alrededor de 20cP.

Barnea y Taitel (1990), consideraron la estabilidad en estado estacionario del flujo anular en cocorriente y en contracorriente. Realizaron una formulación de la transición estratificado - no estratificado basada en el modelo de los dos fluidos, obteniendo la inestabilidad de Kelvin Helmholtz, en su análisis. Utilizaron las ecuaciones de cantidad de movimiento y lograron obtener una correlación que se ajusta mejor considerando los esfuerzos de corte en la interfaz. Además incluyen la modificación de la correlación de Cheremissinoff, la cual se considera más robusta por tomar en cuenta la distribución de la velocidad en la fase líquido provocadas por el arrastre consecuente de las velocidades en la fase gaseosa.

Barnea (1991) realizó una investigación basada en los patrones de flujo: tapón y anular; comparó sus resultados con el modelo propuesto por Taitel y Dukler (1976) a distintos ángulos de inclinación con respecto a la horizontal, con el objetivo de estudiar el efecto de la viscosidad del líquido en la estabilidad de flujo estratificado gas – líquido aplicado en patrones de flujo de transición. El criterio para chequear el efecto de la viscosidad lo obtuvo combinando los análisis de los resultados de los modelos Kelvin-Helmholtz Viscoso y No Viscoso, sugerido para la determinación del principio de la variación del patrón de flujo estratificado ondulado, tapón y flujo anular. Este trabajo validó la inestabilidad del flujo estratificado considerando los

datos de patrones de flujo de Shoham (1982), comparando con el modelo de Taitel y Dukler en sistema aire – agua a presión atmosférica en tubería de 5cm de diámetro.

Barnea y Taitel (1993) analizaron las aproximaciones de los modelos Kelvin-Helmholtz Viscoso y No Viscoso para la estabilidad de flujo estratificado, en viscosidad de líquido comprendidas entre 1cP y 5000cP y varias inclinaciones en la tubería, quienes demostraron la aplicabilidad de cada modelo a medida que varía la viscosidad, soportando la interpretación de Barnea (1991) en sus análisis de los modelos Kelvin-Helmholtz Viscoso (VKH) y No Viscoso (IKH) en la predicción de la transición de flujo estratificado. Barnea y Taitel (1993) determinaron la aplicabilidad del modelo IKH para viscosidades superiores a 1cP y se enfoca en la diferencia en los resultados de los modelos VKH e IKH a bajas viscosidades de líquido, siendo éste el motivo principal de su trabajo.

Barnea y Taitel (1994) realizaron un estudio con el objetivo de discutir la estabilidad del régimen de flujo separado: anular y estratificado, mediante el análisis de estabilidad interfacial para examinar el comportamiento de las ondas y el análisis estructural el cual desarrolla una discusión de las aplicaciones para la estabilidad del flujo anular y estratificado. Considerando los modelos de Taitel y Dukler, Kelvin-Helmholtz Viscoso y Kelvin-Helmholtz No Viscoso a distintas viscosidad de líquido entre 1cP y 5000cP. Encontrando que la transición de flujo separados se puede realizar considerando el análisis de la longitud de la onda (unidimensional) y la estabilidad de las soluciones se puede considerar mediante el uso de dos tipos de inestabilidad: (1) el análisis de estabilidad de la interfaz, lo que indica que la interfaz es estable, y (2) el análisis de estabilidad estructural, que determina si la solución es estable con respecto al espesor de la película como promedio obtenido por la solución de estado estacionario, incluso si la interfaz es inestable.

A nivel nacional existen algunos trabajos relacionados a la transición estratificado – no estratificado como el trabajo de grado de Asuaje (1999), quien analizó el efecto de la viscosidad del líquido en los criterios de estabilidad de Kelvin-

Helmholtz para el flujo estratificado en un rango de 1 a 500 cP, buscando mejorar la predicción de esta frontera; analizando los modelos de Kelvin-Helmholtz viscoso y no viscoso para la predicción de la transición estratificado - no estratificado en tubería horizontal. Identificó los mecanismos de transición de flujo estratificado - no estratificado, analizó el efecto de la viscosidad del líquido en la transición para el rango de viscosidad mencionado, sugirió y desarrolló una mejora del modelo para la predicción de la transición estratificado – no estratificado.

Carvallo Raquel (1999) planteó el diseño y construcción de un equipo experimental para predecir la transición estratificado – no estratificado en flujo bifásico gas – líquido en la Universidad Simón Bolívar, con una tubería transparente (Diámetro interno de 3.16cm y Longitud de 30m), la instalación necesaria para calcular la caída de presión y visualizar los patrones de flujo tanto en tubería horizontal como inclinada (+/- 5°). Trabajó con aire y como fase líquida soluciones de NaCl (Cloruro de sodio) y glicerina. Se comprobó que un aumento en la viscosidad del líquido favorece la transiciones de régimen estratificado liso a ondulado y de estratificado – no estratificado.

La estabilidad de flujo estratificado gas - líquido ha sido estudiada por Mata et al. (2002), quienes compararon sus resultados de sistemas aire - agua y aire - aceite con diferentes teorías de inestabilidad de Kelvin-Helmholtz de flujo estratificado gas - líquido, entre las teorías discutidas se encuentra la de Jeffrey (1925,1926), Taitel y Dukler (1976), Lin y Hanratty (1986), Barnea y Taitel (1993) y Funada y Joseph (2001), quienes realizaron diferentes suposiciones y predicen límites de estabilidad muy diferentes. Concluyendo que las teorías de Taitel y Dukler, Lin y Hanratty y Barnea y Taitel llevan a cabo el análisis de la inestabilidad de las ondas largas sin tener que demostrar que las ondas cortas llevan al menor valor crítico de la inestabilidad. Funada y Joseph estudiaron la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz a todas las ondas y demuestran que las ondas críticas no están determinadas por la amplitud de la onda sino por la tensión superficial.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

En este capítulo de la investigación se desarrolla lo referente a las bases teóricas que comprende el conjunto de conceptos, definiciones, nociones y principios, que orientan sobre cómo habrá de llevarse a cabo el estudio además de fundamentar, sustentar e interpretar los resultados de la investigación. Este marco teórico incluirá conceptos como flujo multifásico, las variables fundamentales que influyen en el estudio de este sistema de flujo multifásico, los patrones de flujo y sus transiciones, el efecto de la viscosidad del líquido en la transición estratificado - no estratificado en el flujo bifásico gas - líquido en tubería horizontal y la predicción del patrón de flujo *rolling wave*.

#### **2.1. ASPECTOS FUNDAMENTALES DEL FLUJO BIFÁSICO**

##### **2.1.1 Flujo Multifásico**

Muchos sistemas involucran el flujo de una fase ya sea gas o líquido; sin embargo, en su lugar puede haber flujo multifásico definido por Crowe (2006) como la combinación de dos o tres fases que transitan a través de una tubería o conducto, como gas – líquido, gas – sólido, líquido – sólido, líquido – líquido, gas – líquido – líquido o gas – líquido – sólido.

El autor además acota que los sistemas multifásicos se pueden apreciar comúnmente en la vida diaria; por ejemplo, cuando coexisten en el yacimiento el crudo, gas y el agua, cuando se forman las rocas por el arrastre de las partículas sólidas por el aire o por el agua y en los procesos químicos como mezclado, emulsión y catálisis. En general, la presencia de los sistemas multifásicos está sujeta a la utilidad del fluido, la técnica aplicada y el estudio realizado al fluido.

El flujo bifásico que se va a estudiar está integrado por la combinación compleja gas – líquido, siendo compleja porque combina las características de una interfaz deformable y la compresibilidad de una de las fases, es por esto que surge la necesidad de desarrollar investigaciones desde la década de los 50, con la finalidad de comprender el comportamiento de flujo bifásico, enfocándose en cada uno de los patrones de flujo, la caída de presión y la fracción volumétrica de líquido (Shoham, 2006).

### 2.1.2 Definiciones fundamentales de Flujo bifásico

Esta sección presenta algunas definiciones de variables importantes, necesarias para comprender los aspectos relacionados al flujo bifásico.

#### 2.1.2.1 Fracción Volumétrica de Líquido

Shoham (2006) la define como la fracción de un elemento de volumen en el flujo bifásico ocupada por la fase líquida, en mezclas bifásicas gas - líquido siempre es mayor que cero y menor que uno, en caso de sólo fase líquida la fracción volumétrica de líquido vale uno y fase gaseosa es cero. Análogamente, se encuentra la fracción de volumen ocupada por la fase gaseosa, llamada fracción vacía de gas.

La fracción volumétrica de líquido y la fracción vacía de gas se pueden definir como las relaciones entre las áreas que ocupa cada fase y el área de la sección transversal de la tubería.

$$H_l = \frac{A_l}{A_T} \qquad \varphi = \frac{A_g}{A_T} \qquad (1)$$

Donde:

$A_l, A_g$ : Área que ocupa la fase líquida y gas, respectivamente.

$A_T$ : Área de la sección transversal de la tubería.

$H_l$ : Fracción volumétrica de líquido.

$\phi$ : Fracción vacía de gas.

### 2.1.2.2 Velocidad Superficial de cada fase

La velocidad superficial consiste en la relación entre el caudal volumétrico real de la fase dividido por la sección transversal de la tubería; es decir, es la velocidad referida a la fase si ésta ocupara toda el área de la tubería.

$$V_{sl} = \frac{Q_l}{A_T} \qquad V_{sg} = \frac{Q_g}{A_T} \qquad (2)$$

Donde:

$V_{sl}, V_{sg}$ : Velocidad superficial del líquido y del gas, respectivamente.

$Q_l, Q_g$ : Caudal volumétrico de líquido y gas, respectivamente.

### 2.1.2.3 Velocidad Actual (In-Situ)

Las velocidades superficiales no son las velocidades reales de cada fase, debido a que cada fase ocupa una sección de la tubería, es por esto que la velocidad real de las fases gas y líquido está definida de la siguiente manera:

$$V_l = \frac{V_{sl}}{H_l} \qquad V_g = \frac{V_{sg}}{1-H_l} \qquad (3)$$

Donde:

$V_l, V_g$ : Velocidad de líquido y gas respectivamente.

#### 2.1.2.4 Velocidad de Deslizamiento

Las velocidades reales de cada fase generalmente son diferentes, por lo tanto la velocidad relativa entre las dos fases se denomina velocidad de deslizamiento.

$$V_s = V_g - V_l \quad (4)$$

Donde:

$V_s$ : Velocidad de deslizamiento.

## 2.2. FENÓMENO FUNDAMENTAL DE FLUJO BIFÁSICO

Según Shoham (2006) la hidrodinámica del flujo de una sola fase en una tubería ha sido bastante estudiada, sin embargo el flujo simultáneo de dos fases es un proceso de transporte considerablemente complicado y se debe tomar en cuenta tanto la fase gaseosa como la fase líquida, como se muestra en la Figura N° 1. Las variables que se deben considerar en el flujo multifásico son el caudal másico o volumétrico de cada fase, sus propiedades físicas y de la tubería el diámetro y ángulo de inclinación.

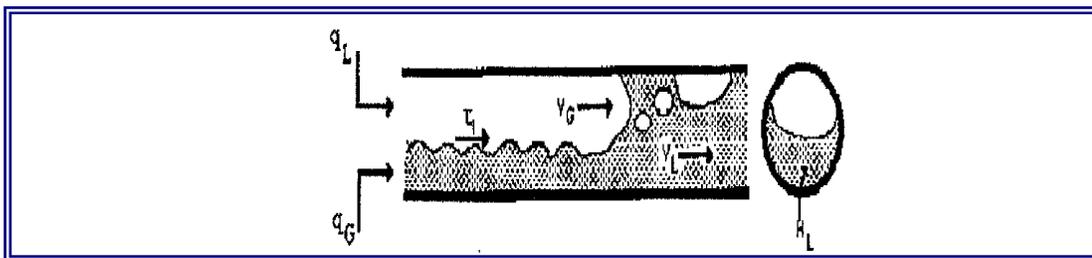


Figura N° 1 Flujo bifásico en una tubería horizontal. (Adaptado de Shoham, 2000)

Ishii M. y Hibiki T. (2006) también coinciden con Shoham (2006) en el sentido que las ecuaciones constitutivas para especificar la termodinámica, el transporte, las propiedades químicas de corrientes multifásicas son considerablemente

más complicadas que para flujo de una sola fase. La naturaleza compleja de dos o más fases origina la existencia de interfases móviles y deformables, lo cual garantiza la complejidad del sistema. De igual modo en los sistemas de flujo monofásico se pueden clasificar de acuerdo al régimen de flujo en laminar, de transición y flujo turbulento. En cambio, en dos fases el flujo se puede clasificar de acuerdo a la estructura de la interfaz en varios patrones de flujo, tales como: flujo separado, transición, flujo mixto y flujo disperso.

Cuando se tiene un sistema de una sola fase como se muestra en la Figura N° 2 donde se da el flujo másico, el diámetro de la tubería, el ángulo de inclinación y las propiedades físicas del fluido, es posible calcular la velocidad del fluido por continuidad, dada por la ecuación 6 y ya calculada la velocidad se determinan otras variables como la caída de presión.

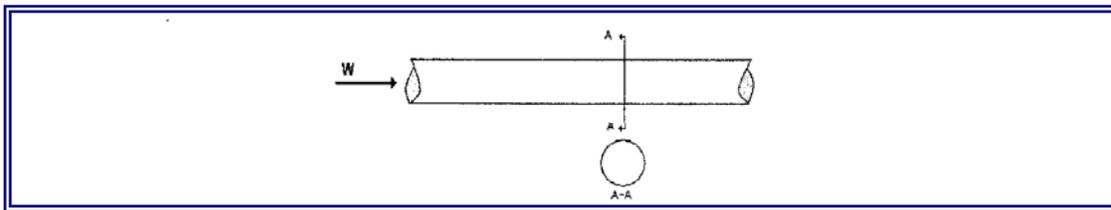


Figura N° 2 Flujo monofásico en una tubería horizontal. (Adaptado de Shoham, 2000)

$$W = \rho.v.A \quad (5)$$

Un análisis similar al de una fase se puede realizar en dos fases, como se muestra en la Figura N° 3, pero en este caso los parámetros de entrada son el caudal másico de gas y de líquido, inclinación y diámetro de la tubería y propiedades físicas de ambas fases, introduciendo la ecuación de continuidad para ambas fases:

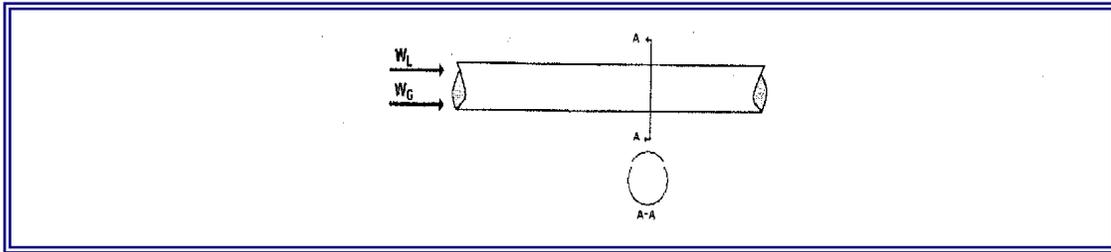


Figura N° 3 Parámetros del flujo bifásico en tubería horizontal. (Adaptado de Shoham, 2000)

$$W_l = \rho_l \cdot v_l \cdot A_l \qquad W_g = \rho_g \cdot v_g \cdot A_g \qquad (6)$$

Donde:

$$W_l = \rho_l \cdot v_l \cdot A H_l \qquad W_g = \rho_g \cdot v_g \cdot A (1 - H_l) \qquad (7)$$

Las dos ecuaciones de continuidad no pueden ser resueltas en forma sencilla, como se realiza en el sistema monofásico, debido a los términos  $v_l$ ,  $v_g$  y  $H_l$ ; se requiere de información adicional para resolver las ecuaciones y proceder a los cálculos de la caída de presión. Una simplificación del sistema puede ser realizada por el supuesto de que ambas fases se están moviendo en la misma velocidad ( $v_l = v_g$ , sin las condiciones de deslizamiento). Con esta hipótesis, las ecuaciones tienen dos incógnitas y se pueden obtener los valores de la fracción volumétrica de líquido y la velocidad de las fases. Esto permitirá continuar con los cálculos de diseño de tubería. Sin embargo, el caso más general surge cuando las velocidades del gas y el líquido no son iguales, para resolver esto se requiere un mayor análisis.

Las condiciones de no deslizamiento es cuando las dos fases viajan a la misma velocidad y la fracción volumétrica de líquido es simplemente igual a la relación de la tasa de flujo volumétrico de líquido y la tasa de flujo volumétrico total. La condición de no deslizamiento se presenta, por ejemplo, en el flujo homogéneo o flujo de burbujas dispersas, donde existe baja tasa de flujo de gas. Bajo estas condiciones de flujo, la fase de gas se dispersa como burbujas en una fase líquida continua. Debido a

la alta tasa de flujo de líquido, las burbujas de gas son arrastradas por la fase líquida a la misma velocidad.

Normalmente, el gas y el líquido no se mueven a la misma velocidad y ocurre un deslizamiento entre las dos fases. En flujo horizontal e inclinado hacia arriba, la fase gaseosa se mueve a mayor velocidad que la fase líquida, debido a la flotabilidad y las fuerzas de fricción de la fase líquida. En el flujo descendente, en virtud de condiciones de muy bajo caudal de gas, la fase líquida se puede mover más rápidamente que la fase gas.

### **2.3. PATRONES DE FLUJO**

Cuando el líquido y el gas fluyen juntos dentro de una tubería, ellos se disponen en diferentes configuraciones geométricas en la tubería llamados patrones de flujo. Estos patrones de flujo son caracterizados por una distribución que adoptan los dos fluidos y la interfaz (Omgba, 2004).

Shoham (2006) acota que la distribución en la interfaz es determinada por la fracción volumétrica de líquido que se asocia con la fracción volumétrica del gas y del líquido; es por ello que la existencia de patrones de flujo depende de las siguientes variables:

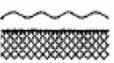
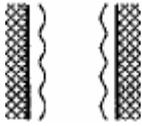
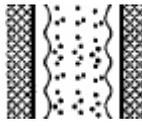
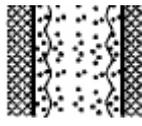
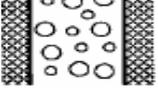
- Parámetros operacionales, como la razón de flujo de gas y de líquido.
- Variables geométricas que incluye el diámetro e inclinación de la tubería.
- Las propiedades físicas de las dos fases (gas - líquido) como la densidad, viscosidad y tensión superficial.

El análisis y estudio de los patrones de flujo son indispensables porque las variables de diseño dependen del régimen de flujo, la caída de presión, la fracción volumétrica de líquido, los coeficientes de transferencia de masa y calor, tiempo de residencia y la conversión de una reacción química, (Shoham, 2006).

### 2.3.1 Patrón de Flujo en Tuberías Horizontales

En sistemas de dos fases hay una variedad de configuraciones geométricas, las cuales dependen de las combinaciones de las dos fases involucradas, así como la existencia de una o varias interfases, las estructuras y discontinuidades que puede adoptar la interfaz. Clasificar el sistema de dos fases de acuerdo a la combinación de las fases es fácil ya que en condiciones normales sólo tenemos tres estados de materia, sólido, líquido y gas. La segunda clasificación está basada en la forma de la interfase y la distribución geométrica de cada fase. En la siguiente tabla se muestra la clasificación revisada por los regímenes de flujo de Ishii M. y Hibiki T. (2006) de acuerdo a la geometría de las interfases, donde se pueden dividir en tres clases principales: flujo separado, transición o flujo mixto y el flujo disperso, como se muestra en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1 Clasificación de flujo de dos fases (Adaptada de Ishii y Hibiki, 2006)

CLASE	TIPO DE RÉGIMEN	GEOMETRÍA	CONFIGURACIÓN	EJEMPLO
FLUJO SEPARADO	Flujo de película		Película de líquido en gas, o viceversa	Condensación o ebullición en película.
	Flujo Anular		Líquido en el núcleo y gas en las paredes de la tubería o viceversa.	Ebullición de película. Rehervidor.
	Flujo de Chorro		Chorro de líquido en gas o viceversa.	Atomización. Condensador Jet
MEZCLA O TRANSICIÓN DE FLUJO	Flujo Tapón		Paquete de gas en el líquido.	Ebullición de sodio en convección forzada.
	Flujo Anular con Burbuja Dispersa		En el núcleo transita el gas y en la película de líquido de las paredes hay burbujas de gas.	Evaporación con nucleación en la pared.
	Flujo Anular con Gotas Dispersas		Película de líquido en las paredes de la tubería y el núcleo de la tubería transita gas con gotas de líquido.	Generador de vapor. (Caldera)
	Flujo Anular con Gotas y Burbujas Dispersas		Núcleo de gas con gotas de líquido y la película de líquido con burbujas de gas.	Canal de reactor de ebullición nuclear.
FLUJO DISPERSO	Burbuja Dispersa		Burbujas de gas en líquido	Reactor químico
	Flujo Mixto		Gotas de líquido en el gas.	Spray de refrigeración.

Continuando con los diferentes patrones de flujo en este trabajo especial de grado nos vamos a enfocar en tubería completamente horizontal, cuyos patrones de flujo son:

### **2.3.1.2. Flujo estratificado**

Es el patrón de flujo donde el líquido fluye por el fondo y el gas por encima del líquido en la tubería, habiendo una separación de las dos fases debido al efecto causado por la fuerza de gravedad. Adicionalmente, el régimen estratificado se divide en: estratificado liso y estratificado ondulado.

En el estratificado liso, la interfase líquido – gas tiene apariencia de una capa lisa, con mínimas perturbaciones, de allí se observa la división entre ambas fases. Pero cuando se incrementa la velocidad del gas, las fuerzas interfaciales aumentan, formándose ondulaciones bruscas en dos o tres direcciones, originando una interfaz ondular, de allí deriva el estratificado ondulado (Omgba, 2004).

Shoham (2006) explica que a altas razones de gas en relación a la fase líquida puede ocurrir el estratificado ondulado, en el cual se forman olas estables en la zona interfacial.

Además del patrón de flujo estratificado se encuentran los patrones de flujo no estratificado que comprende el flujo intermitente, flujo anular y flujo burbuja dispersa que se explicará a continuación.

### **2.3.1.2. Flujo Intermitente**

Según Alcalá (2001) este régimen de flujo se caracteriza por la alternabilidad entre el flujo de líquido y el flujo de gas, donde en la tubería se pueden apreciar paquetes de gas contenido en líquido que bloquean la sección transversal de la tubería y están separadas entre sí por bolsas de gas que contienen una película de líquido sobre la parte inferior del tubo. También existe la posibilidad de tapones que no bloquean completamente la sección transversal del tubo. El perímetro en la sección de

las bolsas del gas puede ser mojado debido al paso de los tapones de líquido. El mecanismo de este flujo es tal que los tapones de líquido de movimiento rápido absorben a la película de fluido que se mueve más lento delante de ellos.

Este tipo de régimen se subdivide en burbuja elongada y tapón de líquido.

El patrón de flujo burbuja elongada se caracteriza por el aumento de la concentración de burbujas, la coalescencia de las mismas y el diámetro de las burbujas aumentan progresivamente formando conglomerados. El movimiento de las burbujas elongadas más grandes, tienden a moverse en una posición muy cercana al tope de las tuberías (Barnea, 1980). Shu M (1980) catalogó el patrón de flujo burbuja elongada como tapón de líquido que bloquea la sección transversal de la tubería, siendo una definición considerada cuando no se observan burbujas de gas dentro del tapón.

El patrón de flujo tapón, se debe al incremento de las razones de flujo de gas y el líquido; donde se forman grandes tapones de líquido debido al crecimiento de las perturbaciones en el flujo estratificado ondulado; estos tapones son transportados rápidamente a lo largo de la tubería. El líquido es empujado hacia la parte superior de la tubería y gradualmente drena entre los tapones (Alcalá, 2001).

El patrón de flujo burbuja elongada es considerado un caso límite de flujo tapón de líquido, cuando el tapón de líquido no posee burbuja del gas. Este patrón de flujo burbuja elongada ocurre a razones relativamente bajas de gas y flujo calmado (Shoham, 2000).

### **2.3.1.3. Flujo Anular**

Omgba (2004) explica que este patrón de flujo ocurre a elevados flujos de gas, la fase gaseosa viaja en el centro de la tubería y el líquido forma una región anular alrededor de la parte interna de la tubería.

Este patrón de flujo también tiene una subcategoría como es el régimen anular con ondas, (Omgba, 2004). Los momentos iniciales de este proceso de transición surgen cuando la velocidad del gas y la mayor parte de líquido fluyen como olas inestables en la parte inferior del tubo y la pared superior y lateral de la pared de la tubería son mojables bien sea por oleaje de tapones de líquido o por la disposición de las gotas de líquido arrastrado.

#### **2.3.1.4. Burbuja Dispersa**

Omgba (2004) describe este patrón de flujo en el cual existen pequeñas burbujas del gas dispersas en la fase líquida a lo largo de la tubería y se lleva a cabo a altos flujos de líquido y un amplio rango de velocidades del gas.

La transición de este tipo de régimen es definido por la condición donde las burbujas primero van suspendidas en el líquido o cuando las burbujas elongadas llegan al tope de la tubería y son destruidas.

Cuando esto sucede, muchas de las burbujas son localizadas en la parte superior de la tubería. Debajo se encuentra el flujo de burbuja dispersa, cuando se aumenta el flujo de líquido y las dos fases están en movimiento a la misma velocidad y el flujo se considera homogéneo.

En la Figura N° 4 se muestra los distintos regímenes de flujo presentes en el sistema gas – líquido en una tubería horizontal.

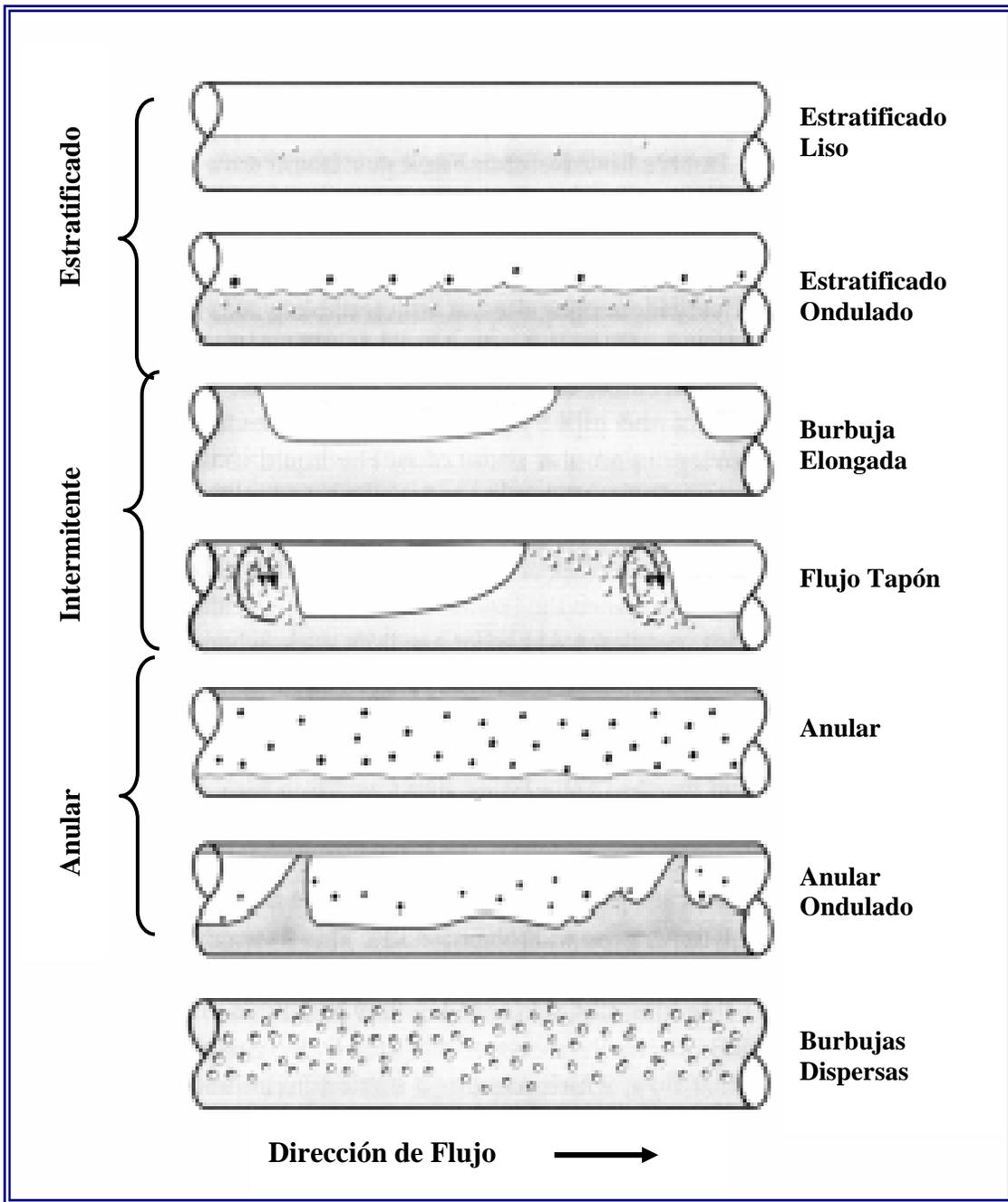


Figura N° 4 Patrones de flujo existentes en tubería horizontal. (Adaptado de Shoham, 2006)

## 2.4. MAPA DE PATRÓN DE FLUJO

Son representaciones que indican el patrón de flujo, utilizando dos coordenadas independientes, dadas las propiedades de los fluidos, el diámetro de la tubería y el flujo másico de cada fase.

La predicción de los patrones de flujo en dos fases se ha logrado mediante correlaciones empíricas y principalmente mediante la observación del flujo en tuberías transparentes. Usualmente, los datos se representan en los mapas de dos dimensiones y se determinan los límites de la transición entre los diferentes patrones de flujo. En la mayoría de los mapas de patrones de flujo, las coordenadas son elegidas sin una base física. Así, cada mapa es fiable sólo en el rango de condiciones similares a las cuales fueron adquiridos y la predicción de otros patrones a otras condiciones es incierto (Shoham, 2006).

El mapa de patrón de flujo de Mandhane, Gregory y Aziz (1974) tienen como dimensiones el caudal másico, el impulso o la velocidad superficial de cada fase. Tal como se muestra en la Figura N° 5, con velocidad superficial de líquido en la ordenada y la velocidad superficial de gas en la abscisa y las zonas de los patrones de flujo burbuja dispersa, burbuja elongada, tapón de líquido, estratificado liso, estratificado ondular y anular. El mapa propuesto por Mandhane et al. está basado en 6000 datos obtenidos en la Universidad de Calgary, API-AGA Two-Phase Flow Data Bank, los cuales incluye pruebas de viscosidad máxima de líquido de 90cP, diámetros de tuberías entre  $\frac{1}{2}$  a  $6\frac{1}{2}$  pulgadas y diferentes tensiones superficiales (Alcalá, 2001). Para generar este mapa, los investigadores partieron del sistema aire – agua, para lo cual formaron un subconjunto de 1178 datos tomando como criterio de selección las propiedades de este sistema en tuberías de 1.3cm a 5cm, seguidamente proponen unos factores de corrección para considerar la variación en las propiedades (Shoham, 2006).

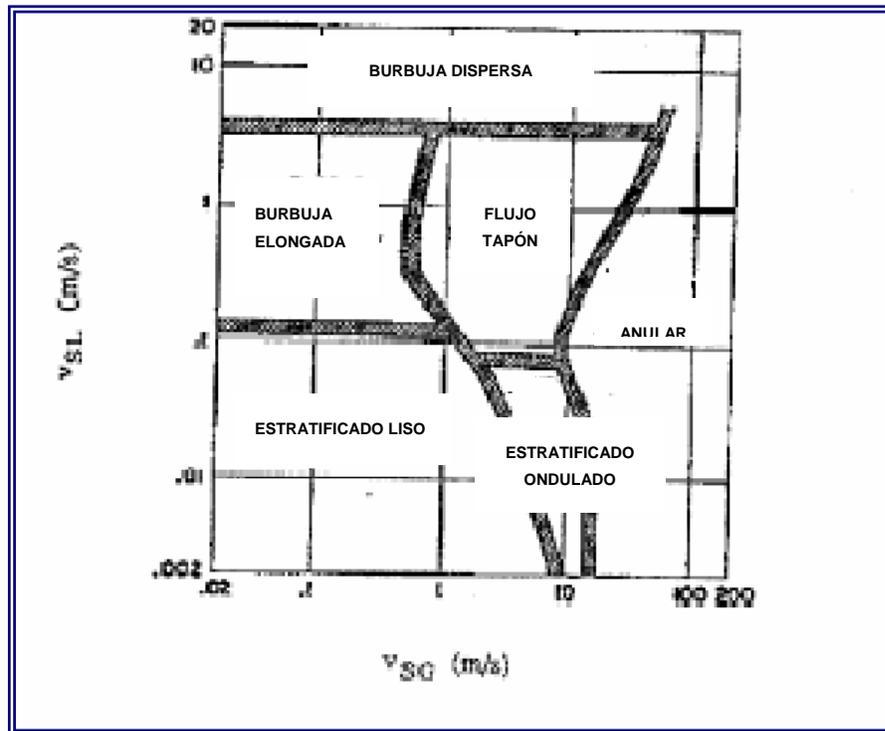


Figura N° 5 Mapa de patrón de flujo de Mandhane et al. (1974). (Adaptado de Shoham, 2000)

Varios investigadores han tratado de ampliar la validación del mapa de patrón de flujo de Mandhane et al. (1974) o buscan un factor de corrección adimensional para las propiedades de los fluidos. Un ejemplo es el mapa de patrón de flujo de Govier y Aziz (1972) con factores de corrección de las propiedades físicas desarrollado para tuberías verticales (Shoham, 2006).

Dentro de la discusión de los mapas de patrones de flujo, hay que mencionar el trabajo de O. Baker (1954), quién fue pionero en este campo y recopiló datos de varias fuentes; generó mapa de patrones de flujo bifásico en tubería horizontal basado en datos experimentales obtenidos por Jenkis (1947), Gazley (1949), Alve (1954) y Kostein (1949) para mezclas aire – agua en tuberías de 8 y 10 pulgadas de diámetro (Asuaje, 1999). El mapa de patrón de flujo de Baker fue usado en la industria petrolera como una referencia válida y para mezclas mostró ser efectivo para un diámetro de 1plg, pero para diámetros mayores o distintas propiedades de fluidos no predice correctamente los patrones de flujo (Shoham, 2006).

A continuación se muestra la Figura N° 5 un mapa de patrón de flujo de Baker (1954). En la figura se observa las diferentes regiones de los patrones de flujo donde se considera: flujo estratificado liso, ondulado, anular, flujo tapón, burbuja elongada y burbuja dispersa, y se considera la ordenada como  $G/\lambda$  y la abscisa como  $L\psi\lambda/G$ ; que son proporcionales al caudal másico del gas y la razón másica del líquido en el gas. Los parámetros  $\psi$  y  $\lambda$  están definidos como:

$$\lambda = \left[ (\rho_g / 0.075) (\rho_l / 62.3) \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$\psi = \frac{73}{\sigma} \left[ \left( \frac{\mu_l}{1} \right) \left( \frac{62.3}{\rho_l} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (9)$$

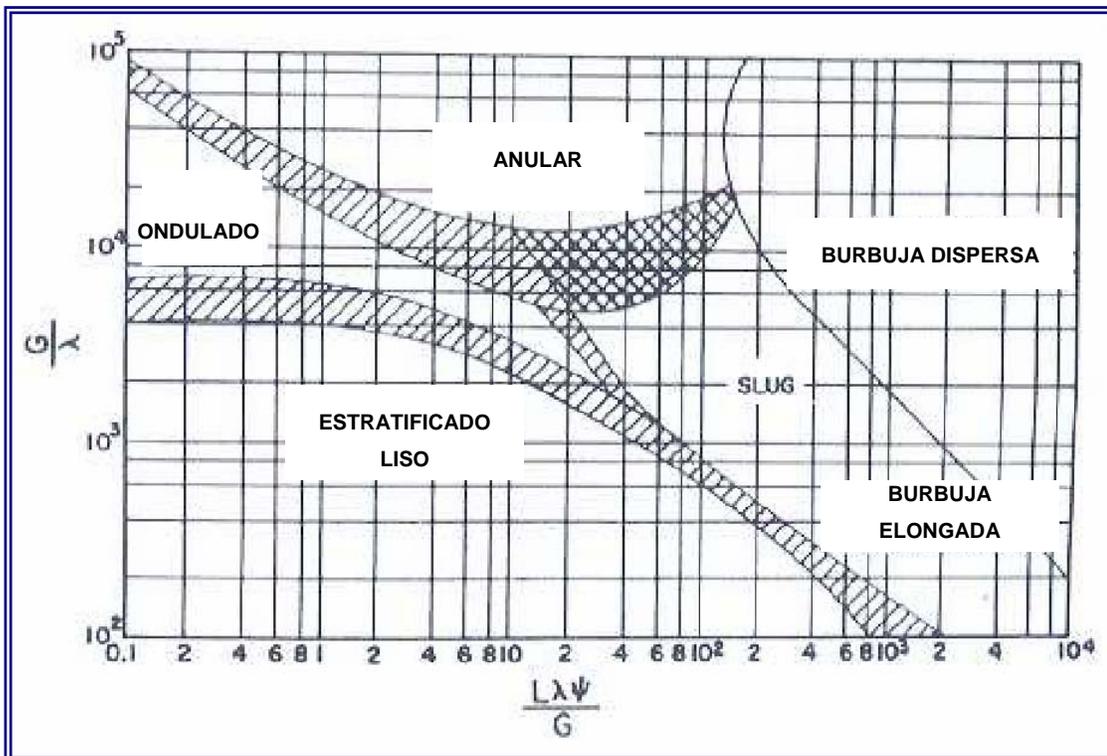


Figura N° 6 Mapa de patrón de flujo de Baker (1954). (Adaptado de Hale, 2000)

Las expresiones mostradas son totalmente empíricas destinadas a conseguir las líneas de transición de distintos sistemas al de aire-agua, partiendo del mapa de patrón de flujo de aire-agua (Govier y Aziz, 1977).

## **2.5. TRANSICIONES DE PATRONES DE FLUJO**

Cada patrón de flujo posee un límite en velocidades de cada fase, según las propiedades de los fluidos, el diámetro y el ángulo de inclinación de la tubería. Es por esto que al modificar una variable es posible que se presente otro patrón de flujo distinto al inicial. Por lo tanto, se llama transición de patrones de flujo cuando un flujo bifásico cambia de un patrón de flujo a otro, al variar el caudal de gas o de líquido en una misma tubería, manteniendo el resto de las variables que afectan constantes.

En flujo bifásico se presenta la transición entre los patrones de flujo estratificado y no estratificado: como anular e intermitente.

### **2.5.1. Transición Estratificado – No estratificado**

De acuerdo al modelo de Taitel y Dukler se considera inicialmente que el patrón de flujo es estratificado, en el cual no hay ondulaciones y se mantiene una capa lisa en la interfaz. Luego al aumentar la velocidad de líquido en el sistema se pueden apreciar pequeñas ondas en la interfaz llegando al estratificado ondulado de allí al seguir aumentando el caudal de líquido existe un instante en el cual no se identifica el patrón de flujo, existiendo la dualidad de patrón de flujo estratificado y patrón de flujo intermitente, que dependiendo del caudal de gas se puede confundir entre patrón burbuja elongada o tapón de líquido.

También dentro de la transición estratificado - no estratificado se puede apreciar la transición al flujo anular, denominado “Flujo Semi-anular”. Ocurre inicialmente a baja velocidad de gas, cuando la mayor parte del líquido fluye como olas inestables en la parte inferior del tubo, con interfaz curvada hacia arriba en los

borde de la pared de la tubería y la parte superior de la tubería puede ser mojada por oleajes de tapones de líquido o por gotas de líquido arrastrado por el aire en el patrón de flujo estratificado ondulado. A medida que aumenta la velocidad del gas, la superficie inferior del líquido tiende a mojar por completo la parte superior de la tubería hasta completar la transición a flujo anular formando un anillo ondulado estable de líquido en la superficie de la tubería (Alcalá, 2001).

Como ya se ha mencionado el patrón de flujo estratificado se produce a velocidades superficiales de gas y de líquido relativamente bajas. A mayor velocidad superficial de gas se podría iniciar ondas en la interfaz, estas olas pueden crecer hasta alcanzar la parte superior de la tubería formando tapones de líquido. Sin embargo, si la tasa de crecimiento de las olas es insuficiente y la cresta se mueve más rápido que el resto de la ola, este comportamiento puede causar un rodamiento de la cresta al extremo posterior de la onda formando un patrón *rolling wave*. La Figura N° 7 representa una ola creciente (Figura N° 7.A), la onda alcanza el patrón *rolling wave* (Figura N° 7.B) y finalmente la ola llega a la altura crítica o parte superior interna de la tubería formando un patrón de flujo tapón (Figura N° 7.C).

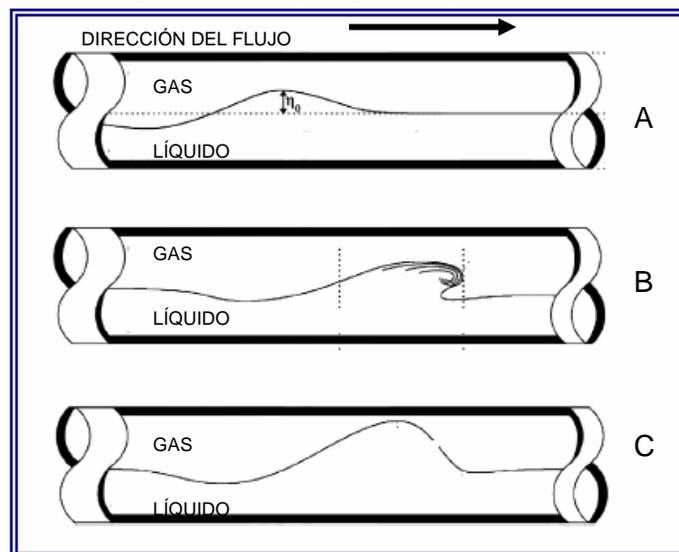


Figura N° 7 Crecimiento de la onda de estratificado ondulado, *rolling wave* a flujo tapón.

(Adaptado de Kadri et al., 2009)

## **2.6. MODELOS MECANICISTAS PARA LA PREDICCIÓN DE LA TRANSICIÓN ESTRATIFICADO – NO ESTRATIFICADO**

La predicción de la transición de flujo estratificado a flujo intermitente o flujo tapón ha sido presentada por la teoría de estabilidad de Kelvin-Helmholtz. Este análisis incluye dos tipos: Kelvin-Helmholtz Viscoso en el que se consideran los esfuerzos de corte y Kelvin-Helmholtz No Viscoso el cual es un modelo simplificado del Kelvin-Helmholtz Viscoso, (Barnea, 1991). Adicionalmente se presentará el modelo de Taitel y Dukler (1976), uno de los modelos más utilizados para el estudio de la inestabilidad de flujo estratificado en tubería horizontal y será presentado a continuación.

### **2.6.1. Modelo de Taitel y Dukler (1976)**

Es la primera propuesta para modelar la transición de patrones de flujo en tubería horizontal y casi horizontal de flujo de gas - líquido. El modelo de Taitel y Dukler (1976) es aplicable a flujo desarrollado, fluido Newtoniano en tubería horizontal y ligeramente inclinadas ( $\pm 10^\circ$ ).

El punto inicial del modelo es la estabilidad del flujo estratificado; suponiendo que ocurre flujo estratificado, se determinan las variables incluyendo el nivel de líquido en la tubería. El análisis de estabilidad consiste básicamente en si se tiene un flujo estratificado estable puede ser estratificado; si el flujo es inestable implica que es no estratificado y viceversa (Shoham, 2006).

Taitel y Dukler (1976) desarrollan la relación entre las siguientes variables: el caudal másico de gas y de líquido, propiedades de los fluidos, el diámetro de la tubería y el ángulo de inclinación respecto a la horizontal.

El modelo consiste en el planteamiento de las ecuaciones de balance de cantidad de movimiento para cada fase, considerando que no hay transferencia de masa y el flujo es isotérmico.

$$-A_l \left( \frac{dP}{dx} \right) - \tau_{wl} S_l + \tau_i S_i + \rho_l A_l g \sin \alpha = 0 \quad (10)$$

$$-A_g \left( \frac{dP}{dx} \right) - \tau_{wg} S_g + \tau_i S_i + \rho_g A_g g \sin \alpha = 0 \quad (11)$$

Donde:

$A_l, A_g$ : Área de la sección transversal de líquido y gas, respectivamente, como se muestra en la Figura N° 8.

P: Presión

$\tau_{wl}, \tau_{wg}, \tau_i$ : esfuerzo de corte para el líquido, gas y la zona interfacial, respectivamente.

$S_l, S_g, S_i$ : Perímetro de líquido, gas y de la zona interfacial, respectivamente.

$\rho_l, \rho_g$ : Densidad de líquido y el gas, respectivamente.

g: Aceleración de la gravedad

x: Coordenada de la dirección de movimiento del fluido

$\alpha$ : Ángulo de inclinación con respecto a la horizontal.

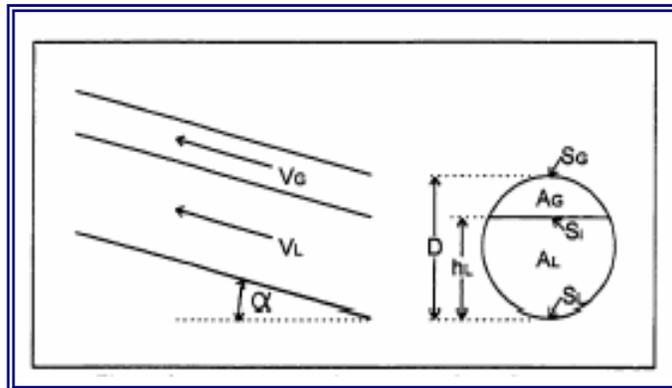


Figura N° 8 Geometría de flujo estratificado para tubería inclinada. (Adaptado de Smith, 1999)

Eliminando el gradiente de presión y sumando las ecuaciones 10 y 11, se tiene la ecuación combinada de cantidad de movimiento:

$$\tau_{wg} \frac{S_g}{A_g} - \tau_{wl} \frac{S_l}{A_l} + \tau_i S_i \left( \frac{1}{A_l} + \frac{1}{A_g} \right) + (\rho_l - \rho_g) g \sin \alpha = 0 \quad (12)$$

Los esfuerzos de corte son:

$$\tau_{wl} = f_l \left( \frac{\rho_l v_l^2}{\mu_l} \right) \quad \tau_{wg} = f_g \left( \frac{\rho_g v_g^2}{\mu_g} \right) \quad (13)$$

Mientras para la interfase gas - líquido se tiene:

$$\tau_i = f_i \left( \frac{\rho_g (v_g - v_l)^2}{2} \right) \quad (14)$$

El factor de fricción de gas y de líquido están dados por:

$$f_l = C_l \left( \frac{D_l v_l \rho_l}{\mu_l} \right)^{-n} \quad f_g = C_g \left( \frac{D_g v_g \rho_g}{\mu_g} \right)^{-m} \quad (15)$$

Con  $C_l = C_g = 16$  y  $n=m=1$  para régimen laminar y  $C_l = C_g = 0.046$  y  $n=m=0.2$  para régimen turbulento. Donde  $D_l$  y  $D_g$  son diámetros hidráulicos del líquido y gas según Agrawal et al. (1973), estos se determinan tal y como se presenta a continuación:

$$D_l = \frac{4A_l}{S_l} \quad (16)$$

$$D_g = \frac{4A_g}{S_g + S_i} \quad (17)$$

En este modelo se asume el factor de fricción en la zona interfacial igual al factor de fricción del gas ( $f_i = f_g$ ) (Gazley, 1949) debido a la existencia del patrón de flujo estratificado liso, además la velocidad en la interfaz se desprecia porque la velocidad real del gas es mucho mayor que la velocidad en la zona interfacial ( $v_g \gg v_i$ ). Con estas aproximaciones el esfuerzo de corte de la zona interfacial es igual al esfuerzo de corte del gas.

El área y perímetro de cada fase y la zona interfacial en forma adimensional, son los siguientes:

$$\tilde{A}_l = 0.25 \left[ \pi - \cos^{-1}(2\tilde{h}_l - 1) + (2\tilde{h}_l - 1) \sqrt{1 - (2\tilde{h}_l - 1)^2} \right] \quad (18)$$

$$\tilde{A}_g = 0.25 \left[ \cos^{-1}(2\tilde{h}_l - 1) - (2\tilde{h}_l - 1) \sqrt{1 - (2\tilde{h}_l - 1)^2} \right] \quad (19)$$

$$\tilde{S}_l = \pi - \cos^{-1}(2\tilde{h}_l - 1) \quad (20)$$

$$\tilde{S}_g = \cos^{-1}(2\tilde{h}_l - 1) \quad (21)$$

$$\tilde{S}_i = \sqrt{1 - (2\tilde{h}_l - 1)^2} \quad (22)$$

$$\tilde{S}_l = \frac{S_l}{d}; \quad \tilde{h}_l = \frac{h_l}{d}; \quad \tilde{A}_l = \frac{A_l}{d^2}; \quad \tilde{v}_l = \frac{v_l}{v_{sl}}; \quad \tilde{v}_g = \frac{v_g}{v_{sg}} \quad (23)$$

Según Shoham (2006) el análisis de estabilidad de KH se realiza a partir de dos capas de diferentes densidades fluyendo con la misma velocidad. La teoría

predice si una pequeña perturbación en la superficie mantiene la estabilidad, sin embargo al haber una estructura ondulada, con una perturbación inestable y con el crecimiento de la ola se destruye la estratificación entre las dos fases. La primera hipótesis en el análisis de KH es que la diferencia en la viscosidad de los dos fluidos puede ser despreciada. De acuerdo a lo antes expuesto, la gravedad y las fuerzas de tensión superficial tienden a estabilizar el flujo. Por otra parte, el movimiento relativo de las capas crea una presión de succión, debido al efecto Bernoulli, que tiende a destruir la estructura estratificada de la corriente. Este análisis a través de un criterio de estabilidad se desarrolla en términos de velocidad de la propagación de la longitud de onda.

Taitel y Dukler (1976) mostraron el análisis para el caso de una onda estacionaria finita en la interfase gas – líquido en el flujo de una tubería, como se muestra en la Figura N° 9 sin considerar el efecto de la tensión superficial. La estabilidad de la fuerza de gravedad en la onda esta determinada por:

$$(h_g - h'_g)(\rho_l - \rho_g)g \cos\alpha \quad (24)$$

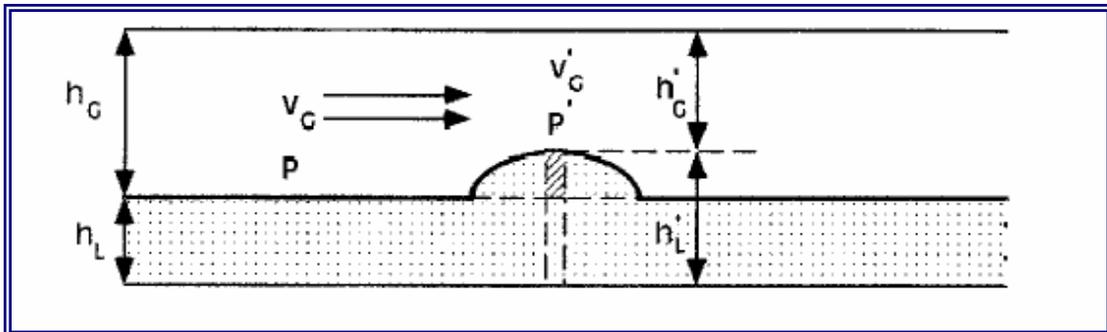


Figura N° 9 Onda finita en tubería horizontal. (Adaptado de Shoham, 2000)

La fuerza de la presión de succión que causa el crecimiento de la onda es:

$$P - P' = \frac{1}{2} \rho_g (v'^2_g - v^2_g) \quad (25)$$

De la ecuación de continuidad se obtiene que:

$$v_g A_g = v'_g A'_g \quad (26)$$

La transición del flujo estratificado al no estratificado toma lugar cuando la fuerza de succión es mayor que la fuerza de gravedad. Por lo tanto, el criterio para la inestabilidad de flujo estratificado es descrito por:

$$v_g > \left[ \frac{2(\rho_l - \rho_g)g \cos \alpha (h'_l - h_l)}{\rho_g} \frac{A'^2_g}{A^2_g - A'^2_g} \right] \quad (27)$$

Sustituyendo  $A'_g$  por  $A_g$  y reorganizando se tiene:

$$v_g > c \left[ \frac{(\rho_l - \rho_g)g \cos \alpha A_g}{\rho_g \frac{dA_l}{dh_l}} \right]^{1/2} \quad (28)$$

Donde:

$$c^2 = 2 \frac{\left( \frac{A'_g}{A_g} \right)^2}{\left( 1 + \frac{A'_g}{A_g} \right)} \quad (29)$$

Para un nivel de líquido en la tubería, el área transversal que ocupa el gas en la perturbación se aproxima al área transversal que ocupa el gas al presentarse flujo separado estratificado ( $A'_g \approx A_g$ ) bajo un mismo caudal de gas y de líquido, entonces  $c=1$ . Similarmente, para un alto nivel de líquido en la tubería, el área transversal del

líquido en la perturbación tiende a cero ( $A'_g \rightarrow 0$ ) y  $c=0$ . Sobre la base de estas condiciones límites, se tiene la siguiente hipótesis:

$$c = 1 - \frac{h_l}{d} \quad (30)$$

Sustituyendo se tiene el siguiente criterio para la transición:

$$v_g > \left(1 - \frac{h_l}{d}\right) \left[ \frac{(\rho_l - \rho_g)g \cos \alpha A_g}{\rho_g \frac{dA_l}{dh_l}} \right]^{1/2} \quad (31)$$

Si la velocidad del gas es mayor que la expresión de la derecha, implica que la fuerza de succión supera la fuerza de gravedad, causando un flujo inestable y la transición de estratificado – no estratificado. Si por otro lado, no se cumple la desigualdad, entonces el flujo es estable y estratificado. Una vez que se determina el nivel de líquido  $h_l$  a partir del balance de cantidad de movimiento, es posible determinar todos los demás parámetros de la ecuación y comprobar si el flujo es estable o no (Shoham, 2006).

### 2.6.2. Modelo Kelvin-Helmholtz Viscoso y No Viscoso

La estabilidad lineal Kelvin-Helmholtz (KH) ha sido frecuentemente utilizada para determinar si el flujo estratificado liso es o no estable. La inestabilidad de Kelvin-Helmholtz surge de la interacción de dos capas de líquidos de diferentes densidades  $\rho$  y  $\rho'$  que fluye con un promedio de velocidades en un conducto horizontal. Existen dos tipos de análisis de KH entre ellos se tienen:

1.- El análisis Kelvin-Helmholtz Viscoso (VKH) el cual considera el modelo de dos fluidos y toma en cuenta los esfuerzos de corte, es asociado con la formación de ondas de gran amplitud en la interfaz que pueden bloquear el tubo de sección transversal cuando el nivel del líquido en el equilibrio es suficientemente alta, este

análisis se basa en los trabajos de Wallis (1969), Lin y Hanratty (1986), Wu et al. (1987), Andritsos et al. (1989), Barnea (1991) y Crowley et al. (1992).

2.-El análisis Kelvin-Helmholtz No Viscoso (IKH) no considera los esfuerzos de corte, sino que la transición se encuentra asociada a un crecimiento sin límite de la onda, donde las perturbaciones se obtienen como resultado de la transición de flujo estratificado para el flujo anular o flujo tapón, siendo este la base de los siguientes trabajos: Taitel y Dukler (1976), Kordyban y Ranov (1970) y Mishima e Ishii (1980).

A continuación se muestra el análisis de estabilidad de flujo estratificado realizado con las ecuaciones del “modelo de dos fluidos” planteado por Barnea (1991). Donde la ecuación de continuidad para gas y el líquido son:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l A_l) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_l A_l v_l) = 0 \quad (32)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g A_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g A_g v_g) = 0$$

Las ecuaciones de cantidad de movimiento para cada fase son: (33)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l A_l v_l) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_l A_l v_l^2) = -\tau_l S_l + \tau_i S_i - A_l \frac{\partial P_{il}}{\partial x} - \rho_l A_l g \cos \alpha \frac{\partial h_l}{\partial x} - \rho_l A_l g \sin \alpha$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g A_g v_g) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g A_g v_g^2) = -\tau_g S_g - \tau_i S_i - A_g \frac{\partial P_{ig}}{\partial x} - \rho_g A_g g \cos \alpha \frac{\partial h_l}{\partial x} - \rho_g A_g g \sin \alpha$$

Asumiendo fluido incompresible, combinando las ecuaciones de cantidad de movimiento y eliminando los términos de presión usando la siguiente relación:

$$P_{ig} - P_{il} = \sigma \frac{\partial^2 h_l}{\partial x^2} \quad (34)$$

Donde  $\sigma$  es la tensión superficial, se tiene:

$$\frac{\partial h_l}{\partial t} + \frac{A_l}{A'_l} \frac{\partial v_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial h_l}{\partial x} = 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial h_l}{\partial t} - \frac{A_g}{A'_l} \frac{\partial v_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial h_l}{\partial x} = 0 \quad (36)$$

La ecuación combinada de cantidad de movimiento está dada por: (37)

$$\rho_l \frac{\partial v_l}{\partial t} - \rho_g \frac{\partial v_g}{\partial t} + \rho_l v_l \frac{\partial v_l}{\partial x} - \rho_g v_g \frac{\partial v_g}{\partial x} + (\rho_l - \rho_g) g \cos \alpha \frac{\partial h_l}{\partial x} - \sigma \frac{\partial^3 h_l}{\partial x^3} = F$$

Se realiza un procedimiento de linealización, con la aproximación presentada por Barnea y Taitel (1989): (38)

$$\begin{aligned} & \frac{A}{A'_l} \sigma \frac{\partial^4 \hat{h}_l}{\partial x^4} + \left[ \frac{\rho_l v_l^2}{R_l} + \frac{\rho_g v_g^2}{R_g} - (\rho_l - \rho_g) g \cos \alpha \frac{A}{A'_l} \right] \frac{\partial^2 \hat{h}_l}{\partial x^2} + 2 \left[ \frac{\rho_l v_l}{R_l} + \frac{\rho_g v_g}{R_g} \right] \frac{\partial^2 \hat{h}_l}{\partial t \partial x} \\ & + \left[ \frac{\rho_l}{R_l} + \frac{\rho_g}{R_g} \right] \frac{\partial^2 \hat{h}_l}{\partial t^2} = \left[ -\frac{A}{A'_l} \frac{\partial F}{\partial h_l} - \frac{v_g}{R_g} \frac{\partial F}{\partial v_g} + \frac{v_l}{R_l} \frac{\partial F}{\partial v_l} \right] \frac{\partial \hat{h}_l}{\partial x} + \left[ -\frac{1}{R_g} \frac{\partial F}{\partial v_g} + \frac{1}{R_l} \frac{\partial F}{\partial v_l} \right] \frac{\partial \hat{h}_l}{\partial t} \end{aligned}$$

Para la solución se supone que la aparición de una perturbación cuya estabilidad es estudiada con el fin de predecir la estabilidad de este tipo de flujo. Esta perturbación obedece a la forma de ondas sinusoidales definida por:

$$\hat{h}_l = \varepsilon e^{i(\omega t - kx)} \quad (39)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Amplitud

$\omega$ : Frecuencia Angular

$k$ : Número de Onda

$i$ : Parte imaginaria

$x$ : Coordenada de la dirección de flujo

$t$ : Tiempo

Al sustituir la función de la perturbación del nivel de líquido, la ecuación se transforma de la siguiente forma, cuya incógnita es la velocidad de propagación de ondas:

$$\omega^2 - 2(ak - bi)\omega + ck^2 - dk^4 - eki = 0 \quad (40)$$

Donde:

$$a = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\rho_l v_l}{R_l} + \frac{\rho_g v_g}{R_g} \right) \quad (41)$$

$$b = \frac{1}{2\rho} \left[ \left( \frac{\partial F}{\partial v_{ls}} \right)_{v_{gs}, R_l} - \left( \frac{\partial F}{\partial v_{gs}} \right)_{v_{ls}, R_l} \right] \quad (42)$$

$$c = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\rho_l v_l^2}{R_l} + \frac{\rho_g v_g^2}{R_g} - (\rho_l - \rho_g) g \cos \alpha \frac{A}{A_l'} \right) \quad (43)$$

$$d = \frac{\sigma A}{\rho A_l'} \quad (44)$$

$$e = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial F}{\partial R_l} \right)_{v_{ls}, v_{gs}} \quad (45)$$

$$\rho = \frac{\rho_l}{R_l} + \frac{\rho_g}{R_g} \quad (46)$$

Entonces se tiene la solución de la ecuación 40:

$$\omega = (ak - bi) \pm \sqrt{(a^2 - c)k^2 - b^2 + dk^4 + (ek - 2abk)i} \quad (47)$$

La solución para el estado de equilibrio es inestable siempre que la parte imaginaria de la velocidad de propagación de ondas ( $\omega$ ) en ecuación (40) sea negativa, lo que lleva a un crecimiento exponencial de la variable perturbada a lo largo de la dirección del flujo. La condición marginal de la estabilidad se obtiene de la ecuación (40) para el caso concreto donde la parte imaginaria es igual a cero. Al sustituir y aproximar a cero la ecuación (40), lleva a las dos ecuaciones siguientes:

$$w_R^2 - 2abw_R + ck^2 = 0 \quad (48)$$

$$2bw_R - ek = 0 \quad (49)$$

Sustituyendo por :

$$w_R = \frac{ek}{2b} \quad C_V = \frac{e}{2b} \quad (50)$$

Donde  $C_V$  es la velocidad de la onda al inicio de la inestabilidad. Insertando la ecuación (50) en la ecuación (51) se tiene la siguiente relación de condición de inestabilidad:

$$\left( \frac{e}{2b} - a \right)^2 - (a^2 - c) < 0 \quad (51)$$

Sustituyendo el valor de  $a^2 - c$  se tiene:

$$\left( \frac{e}{2b} - a \right)^2 + \frac{\rho_l \rho_g}{\rho^2 R_l R_g} (V_g - V_l)^2 - \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho} g \cos \alpha \frac{A}{A'_l} < 0 \quad (52)$$

Los dos últimos términos en la ecuación (52) corresponden a la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz en la interfaz. El primer término está asociado a efectos

adicionales de corte, lo que tiende a amplificar las perturbaciones en el espesor de la película.

La ecuación de dispersión del análisis Kelvin-Helmholtz No Viscoso se obtiene con los parámetros  $e$  y  $b$  igual a cero de la ecuación (52). La velocidad de onda crítica en este caso resulta ser igual a la expresión:

$$C_{IV} = a = \frac{\rho_l V_l R_g + \rho_g V_g R_l}{\rho_l R_g + \rho_g R_l} \quad (53)$$

Mientras:

$$C_V = \frac{e}{2b} = \frac{\left( \frac{\partial \tau_i}{\partial R_l} - \frac{\partial \tau_{il}}{\partial R_l} \right)_{V_{sl}, V_{sg}}}{\left( \frac{\partial \tau_i}{\partial V_{sg}} - \frac{\partial \tau_{il}}{\partial V_{sg}} \right)_{V_{sl}, R_l} - \left( \frac{\partial \tau_i}{\partial V_{sl}} - \frac{\partial \tau_{il}}{\partial V_{sl}} \right)_{V_{sg}, R_l}} \quad (54)$$

Por lo tanto, el período adicional en el criterio de estabilidad de KH, que se deriva al considerar el esfuerzo cortante, está relacionado con la diferencia entre la velocidad de la onda obtenida para la teoría VKH y la velocidad de la onda del caso no viscoso, en el inicio de la inestabilidad. Entonces la ecuación toma la siguiente forma:

$$(C_V - C_{IV})^2 + \frac{\rho_l \rho_g}{\rho^2 R_l R_g} (V_g - V_l)^2 - \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho} g \cos \alpha \frac{A}{A'_l} < 0 \quad (55)$$

Adicionalmente el análisis de Kelvin-Helmholtz No Viscoso para la estabilidad del flujo estratificado está dada por:

$$V_g - V_l < \sqrt{\left( \rho_l R_g + \rho_g R_l \right) \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l \rho_g} g \cos \alpha \frac{A}{\frac{dA_l}{dh_l}}} \quad (56)$$

Rearreglando la ecuación (55) se tiene:

$$K_v = \sqrt{1 - \frac{(C_v - C_{IV})^2}{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho} g \cos \alpha \frac{A}{dh_l}}} \quad (57)$$

El criterio de transición mencionado incorpora los esfuerzos de cortes, la velocidad del fluido y la relación geométrica del fluido que son funciones del nivel de líquido en equilibrio. Por lo tanto, el análisis de Kelvin-Helmholtz Viscoso para la estabilidad del flujo estratificado está dado por:

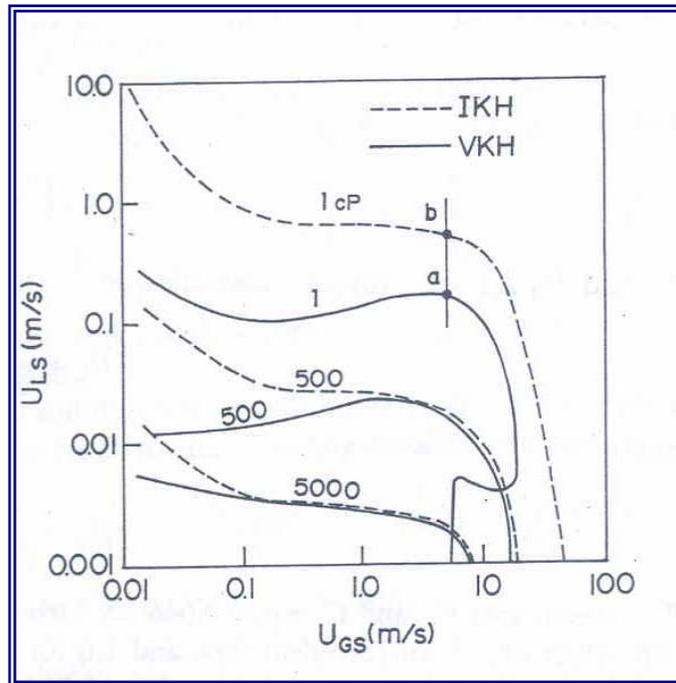
$$V_g - V_l < K_v \sqrt{\left(\rho_l R_g + \rho_g R_l\right) \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l \rho_g} g \cos \alpha \frac{A}{dh_l}} \quad (58)$$

En líneas generales el análisis de estabilidad de flujo estratificado (ecuación 58) considera distintas suposiciones, entre ellas que el valor de K dependerá del modelo que se evalúe, por ejemplo: en Taitel y Dukler (1976) vale  $(1-h_l/D)$ , en Kelvin Helmholtz Viscoso es  $K_v$  y No Viscoso es 1.

## 2.7. RELACIÓN ENTRE LOS MODELOS KELVIN-HELMHOLTZ VISCOSO Y NO VISCOSO EN TUBERÍA HORIZONTAL

Barnea y Taitel (1993) comparan los resultados del criterio de estabilidad para flujo estratificado VKH e IKH, su trabajo se enfocó para el caso aire - agua, en un tubo horizontal de 5cm de diámetro. Según los autores se puede observar que para alta viscosidad del líquido el análisis de IKH predice resultados similares a VKH, pero resultados muy diferentes para baja viscosidad de líquido. Este hecho se puede atribuir según Barnea y Taitel (1993), a que el aumento de la viscosidad del líquido

contribuye a la disminución del término  $(C_V - C_{IV})^2$  en el cálculo del factor de Kelvin-Helmholtz Viscoso de la ecuación (57). Este fenómeno se representa en la Figura N°



10, donde a alta viscosidad del líquido (5000cP) ambos enfoques arrojan casi los mismos resultados, mientras que para la viscosidad del líquido de 1cP se tienen curvas con la misma tendencia, pero desplazadas.

Figura N° 10 Efecto de la viscosidad del líquido en los criterios de estabilidad VKH e IKH. Sistema aire - líquido, presión atmosférica, tubería horizontal, diámetro 5cm (Adaptado de Barnea, 1993)

Por otra parte, Hanratty (1983) y Andreussi et al. (1985) indicaron que el análisis VKH puede ser utilizado con éxito para explicar la transición de las ondas (*rolling wave*) para el caso de un bajo nivel de líquido (Barnea y Taitel, 1993). Adicionalmente, Barnea y Taitel (1993) concluyen que los modelos VKH e IKH pueden predecir el patrón de flujo tapón o *rolling wave*, considerando la región comprendida entre las curvas de VKH e IKH, más la fracción volumétrica de líquido en la tubería. La región comprendida entre VKH e IKH está definida como una zona inestable para el modelo Kelvin-Helmholtz Viscoso y una zona estable para el Kelvin-Helmholtz No Viscoso.

Siguiendo este orden de ideas, Barnea y Taitel (1994) concluyen que los dos análisis de Kelvin-Helmholtz predicen la transición de flujo estratificado para otros patrones de flujo como flujo tapón y flujo anular, dependiendo del tipo de inestabilidad y la fracción volumétrica de líquido en el estado estacionario del sistema.

## 2.8. EFECTO DE LA VISCOSIDAD DE LÍQUIDO EN EL FLUJO ESTRATIFICADO

Barnea (1991), estudió el efecto de la viscosidad del líquido en la estabilidad del flujo estratificado gas - líquido, comparando sus resultados con el modelo de Taitel y Dukler (TD) (1976) y la aproximación del modelo Kelvin-Helmholtz No Viscoso para el caso de flujo de aire - líquido en tubería horizontal de 5cm de diámetro. Obteniendo los mismos resultados para el caso de baja viscosidad de líquido en el análisis del modelo de TD y el análisis VKH, a pesar que este último considera los esfuerzos de corte. Sin embargo, a medida que aumenta la viscosidad del líquido, las aproximaciones de TD presentan diferencias con respecto al modelo VKH, como muestra la Figura N° 11. Adicionalmente, Barnea (1991) comparó sus resultados con los análisis del modelo IKH e indicó que presenta resultados favorables en el caso de baja viscosidad, similares a los obtenidos por el modelo de VKH y TD. Sin embargo, al incrementar la viscosidad del líquido la contribución del término  $(C_V - C_{IV})^2$  en la ecuación (55), disminuye.

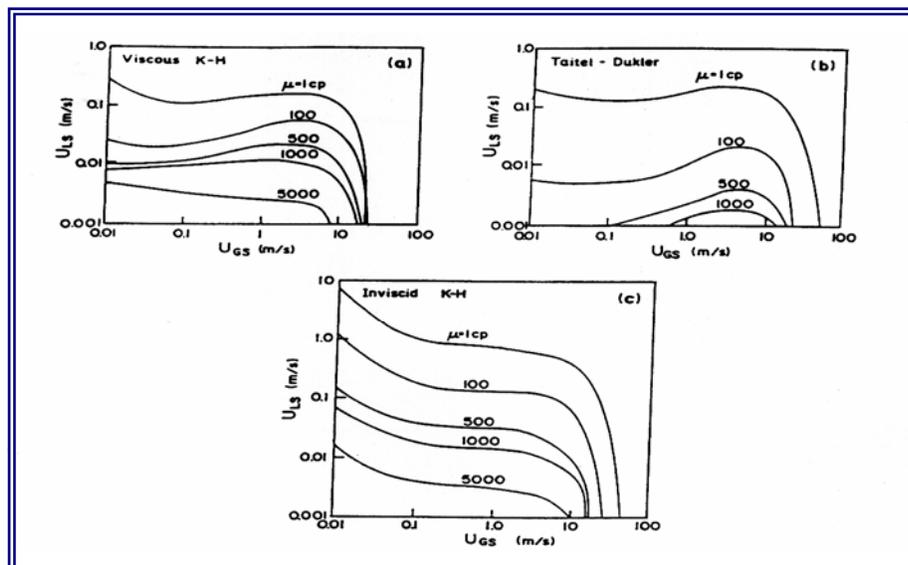


Figura N° 11 Efecto de la viscosidad del líquido en las curvas de estabilidad neutral (aire - líquido).

(Adaptado de Barnea, 1991)

En la Figura N° 12, Barnea (1991) comparó el factor de  $K_{TD}$  y  $K_V$  para una tubería horizontal de 5cm de diámetro, en sistema aire – líquido y presión atmosférica. En la gráfica se muestra una sola curva del factor de Taitel y Dukler ( $K_{TD}$ ) en función de la velocidad superficial del gas, debido a la independencia que tiene el factor  $K_{TD}$  con respecto a la viscosidad. La figura N° 12 muestra el comportamiento de la inestabilidad con respecto a la velocidad superficial del gas; donde el inicio de la inestabilidad (bajas velocidad superficial de gas) no está afectada por la viscosidad del líquido, depende únicamente del nivel del líquido y el diámetro de la tubería.

Por otro lado, el factor de Kelvin-Helmholtz Viscoso ( $K_V$ ) es una función dependiente de la viscosidad del líquido, como se puede observar en la ecuación (56), al incrementar la viscosidad del líquido,  $K_V$  se aproxima a la unidad y se tiene una solución para IKH cercana a la de VKH. Para el caso especial donde la viscosidad del líquido es 1 cP, la curva de  $K_V$  presenta el mismo comportamiento que  $K_{TD}$ , siendo razonable debido a que ambos modelos (Taitel y Dukler y Kelvin Helmholtz Viscoso) fueron desarrollados y validados en sistemas aire – agua, líquido con viscosidad 1cP.

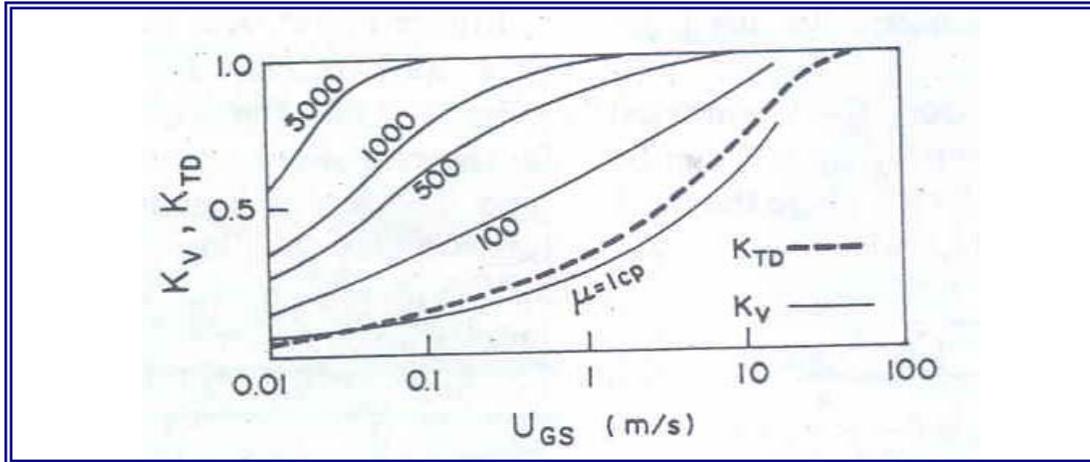
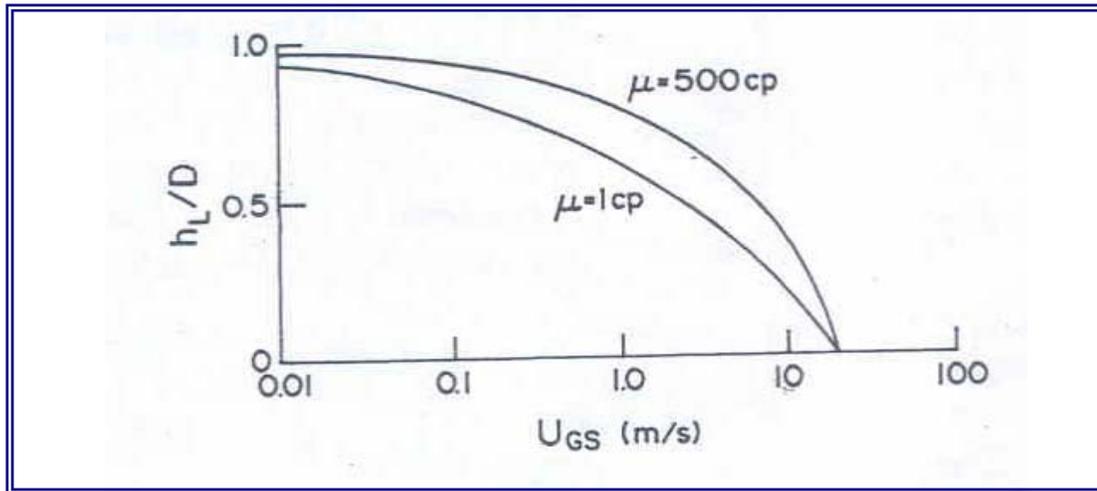


Figura N° 12 La influencia de la viscosidad del líquido en los coeficientes  $K_v$  y  $K_{TD}$ . Sistema aire – líquido, presión atmosférica, tubería horizontal de diámetro 5cm. (Adaptado de Barnea ,1991)

Por lo tanto, Barnea (1991) explicó que el incremento de la viscosidad tiene influencia en la estabilidad del sistema, originando cambios en el nivel de líquido en equilibrio.

En flujo horizontal, el aumento de la viscosidad incrementa considerablemente el nivel del líquido en la tubería, resultando bajas velocidades superficiales de líquido en la transición estratificado - no estratificado. Pero para la misma altura de líquido, la viscosidad tiene un efecto estabilizador en el sistema, al incrementar la viscosidad de líquido se necesitará mayor velocidad del gas para generar la transición en el sistema, como se observa en la Figura N° 13.

Según Lin y Hanratty (1986), la teoría Kelvin-Helmholtz No Viscoso predice correctamente la estabilidad del flujo gas - líquido en un conducto cerrado con perturbaciones de longitud de onda larga. La velocidad de la onda debe ser muy diferente del valor predicho por el análisis Kelvin-Helmholtz No Viscoso por los efectos viscosos y la inercia del líquido la cual puede ser desestabilizadora.

Figura N° 13 Curvas de estabilidad neutral de  $h_l / D$  vs la velocidad superficial de gas. Sistema Aire –

Líquido, presión atmosférica, tubería horizontal, diámetro 5cm. (Adaptado de Barnea, 1991)

La estabilidad lineal del modelo VKH arroja buenos resultados según Lin y Hanratty (1986) para tubería horizontal de 2.547 cm y 9.73 cm de diámetro y  $V_{sg}$  inferior a 3.3 m/s, para un sistema aire – agua. En líquido de 1 a 500 cP el modelo VKH considera el efecto de la viscosidad sobre la velocidad superficial de líquido en la transición comparación al modelo IKH que no lo considera. Sin embargo, a viscosidad de líquido muy grande los efectos de inercia del líquido son despreciables y se obtiene el mismo criterio de estabilidad por las teorías IKH y VKH.

Andritsos et al. (1989) presentó sus resultados experimentales sobre el efecto de la viscosidad de líquido en el inicio del flujo tapón, en tubería horizontal de 2.52cm y 9.53cm; sugiriendo un mecanismo precursor de la formación de flujo tapón debido a la aparición de pequeñas longitud de ondas de Kelvin-Helmholtz, aplicable en viscosidad de líquido mayores a 20cP y muestran que para líquidos muy viscosos, el análisis de estabilidad se reconoce mediante la formación de tapones originados a partir de pequeñas ondas sinusoidales, como lo predijo Lin y Hanratty en 1986. Sin embargo, un examen más detenido de los resultados con líquidos muy viscosos (mayores a 20 cP) muestran que la primera ola es sinusoidal y tienen una longitud de onda corta, la cual se ve afectada tanto por la gravedad como por la tensión superficial. Con un cambio en las condiciones de flujo, crece la longitud de onda de

las ondas periódicas y pueden formarse olas irregulares de gran amplitud que causan un aumento en los esfuerzos interfaciales y una disminución en la altura del líquido.

## 2.9. PREDICCIÓN DEL PATRÓN DE FLUJO *ROLLING WAVE*

Barnea (1993) demostró que la condición de estabilidad neutra del análisis VKH no está directamente asociada con la transición al flujo tapón o para el flujo anular, sino más bien a la condición de la inestabilidad de la interfaz; es decir, la estabilidad de la interfaz de este modelo está asociada con el patrón de flujo estratificado liso. Cada vez que aumenta la tasa de líquido se incrementa el tamaño de la película ( $h_1 / D$  tiende a 0,5) y es proporcional al líquido necesario para llenar el área transversal de la tubería, esta inestabilidad de la región se convierte en flujo tapón. Para  $h_1 / D < 0,5$  y entrando en la zona de inestabilidad para el modelo de VKH se puede encontrar los patrones de flujo *rolling wave* o anular, además pueden existir flujo ondulado.

Con el fin de obtener el patrón de flujo anular, la parte superior de la tubería debe ser humedecida en condiciones de bajo nivel de líquido, el cual se produce cuando el efecto de succión generado por la ola supera la influencia estabilizadora de la gravedad. Este efecto crece hasta que la parte superior de la tubería se humedece. Barnea (1991) sugirió que, dado que la descripción es coherente con el análisis IKH, se sugiere que el análisis IKH también es válido cuando la onda es finita.

Por lo tanto, se identifican dos regiones de inestabilidad tanto para el modelo de VKH como para IKH. La primera región inestable tanto para IKH como para VKH se tiene a altos niveles de líquido ( $h_1 / D > 0,5$ ) presentándose el patrón de flujo tapón y para bajos niveles de líquido con  $h_1 / D < 0,5$ , se presencia el flujo anular. La segunda región se presenta en la región inestable para VKH pero estable para IKH, en el cual se tendrá el patrón de flujo *Rolling wave* si existe una amplia longitud de onda con  $h_1 / D < 0,5$  y flujo tapón para  $h_1 / D > 0,5$ .

Refiriéndose ahora a la Figura N° 14, la zona delimitada por la curva de VKH (curva continua) es una zona estable de flujo estratificado (estratificado liso o con ondas de pequeña amplitud). La región entre la curva de transición VKH y la curva IKH (curva discontinua) es una región de flujo ondulado o flujo tapón. La curva de  $h_l / D = 0,5$ , es la línea divisoria entre el patrón de flujo tapón a la "izquierda" y de gran amplitud en las ondas de tipo *rolling wave* a la "derecha". A relativas altas tasas de líquido la amplitud de las ondas se denomina pseudo- tapón (Lin y Hanratty 1987), ondulado anular (Barnea et. al 1980) o proto slug (Nicholson et. al 1987). A bajo flujo de líquido se trata de una región de transición de flujo anular (que se identificó como ondulado por algunos investigadores y como anular por otros). Para la región donde  $h_l / D < 0,5$  en *rolling wave*, el comportamiento está determinado por tres líneas de demarcación: la línea VKH, IKH y  $h_l / D = 0.5$  (sugerida por el modelo de Taitel y Dukler para cuantificar altos niveles de líquido).

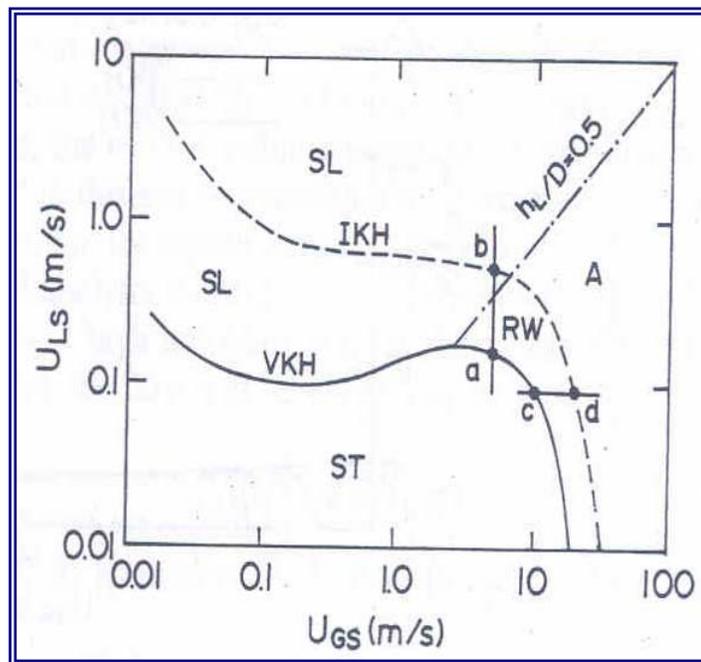


Figura N° 14 Predicción de patrón de flujo mediante los análisis de VKH e IKH. Sistema Aire - Agua, presión atmosférica, tubería horizontal, diámetro de 5cm. SL: Flujo Intermitente; ST: Flujo Estratificado; RW: *Rolling wave*; A: Anular. (Adaptado de Barnea, 1993)

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGÍA GENERAL**

En este capítulo se resalta el procedimiento metodológico utilizado en la investigación, donde se establece: el tipo de investigación, estrategias y métodos necesarios para alcanzar los objetivos propuestos.

Este trabajo especial de grado se puede catalogar como un análisis secundario según Klaus (2001), debido a que se evaluarán datos obtenidos de análisis anteriores, en este caso las imágenes y los videos realizados en Pdvsa-Intevep en los años 2000 y 2001. Además este tipo de investigación es ventajosa porque se puede comparar los resultados obtenidos con otras publicaciones, permite recopilar más información de distintas regiones o países y se puede comprobar si la exploración y la interpretación de los datos se han realizado de manera correcta.

Este trabajo especial de grado corresponde a una investigación documental según la estrategia metodológica de Pérez (2006), porque el estudio del problema consiste en ampliar y profundizar el conocimiento del tema, en este caso la transición e identificación de los patrones de flujo, con apoyo de trabajos previos como los artículos y publicaciones científicas, manteniendo su originalidad en el enfoque, objetivos, conclusiones y recomendaciones desarrolladas. Esta investigación también se adapta al tipo de investigación combinada documental y de campo según Muñoz (1998), debido a que se aplica los métodos de recopilación y tratamiento de datos con la investigación documental, a fin de profundizar en el estudio del tema propuesto y para cubrir todos los posibles ángulos de exploración.

En la siguiente ilustración (Figura N° 15) se representan las principales actividades a realizar para cumplir con los objetivos propuestos de este trabajo de investigación. Consta inicialmente de una revisión bibliográfica donde se localiza y

selecciona la bibliografía relacionada con el tema y problemática de estudio en bibliotecas, Internet y publicaciones, para luego organizar, analizar e interpretar el contenido de la fuente encontrada. Luego se procede a la identificación de los patrones de flujo a partir de videos e imágenes fotográficas, seguido de ello, se procede al desarrollo de un programa que permita predecir la transición estratificado – no estratificado de los modelos de Taitel y Dukler, Kelvin Helmholtz Viscoso y Kelvin Helmholtz No Viscoso culminando con el análisis de los resultados.

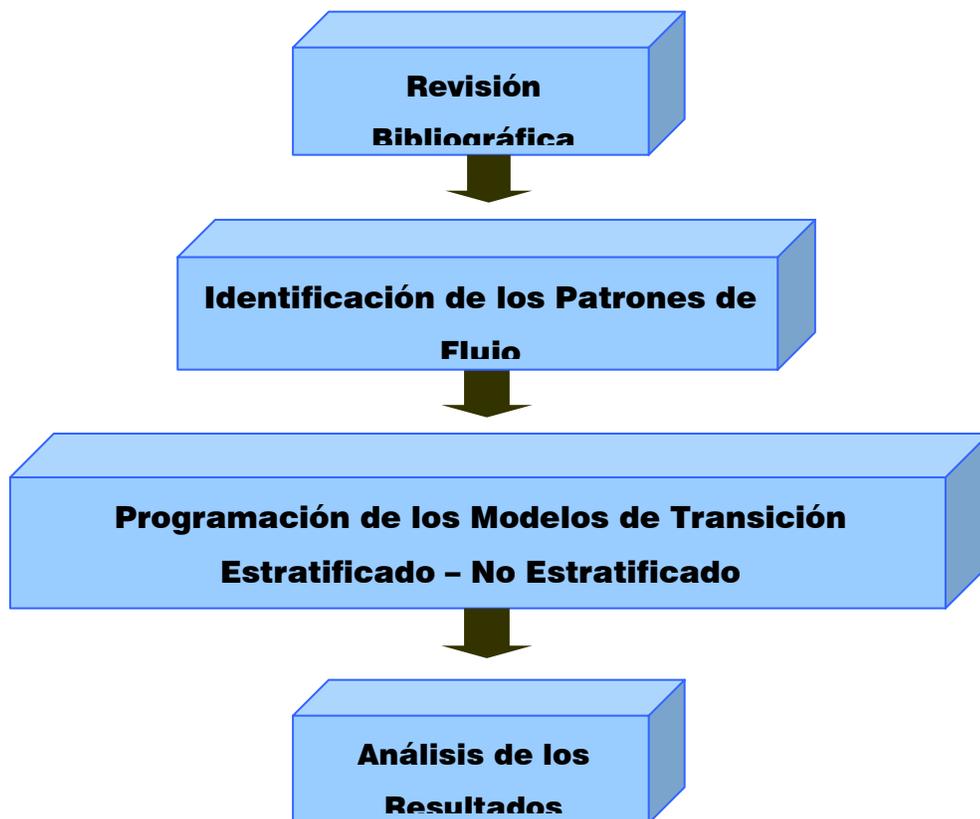


Figura N° 15 Esquema de actividades

Conforme a lo establecido en la Figura N° 15 se procederá a detallar cada uno de los pasos expresados anteriormente:

### 3.1. Revisión Bibliográfica

1.-En esta etapa se realizó la búsqueda y recopilación de información acerca de los patrones de flujo bifásico, modelos mecanicistas, transición estratificados - no estratificado y el efecto de la viscosidad del líquido en dicha transición. Esta búsqueda incluyó bibliografías y publicaciones periódicas especializadas e indexadas como *Science Direct*, *Society of Petroleum Engineers SPE-Papers*, *International Journal Multiphase Flow*, *AIChE Journal*, etc; a través del portal RIPPET (Red de Información Petrolera y Petroquímica), el cual brinda el servicio de información técnica y documentación del Ministerio Popular para la Energía y Petróleo, PDVSA y Pequiven mediante una base de datos que permite la disponibilidad oportuna de la información técnica - científica relativa a los hidrocarburos, de áreas afines y complementarias.

2.-Luego de localizar el material, se procedió a la selección del mismo y consistió en la lectura del resumen, introducción y conclusiones de cada publicación encontrada referente al tema, para descartar las fuentes bibliográficas que no están acorde con el tema de estudio. Seguido de ello, se procedió al análisis de la información mediante un método de presentación resumida del texto en base a lo expresado por Pérez (2006) en el que se analizó e interpretó el contenido de las fuentes seleccionadas organizando las ideas principales y secundarias.

### 3.2. Identificación de los Patrones de Flujo

3.- La determinación de los patrones de flujo y las transiciones entre los patrones se efectuó a partir de las observación de los videos grabados y fotos digitalizadas de la vista aérea y frontal de un montaje de una sección de tubería horizontal transparente (tubería plexiglass), donde se transporta el flujo bifásico desarrollado con aire seco como la fase gaseosa y como fase líquida, fluidos Newtonianos con viscosidad comprendida entre 1 – 1500 [cP], específicamente agua (1cP), kerosene (1.3cP), y

aceites lubricantes Purolub 150 (690cP) y Purolub 320 (1470cP) en el laboratorio de Flujo Multifásico de Norte 6, Intevep.

El circuito experimental de flujo bifásico horizontal consta de un sistema de bombas para el manejo de líquido, un sistema para el manejo de gas (aire comprimido), una sección de pruebas y un sistema de separación no convencional. La sección de pruebas es de 2pulgadas (aproximadamente 5cm) de diámetro y tiene una longitud total de 1253 diámetros (D), de la cual existe 88D de sección transparente destinada a la filmación de los videos y fotografías materia indispensable para la identificación de los patrones de flujo en este trabajo especial de grado. En la Figura N° 16 se muestra esquemáticamente la sección de pruebas del circuito.

Los videos y fotografías (Figura N° 17) reflejan las imágenes de las pruebas realizadas a temperatura ambiente (aproximadamente 22° C) con un rango de velocidad superficial de líquido de 0.001 a 10 m/s y aire comprimido entre 0.1y 40 m/s a presiones menores a 125 psia.



Figura N° 16 Segmento de la zona de visualización de los patrones/transiciones del circuito experimental en Intevep.

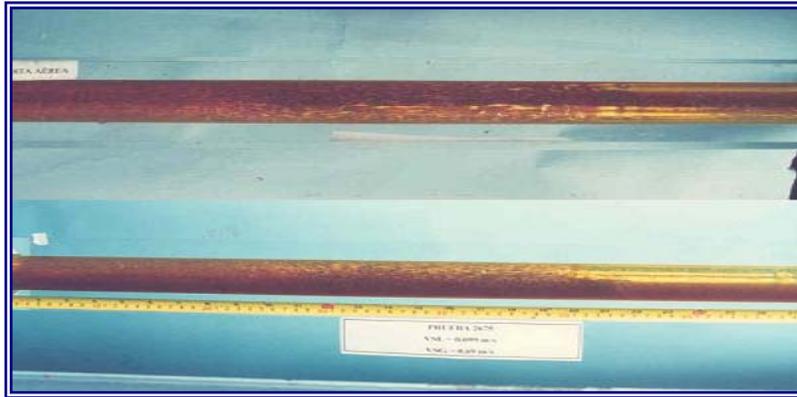


Figura N° 17 Fotografía de la unidad tapón correspondiente a flujo tapón, cuando  $V_{sl}$ : 0.099 m/s y  $V_{sg}$ : 0.69 m/s. (a) Vista aérea, (b) vista frontal

4.-Luego de identificar de los patrones de flujo en cada una de las pruebas observadas en las fotos y los videos, se procedió a realizar una clasificación según la viscosidad del líquido, de allí se realizó una base de datos experimentales considerando la viscosidad del líquido, las velocidades superficiales de gas y de líquido que indique cada imagen fotográfica o vídeo, además del patrón de flujo que presenta a esas velocidades superficiales.

### 3.3. Programación de los Modelos de Transición Estratificado - No estratificado

5.-Cumpliendo con la metodología de la programación se comenzó con el conocimiento del problema, luego de haber recopilado la información necesaria de los modelos mecanicistas de Taitel y Dukler, Kelvin-Helmholtz Viscoso y No Viscoso, se planteó de forma ordenada las ecuaciones de cada modelo, primero las involucradas con el balance de masa y cantidad de movimiento y luego las ecuaciones de las transiciones para los modelos de Taitel y Dukler, Kelvin-Helmholtz Viscoso y No Viscoso.

6.-Luego se empleó un método iterativo para resolver las ecuaciones planteadas de la ley de conservación de masa y cantidad de movimiento con las ecuaciones de los modelos de transición estratificado – no estratificado, con el fin de obtener las

velocidades superficiales de la fase gaseosa y líquida que cumplen con la transición estratificado – no estratificado en los modelos.

7.-Se realizó un diagrama de flujo que explique de forma esquemática los pasos o procesos a seguir del método iterativo a emplear para tener las velocidades superficiales de cada fase que se encuentran en la transición estratificado – no estratificado. Como se muestra a continuación en la Figura N° 18:

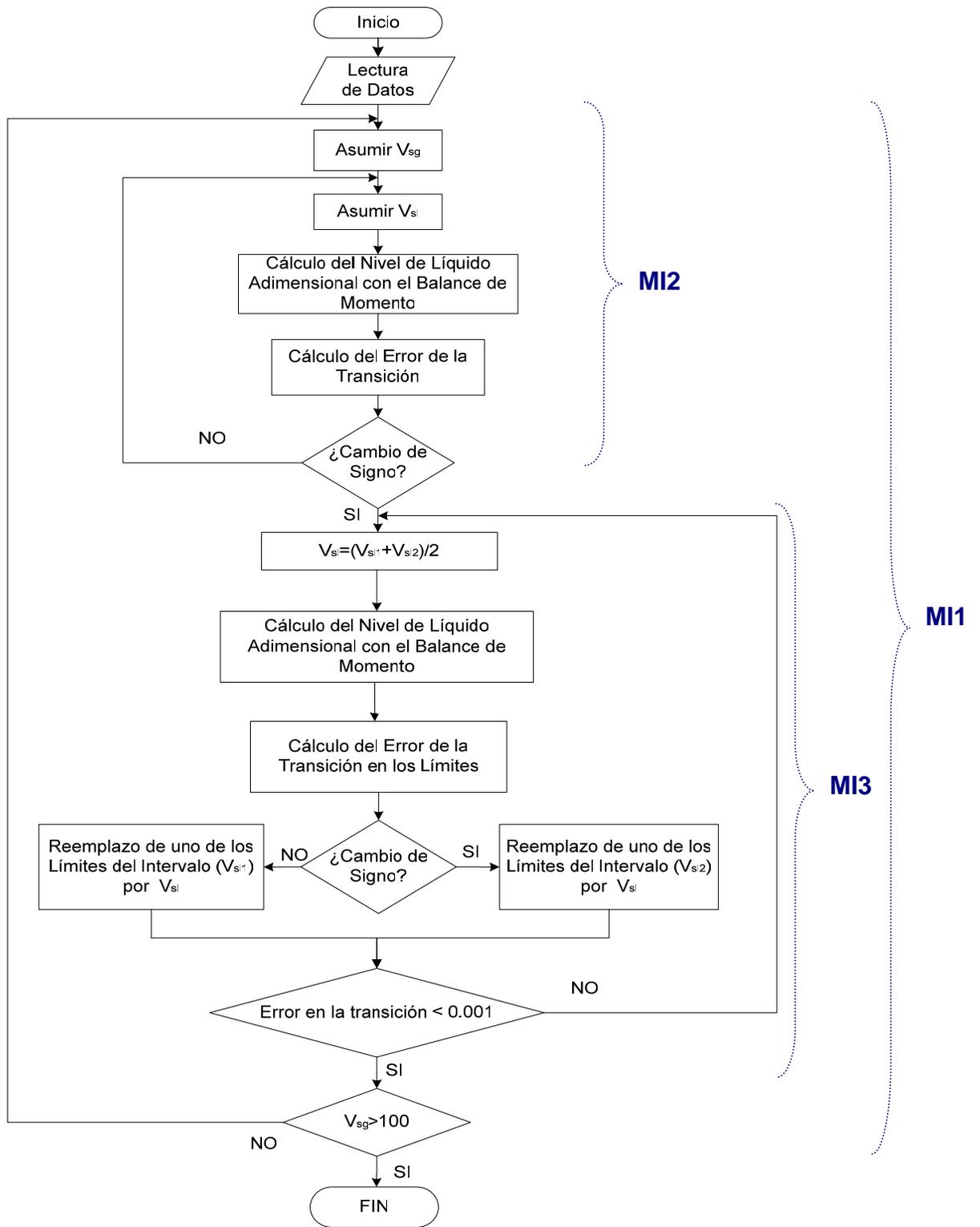


Figura N° 18 Diagrama de flujo del Algoritmo

El diagrama de flujo presentado es válido para la programación de los tres modelos mecanicistas (TD, VKH e IKH). A continuación se presenta el desarrollo del diagrama de flujo:

**7.1.-Lectura de datos:** En esta lectura de datos, el usuario deberá introducir obligatoriamente el diámetro de la tubería [m], densidad del gas y del líquido [ $\text{Kg/m}^3$ ], viscosidad del gas y del líquido [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ] y tensión superficial [ $\text{N}\cdot\text{m}$ ], la rugosidad y el ángulo de inclinación de la tubería con respecto a la horizontal, si se posee la rugosidad de la tubería y si se desea trabajar con una tubería ligeramente inclinada.

**7.2.-Método Iterativo 1 (MI1):** Consiste en aumentar la velocidad superficial del gas iniciando en 0.01m/s hasta que sea mayor a 100m/s. En el MI1 se comienza asumiendo un valor de velocidad superficial de gas según la equi-partición de la abscisa del mapa de patrón de flujo, en escala logarítmica en un rango entre 0.01y 100 m/s.

**7.3.-Método Iterativo 2 (MI2):** El objetivo de este método es acercarse a la velocidad superficial de líquido tal que satisfaga la ecuación de cantidad de movimiento y la ecuación de transición del modelo seleccionado, para cada velocidad superficial de gas del MI1. En este método se asume una semilla inicial de la velocidad superficial del líquido y con ambos valores de la velocidad superficial para cada fase se halla el nivel de líquido adimensional tal que satisfaga la ecuación de cantidad de movimiento, para luego determinar el error asociado a la ecuación de transición del modelo escogido (Taitel y Dukler (TD), Kelvin Helmholtz Viscoso (VKH) y No Viscoso (IKH)). Este método consistirá en aumentar el valor de  $V_{sl}$  en un rango entre 0.001 y 10 m/s, a un paso fijo, tal que consiga un cambio de signo en el error de la transición.

**7.4-Método Iterativo 3 (MI3):** El objetivo de este método de iteración es obtener la velocidad superficial de líquido que satisface la transición estratificado – no estratificado para los modelos Taitel y Dukler, Kelvin Helmholtz Viscoso y No Viscoso, para cada velocidad superficial de gas dentro de la equi-partición realizada en el eje de la abscisa.

En el MI3 se utiliza básicamente el método de bisección donde la variable es la velocidad superficial de líquido en un intervalo dado por los dos últimos valores de  $V_{sl}$  que trabajó MI2 y la función es el error asociado a la ecuación de la transición de cada modelo (TD, VKH e IKH). Con el MI2, se tiene la velocidad superficial de cada fase, una velocidad superficial de gas y en la fase líquida se tiene dos términos, el término presente y el término siguiente, de allí se procede a llamar un módulo denominado “Bisección en Balance de Cantidad de Movimiento” (BBM).

En el módulo BBM se calcula el nivel de líquido adimensional mediante el método de bisección, teniendo como límites de nivel de líquido una tolerancia de 0.0001 y 0.999. En BBM se satisface el balance de cantidad de movimiento para la velocidad superficial de gas y cada una de las velocidades superficiales de líquido, adicionalmente se llama una función que calcula un error asociado a la ecuación de transición según el modelo que se esté evaluando llamado: Transición\_Taitel\_Dukler, Transición\_VKH y Transición\_IKH.

Luego, como se tienen dos errores de transición del modelo que se está evaluando (uno por cada término de velocidad superficial de líquido), se observa el cambio de signo y, en función del cambio, habrá un aumento o disminución de la velocidad superficial del líquido hasta satisfacer una tolerancia en el error que devuelve la función de la transición del modelo mecanicista evaluado.

Los módulos Transición\_IKH, Transición\_Taitel\_Dukler y Transición\_VKH, Consisten en determinar el error asociado en la ecuación de transición de cada modelo, con la velocidad superficial de gas y de líquido y los parámetros geométricos necesarios en el cálculo de cada ecuación de transición para cada modelo.

8.-Se procedió a realizar la codificación del algoritmo con una secuencia no ambigua, finita y ordenada de instrucciones que originen las curvas de transición estratificado – no estratificado de los modelos mecanicistas TD, VKH e IKH, en el lenguaje de programación Basic, en una herramienta de diseño para aplicaciones de Windows: Visual-Basic. Dentro de la técnica de programación se empleó Programación Funcional y consta de varias secciones, las cuales pueden ser llamadas en diversos procedimientos y funciones.

9.-Se depuró el programa, corrigiendo los posibles errores de sintaxis y de ejecución.

10.-Una vez construida la herramienta computacional es necesario verificar su lógico y correcto funcionamiento, es por ello que se requiere de la validación de las curvas de transición estratificado - no estratificado de los modelos mecanicistas TD, VKH e IKH originado por el programa. La validación se realizó mediante la comparación de dichas curvas con las presentadas por la bibliografía y el uso de los datos experimentales obtenido en la identificación de los patrones de flujo. Se realizó de la siguiente manera:

10.1.- Se representaron las curvas de transición estratificado – no estratificado a 1cP, 100cP, 500cP y 1000cP obtenidos como resultados de los algoritmos de los modelos de TD, IKH y VKH, a escala logarítmica.

10.2.- Se compararon las curvas de transición estratificado – no estratificado obtenidas por los algoritmos de los modelos TD, IKH y VKH a distinta viscosidad de líquido (1cP, 100cP, 500cP y 1000cP) con los mapas de patrones de flujo de la bibliografía, superponiendo las curvas obtenidas por la herramienta computacional con las curvas visualizadas en la bibliografía; validando y verificando el correcto funcionamiento del nuevo instrumento computacional que reproduce las curvas de transición estratificado – no estratificado de los modelos TD, IKH y VKH.

10.3.- Se graficó la base de datos experimental con la línea de transición estratificado – no estratificado de los modelos TD, IKH y VKH en los mapas de patrones de flujo,

con velocidad superficial de líquido versus velocidad superficial de gas, arrojada por el programa para los sistemas aire – líquido (agua, kerosene, Purolub 150 y Purolub 320).

### **3.4. Análisis de los Resultados**

11.- Con la finalidad de cumplir con los objetivos específicos propuestos se muestran los datos experimentales con las curvas de transición estratificado – no estratificado de los modelos de Taitel y Dukler, Kelvin Helmholtz Viscoso y No Viscoso a 1cP, 1.3cP, 670cP y 1470cP; con la finalidad de analizar cual modelo se ajusta mejor a los datos para cada viscosidad de líquido.

12.- Se estudiaron los resultados obtenidos por el programa seleccionado, realizando un análisis de las curvas de transición que origina la herramienta computacional para cada modelo TD, IKH y VKH, para los sistemas aire - líquido (agua, kerosene, Purolub 150 y Purolub 320).

13.- Se observó el efecto de la viscosidad del líquido sobre la región de *rolling wave*, acoplando las curvas de transición de TD, VKH e IKH sobre un mapa de patrón de flujo a viscosidad de líquido de 1cP, 1.3cP, 670cP y 1470cP.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos en este trabajo especial de grado, comenzando con la identificación de los puntos experimentales (patrón de flujo, velocidad superficial de gas y de líquido y sistema en estudio) a partir de las imágenes fotográficas y videos proporcionados por PDVSA-Intevep. Seguidamente se presentará el desarrollo y codificación del algoritmo que permite construir las curvas de transición estratificado – no estratificado de los modelos de Taitel y Dukler (TD), Kelvin Helmholtz Viscoso (VKH) y Kelvin Helmholtz No Viscoso (IKH) y su validación con las curvas presentadas en la literatura. Se integraran los puntos identificados y los mapas de patrones de flujo que poseen las curvas de transición estratificado – no estratificado de TD, VKH e IKH. Y finalmente se identificará la zona *Rolling Wave* según los datos experimentales, evaluando la capacidad de predicción de los modelos TD, VKH e IKH en dicha zona para viscosidad de 1cP, 1.3cP, 670cP y 1470cP.

#### 4.1. Identificación del patrón de flujo

Para identificar los patrones de flujo que se observaron en los videos e imágenes fotográficas, de las pruebas realizadas en PDVSA – Intevep para los años 2000-2001, se identificaron cinco tipos de patrones de flujo que son estables, ellos son: Flujo estratificado liso (EL) y estratificado ondulado (EO), flujo intermitente (IN), flujo anular (AN) y flujo burbuja dispersa (BD).

A continuación se presentan fotografías de los patrones de flujo observados, en la Figura N° 19 muestra un patrón de flujo identificado como “Estratificado Liso”, en un sistema aire – líquido (Purolub 320) a velocidad superficial de líquido 0.006m/s y de gas de 0.3m/s. Se identificó este patrón de flujo porque se observa las fases completamente separadas, con una interfase lisa y en los vídeos no se observó ninguna inestabilidad en el patrón en toda la grabación de la prueba, lo que parecía en ocasiones estar inmóvil.



Figura N° 19 Imagen de Patrón de flujo “Estratificado Liso” en sistema aire - Purolub 320, en tubería horizontal de 5cm de diámetro.

Adicionalmente, en la

Figura N° 20 se muestra un tramo de tubería horizontal, aire – líquido (Purolub 320), con velocidad superficial de líquido de 0.03m/s y velocidad superficial de gas de 3m/s, de una prueba realizada el año 2000 en PDVSA-Intevep identificado como “Estratificado Ondulado”, donde al igual que en la figura anterior se observa la perfecta separación de las dos fases y una interfase con ondas definidas que no mojan las pared superior de la tubería.



Figura N° 20 Imagen de Patrón de flujo “Estratificado Ondulado” en sistema aire - Purolub 320, en tubería horizontal de 5cm de diámetro.

Dentro de los patrones de flujo no estratificado, se encontró en las pruebas revisadas los patrones de flujo intermitente (tapón de líquido y burbuja elongada), anular (anular y anular ondulado) y burbuja dispersa.

La Figura N° 21 muestra una serie de 5 imágenes de la prueba experimental de un tramo de tubería horizontal aire - Purolub 320 con velocidad superficial de líquido de 0.27m/s y velocidad superficial de gas 0.29m/s. En la que se identificó un patrón de flujo “Intermitente” debido a la formación de una burbuja de gas, que va creciendo a lo largo del tramo de la tubería. Además, se puede decir, que se identificó el patrón de flujo “Flujo Tapón”, debido a la existencia de pequeñas burbujas en los extremos de la burbuja de gas, lo que indica la existencia de la turbulencia que existe a estas condiciones de velocidad, siendo una diferencia notoria con el patrón de flujo burbuja elongada.

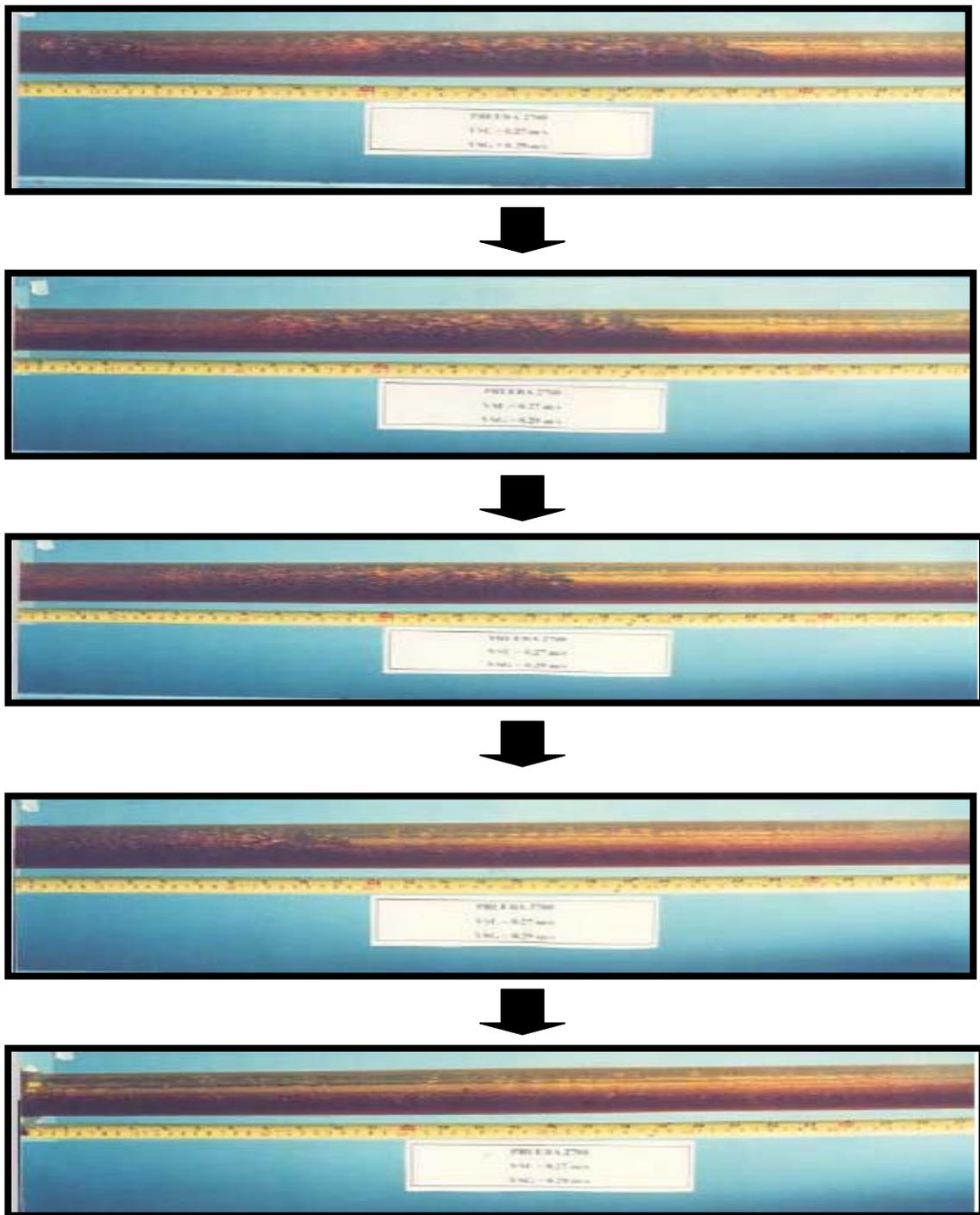


Figura N° 21 Sucesión fotográfica de Flujo Tapón de un sistema aire –Purolub 320 en tubería horizontal de 5cm de diámetro a  $V_{sl}=0.27\text{m/s}$  y  $V_{sg}=0.29\text{m/s}$

A continuación se muestra la Figura N° 22 otra serie de 5 fotos, con vista frontal, de un tramo de tubería horizontal de un sistema aire- Purolub 320 a velocidad superficial de líquido de 0.011m/s y velocidad superficial de gas de 0.295 m/s. En la figura se identificó el patrón de flujo “Intermitente”, específicamente burbuja elongada, porque en las imágenes no se observa las burbujas pequeñas que se encuentran alrededor de la burbuja grande como en la Figura N° 21.

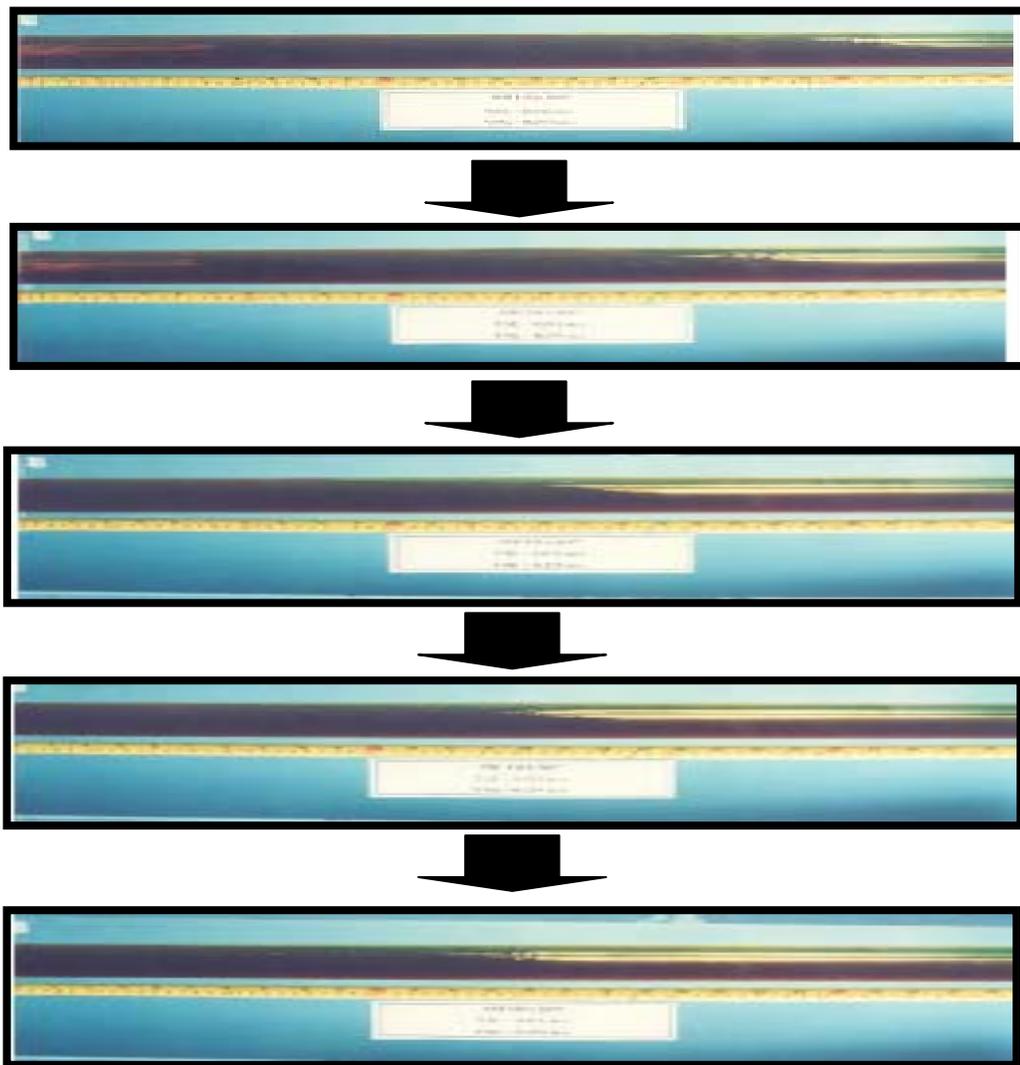


Figura N° 22 Sucesión fotográfica de Flujo Burbuja Elongada de un sistema aire –Purolub 320 en tubería horizontal de 5cm de diámetro a  $V_{sl}=0.011\text{m/s}$  y  $V_{sg}=0.295\text{m/s}$

El patrón de flujo de burbuja elongada en la Figura N° 22, era lo que se esperaba a estas condiciones de velocidades superficiales de cada fase, porque el patrón de flujo tapón ocurre a caudales de líquido mayores que del patrón burbuja elongada, según Asuaje (1999), correspondiente a lo observado en los videos e imágenes.

A su vez, se puede destacar que al aumentar la velocidad superficial del líquido en la tubería a una velocidad superficial de gas fija, promueve el incremento de la frecuencia de los tapones de líquido y la disminución de la longitud de los mismos.

En la siguiente Figura N° 23 también se muestra una prueba con aire – Purolub 320, donde se forma la burbuja elongada, de allí se observa su crecimiento, y su larga longitud en comparación con la Figura N° 21, que posee burbujas de gas mas cortas en el tope de la tubería debido al incremento de la velocidad superficial de líquido a 0.02m/s.

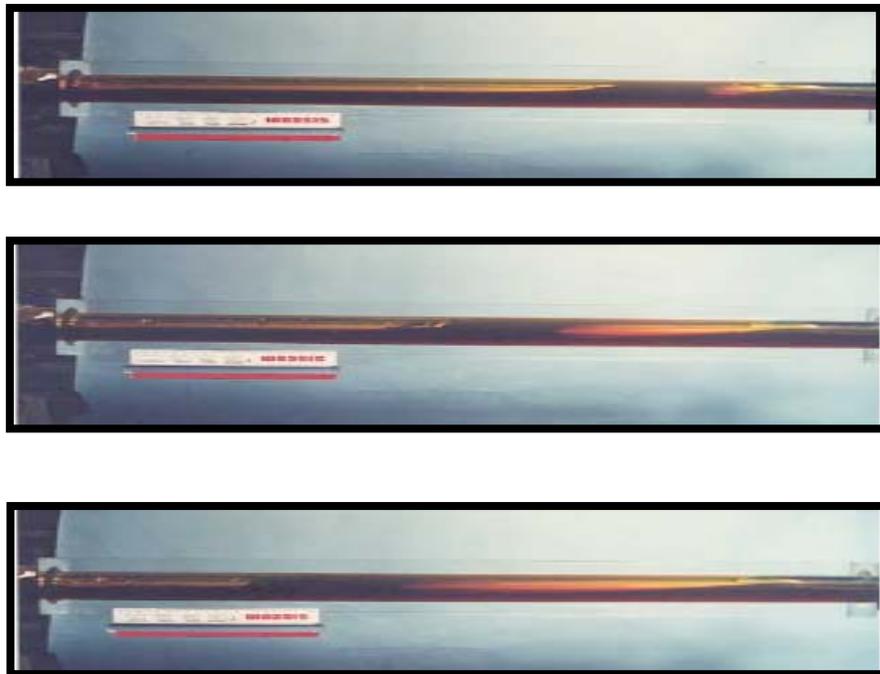


Figura N° 23 Sucesión fotográfica de Flujo Burbuja Elongada en un sistema aire – Purolub 320 en tubería horizontal de 5cm de diámetro a  $V_{sl}=0.02\text{m/s}$  y  $V_{sg}=0.295\text{m/s}$

En la siguiente Figura N° 24 se muestra una sucesión de imágenes en las que se muestra el patrón de flujo “Anular”, para un sistema aire - Purolub 150, con velocidad superficial de líquido de 0.036m/s y de gas de 7.58 m/s. En la figura se identificó este patrón de flujo porque se puede observar que el líquido moja las paredes internas de la tubería, formando un anillo alrededor de la misma. Además, la velocidad superficial de gas es suficientemente alta para que el gas atraviese la tubería por el centro de la misma y formar el anillo de líquido.

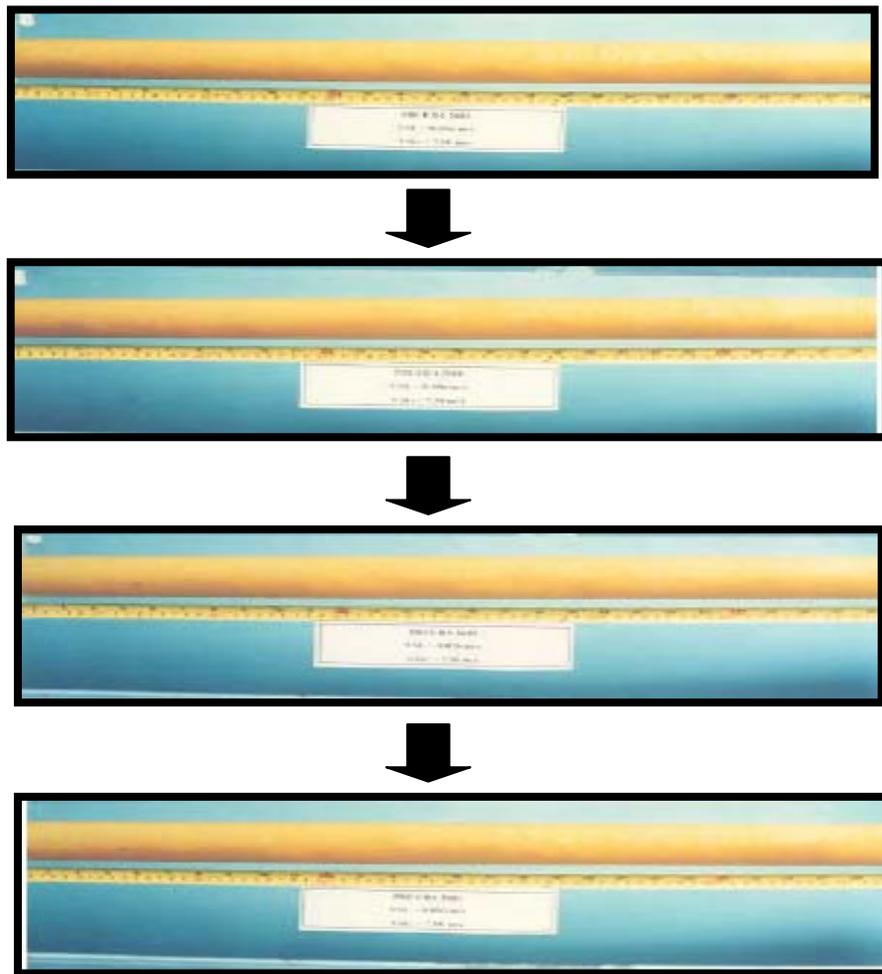


Figura N° 24 Flujo Anular en Aire-Purolub 150, en tubería horizontal de 5cm de diámetro a  $V_{sl}=0.036\text{m/s}$  y  $V_{sg}=7.58\text{m/s}$

A continuación se muestra la fotografía de un patrón de flujo identificado como “Burbuja Dispersa” en la Figura N° 25, se seleccionó este patrón de flujo

debido a que se observa pequeñas burbujas de gas inmersas en el líquido, como si fuese una mezcla homogénea. A su vez, se maneja una velocidad superficial de líquido mayor a la velocidad superficial de gas, lo que garantiza una alta probabilidad de encontrar este patrón de flujo, que se origina a elevados caudales de líquido en el sistema.



Figura N° 25 Flujo Burbuja Dispersa en Aire-Purolub 150 en tubería horizontal de 5cm de diámetro

En los APÉNDICE A, B, C y D se encuentra las tablas correspondientes a los puntos identificados, con la velocidad superficial de cada fase, el patrón de flujo presente y las propiedades del sistema.

#### 4.2. Desarrollo del Programa

La herramienta computacional fue diseñada con la finalidad de reproducir las curvas de transición estratificado – no estratificado según el modelo o los modelos seleccionados por el usuario, ya sea Taitel y Dukler, Kelvin Helmholtz Viscoso y Kelvin Helmholtz No Viscoso. En el desarrollo del algoritmo se requiere encontrar una velocidad superficial de gas y de líquido que permita resolver la ecuación combinada de balance de cantidad de movimiento y a su vez que satisfaga la ecuación de la transición establecida por el modelo mecanicista seleccionado por el usuario.

La codificación del algoritmo se realizó en el lenguaje de programación Basic en Visual Basic de Windows, debido a que es una herramienta fácilmente migrable a otros lenguajes, se puede obtener amplia información, documentación y fuentes para su uso, es un entorno adecuado para realizar cualquier tipo de proyecto, es de fácil manejo y es una versión integrada de las aplicaciones de office tanto Windows o Mac que permite programar macros para extender y automatizar las funciones y habilidades en documentos como por ejemplo las hojas de datos de Excel.

La compilación del programa ya codificado en Visual Basic requiere como mínimo de una computadora con Windows XP<sup>®</sup> y Microsoft Excel XP<sup>®</sup>.

El programa básicamente trabaja en un libro de Excel en el cual se tiene una hoja de datos llamada “Hoja Inicial”, como se muestra en la Figura N° 26. Donde se introduce el diámetro de la tubería en metros, la densidad y la viscosidad de cada una de las fases, en Kg/m<sup>3</sup> y Pa.s, respectivamente, la tensión superficial en N\*m, la rugosidad de la tubería [m] el ángulo de inclinación [°] de la misma con respecto a la horizontal. Se selecciona el o los modelos de predicción de la transición estratificado – no estratificado entre ellos Taitel y Dukler (1976), Kelvin Helmholtz Viscoso (VKH) y Kelvin Helmholtz No Viscoso (IKH) y se pulsa el botón OK.

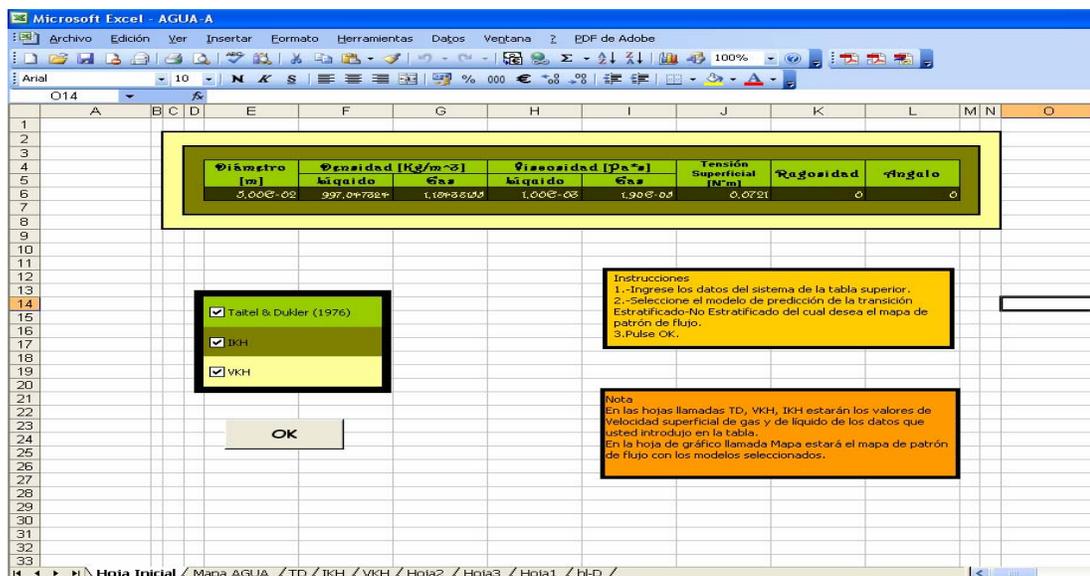


Figura N° 26 Hoja Inicial del programa

De la compilación del programa se tiene como resultado tres hojas de datos en el mismo libro de Excel en el que se haya ejecutado el programa, llamadas “TD”, “VKH” e “IKH”. Las hojas mencionadas tendrán los valores de velocidad superficial de gas y de líquido que corresponden a la transición según el modelo correspondiente a la hoja seleccionada y a los ítems seleccionados en la “Hoja Inicial” del libro de Excel. Adicionalmente, se tiene una hoja de gráfico llamada “Mapa” como se muestra en la Figura N° 27, en la que se representan la o las curvas de transición según lo seleccionado por el usuario, para los datos de entrada introducidos en la “Hoja Inicial”.

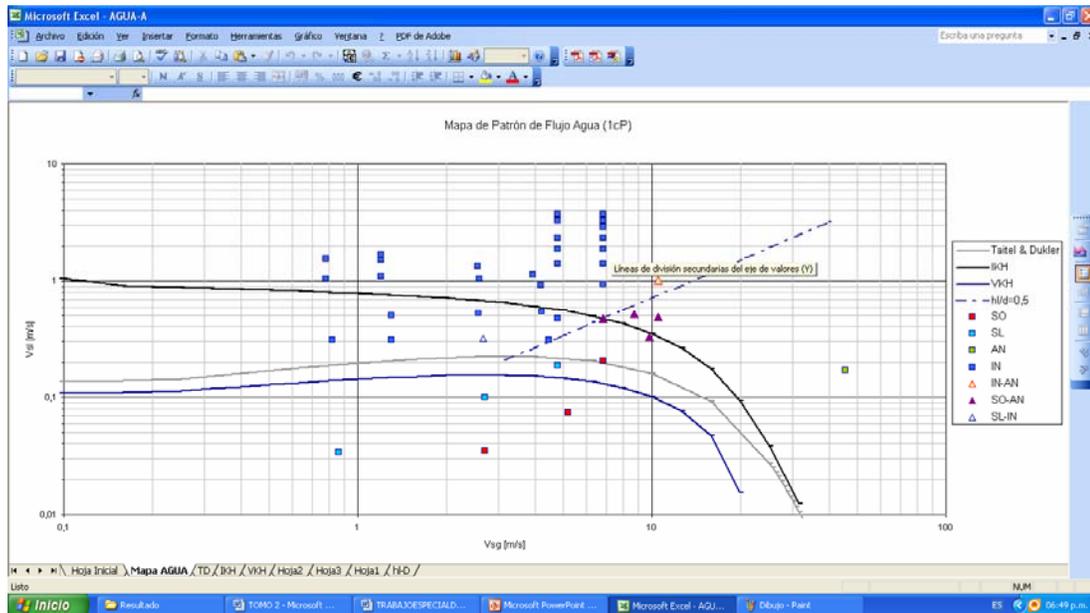


Figura N° 27 Hoja de gráfico. “Mapa”

La codificación del algoritmo está constituido por varios procedimientos y funciones, con la finalidad de resolver las dos ecuaciones implícitas: ecuación combinada de cantidad de movimiento (Ecuación 12) y la ecuación de la transición estratificado – no estratificado para cada modelo (Ecuaciones 31; 56 o 58). Para esto fue necesario emplear métodos iterativos que permitieran determinar la velocidad

superficial de líquido y el nivel de líquido para distintos valores de velocidad superficial de gas.

Para resolver ambas ecuaciones simultáneamente se procedió a identificar las incógnitas comunes en ambas ecuaciones, las cuales corresponden a las velocidades reales para cada fase y el nivel de líquido.

Tomando en cuenta que se tienen dos ecuaciones y tres incógnitas, se procedió inicialmente con el modelo de Taitel y Dukler (TD), donde se utilizó como punto pivote la velocidad real de gas con una semilla inicial del valor mínimo equivalente del observado en los mapas de patrones de flujo para la velocidad superficial del gas. Luego se halla el nivel del líquido en la tubería con la ecuación de transición estratificado – no estratificado del modelo de TD (31) y seguido de ello se procedió a buscar la velocidad real de líquido que satisface la ecuación combinada de cantidad de movimiento (12). Como resultado de este primer procedimiento se obtuvo una inconsistencia numérica, porque con los valores de la velocidad real de gas y el nivel de líquido encontrado con la ecuación de transición, no se podía obtener la velocidad real de líquido tal que cumpla con el balance de cantidad de movimiento. Debido a que al calcular de primer lugar el nivel de líquido con la ecuación 31 no se tiene una solución única de esta variable lo que no garantiza determinar la velocidad real de líquido con la ecuación 12.

Debido a las inconsistencias obtenidas (soluciones múltiples del nivel de líquido) de esta primera propuesta de iteración para resolver las ecuación del modelo de Taitel y Dukler, se siguió con el procedimiento planteado en la publicación de Taitel y Dukler (1976) donde se trabaja primero con la ecuación combinada de cantidad de movimiento y luego con la transición, describiendo así el fenómeno físico, el cual se basa de la igualdad del balance de fuerzas para la fase líquida y gaseosa. De tal manera, que al aumentar el caudal de líquido, habrá un balance de fuerzas para la fase gaseosa tal que satisfaga la igualdad, independientemente si se aumenta o disminuye el caudal de gas. Por lo tanto habrá un sólo nivel de líquido, que

cumplirá con el balance de fuerzas entre las fases y la transición entre el patrón de flujo estratificado – no estratificado.

Adicionalmente, se buscaba un programa eficiente, con corto tiempo de ejecución, que arrojara resultados coherentes con la bibliografía y representara fielmente los modelos de transición estratificado – no estratificado y los fenómenos físicos, partiendo del balance de cantidad de movimiento y luego de la representación de cada una de las ecuaciones de la transición en estudio.

Seguidamente, se empleó un algoritmo en el que se presenta como semilla inicial - pivote la velocidad superficial del gas y un rango de operaciones de velocidad superficial de líquido, obtenido de la observación de los mapas de patrones de flujo de Mandhane et al (1974) y Taitel y Dukler (1976), donde la velocidad superficial de líquido se encuentra en un rango de 0.001 a 10m/s y la velocidad superficial del gas entre 0.1 y 100m/s; independientemente de las propiedades del sistema para tuberías horizontales con diámetro menor a 5cm. Por otra parte, se utilizó la ecuación combinada de cantidad de movimiento de la forma adimensional, con los parámetros geométricos adimensionalizados, con la finalidad de evitar inconsistencia de unidades y acotar el nivel de líquido adimensional en un intervalo de 0.001 a 0.999.

Al tener definidos los intervalos en que se encuentran las velocidades superficiales de cada fase más el nivel de líquido adimensional, se parte del método de bisección (método de búsqueda de la raíz) con un módulo llamado “Bisección\_en\_Balance\_de\_Momento”, ver APÉNDICE E y F, donde para una velocidad superficial de líquido y de gas, se toman los límites del intervalo del nivel de líquido adimensional (única incógnita). Con ello se calculan las velocidades reales de cada fase y el error asociado a la ecuación de balance de cantidad de movimiento para cada límite del intervalo del nivel de líquido, dividiendo el intervalo a la mitad, garantizando un cambio de signo y encerrando la única raíz que determinará el nivel

de líquido que satisface la ecuación combinada de cantidad de movimiento para la velocidad superficial de líquido y de gas introducidas en el módulo.

Se utilizó el método de bisección para la búsqueda del nivel del líquido adimensional (la raíz de la ecuación), porque en la ecuación 12 existe un cambio de signo y es continua en el intervalo de trabajo; es decir, sólo posee discontinuidad para un nivel de líquido igual a cero, donde sólo pasa gas en la tubería y no se tiene un sistema bifásico gas – líquido. La explicación del método de bisección se puede encontrar en el APÉNDICE E.

Luego, con la velocidad superficial de cada fase más el nivel de líquido que cumplen con la ecuación 12, se procede a ingresar a la función que muestre el error asociado a la ecuación de transición del modelo, en base a este error se observa si existe un cambio de signo, según esto se varía la velocidad del líquido hasta que el error cumpla una tolerancia de 0.001, siendo suficiente para la magnitud de los valores que se manejan. Este procedimiento se empleará para un barrido en la velocidad superficial de gas que permita puntos equidistantes en el eje de las abscisas en el mapa de patrón de flujo.

Con respecto a los modelos IKH y VKH, se utilizó la ecuación 55 que es el criterio de estabilidad de KH, donde la ecuación 55 predice la transición VKH, mientras que para el modelo IKH desprecian los términos asociados a los esfuerzos de corte ( $C_V - C_{IV}$ ). Se llegó a esta conclusión, porque inicialmente se trabajó con las ecuaciones 56 y 58 y no se lograba obtener ningún valor de nivel de líquido que satisficiera la transición de los modelos, el método no converge para esas ecuaciones; es decir, el método iterativo planteado en el algoritmo necesitaba de un cambio de signo para hallar el nivel de líquido y utilizando las ecuaciones 56 y 58, no se encontraba el cambio de signo y el error asociado a la transición tenía inestabilidades tal que incrementaba y disminuía en el intervalo del nivel de líquido sin ningún patrón definido.

Además, la inconsistencia numérica prevalece debido a la inestabilidad de Kelvin Helmholtz, tal como lo explica Mata et al. (2002) donde a velocidades de gas mayor a la velocidad crítica se tiene un régimen estable, mientras que a velocidades menores a la velocidad crítica se tiene un régimen inestable, como se muestra en la Figura N° 28. Es decir, el flujo estratificado pierde la estabilidad y entra en una región inestable en la que no se tiene un valor de velocidad de líquido tal que cumpla con la transición y entra en un ciclo indefinido y por esta razón el programa nunca finaliza.

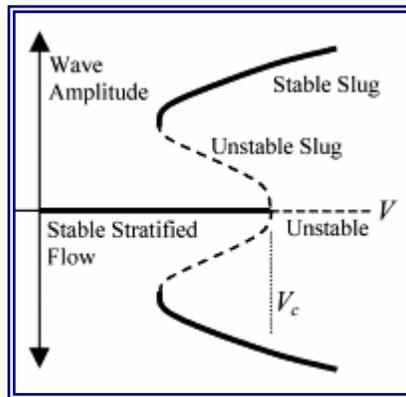


Figura N° 28 Diagrama de inestabilidad de flujo estratificado (Adaptado de Mata et al. 2002)

La codificación completa del algoritmo en el lenguaje de Basic se puede observar en el APÉNDICE F.

#### 4.3. Validación de los Modelos Programados con la Literatura

La validación del algoritmo para los distintos modelos de transición estratificado – no estratificado se ha realizado solapando los mapas de patrón de flujo de cada modelo originados por el programa con los observados en la publicación de Barnea (1990).

En la publicación se encuentra los mapas correspondientes a sistema aire – líquido a presión atmosférica en tubería horizontal de 5cm de diámetro, conforme a esto se ingresaron los siguientes datos en la “Hoja Inicial”:

- Diámetro de tubería: 0.05m

- Densidad del líquido:  $997.047 \text{ kg/m}^3$
- Densidad del gas:  $1,184 \text{ kg/m}^3$
- Viscosidad del gas:  $1,90\text{E-}05 \text{ Pa.s}$
- Tensión superficial :  $0.0721 \text{ N.m}$
- Rugosidad: 0
- Ángulo de inclinación: 0
- Viscosidad del líquido:  $(1\text{e-}3;0.1;0.5;1;5) \text{ Pa.s}$

A continuación se muestra la primera validación realizada al programa, correspondiente al modelo de Taitel y Dukler (1976), en la Figura N° 29.

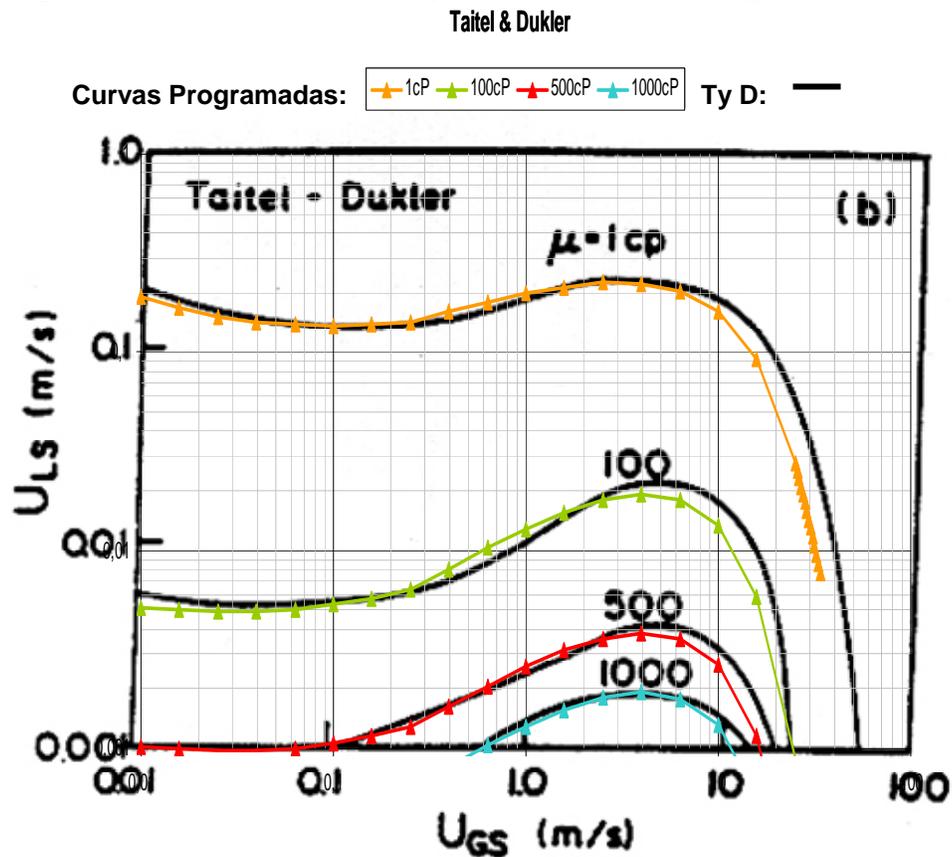


Figura N° 29 Validación del Modelo de Taitel y Dukler programado con la literatura

En la Figura N°29 se puede observar una imagen escaneada, que muestra la curva de transición estratificado – no estratificado para Taitel y Dukler a viscosidad de líquido de 1cP, 100cP, 500cP y 1000cP extraída del trabajo de Barnea (1990) (líneas continuas de color negro) y sobre esta imagen existe una gráfica con las curvas de transición del modelo TD desarrollado por el programa propuesto (líneas continuas con triángulos de color naranja, verde, rojo y azul). Con la Figura N°29 se puede decir que el programa está validado para este modelo, debido a que las curvas de transición trazadas por el programa presentan el mismo comportamiento que la imagen escaneada, trabajan dentro de un mismo rango de viscosidad de líquido y se superponen las curvas teóricas con las trazadas por el programa; lo que garantiza que el algoritmo empleado reproduce el modelo de Taitel y Dukler (1976) para tubería horizontal de 5cm de diámetro.

La Figura N° 30 muestra la validación de la herramienta computacional para el módulo de IKH, comparando la gráfica plasmada en la investigación de Barnea (1990) (líneas continuas de color negro) y la curva trazada por el programa desarrollado en este trabajo especial de grado para viscosidad de líquido de 1cP, 100cP, 500cP, 1000cP y 5000cP (líneas continuas con triángulos de color naranja, verde, rojo, azul y morado). De la Figura N° 30, se observa claramente que la transición trazada por el programa para el modelo de Kelvin-Helmholtz No Viscoso (IKH) se acerca a la curva teórica representada en la publicación de Barnea (1990), por lo tanto se puede concluir que la sección del modelo de IKH del algoritmo puede ser empleada para el trazado de curvas a partir de este modelo para cualquier sistema bifásico gas – líquido, en tubería horizontal de 5cm de diámetro.

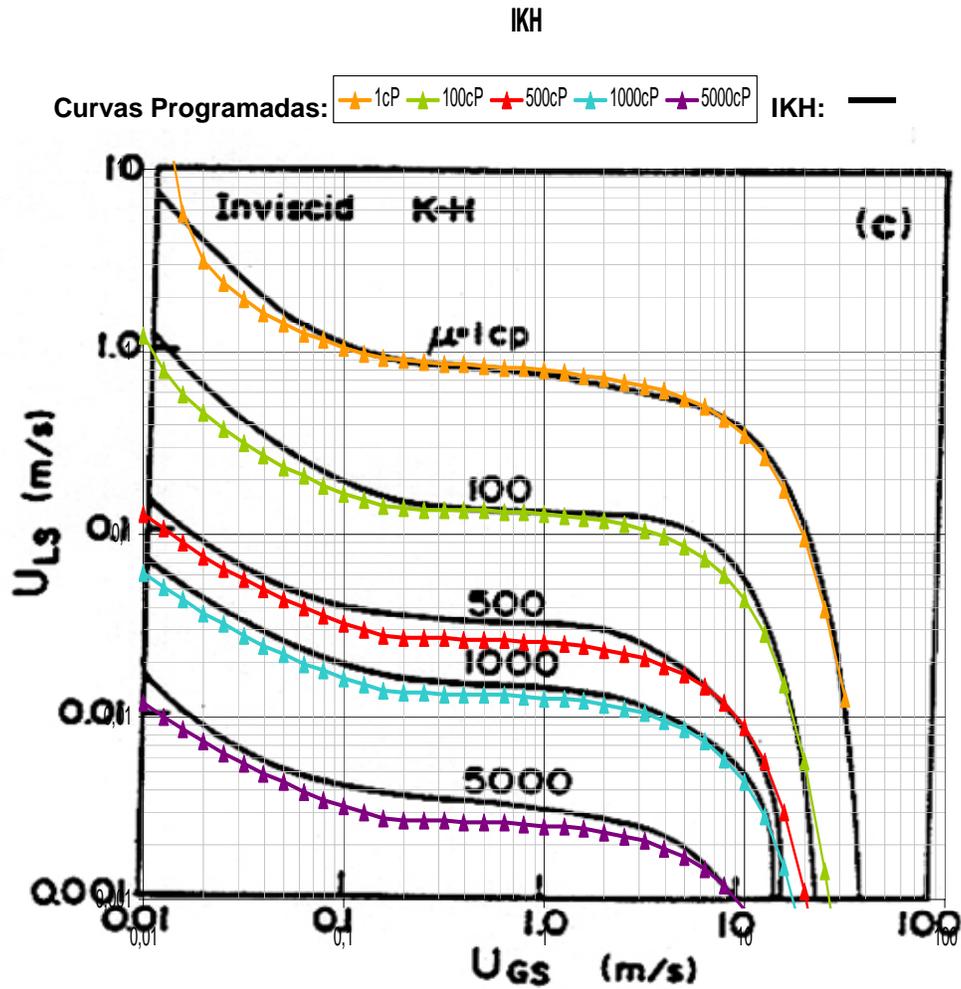


Figura N° 30 Validación del Modelo de IKH Programado con la Literatura

De igual manera se observa en la Figura N° 31 donde se solapa las curvas trazadas por el programa (líneas continuas con triángulos de color naranja, verde, rojo, azul y morado) con la curva teórica VKH, del trabajo de Barnea (1990) (líneas continuas de color negro).

Por lo tanto se valida el algoritmo del modelo VKH, como han sido validados los modelos de IKH y TD, en tubería horizontal de 5cm de diámetro. Se puede concluir, que el algoritmo planteado para resolver las ecuaciones de balance de momento combinada y la transición de cada modelo es aplicable para cualquier

viscosidad del líquido en tubería horizontal de 5cm de diámetro, ya que reproduce las curvas de transición tal como las ilustradas en el artículo de Barnea (1990).

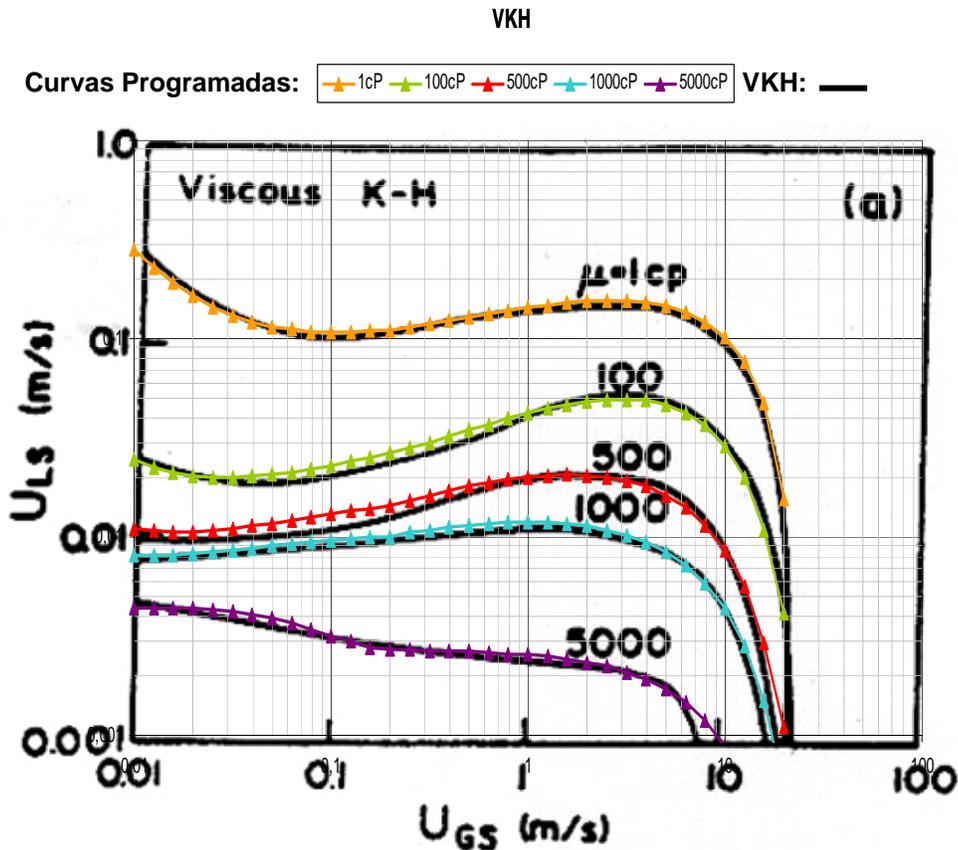


Figura N° 31 Validación del Modelo de VKH Programado con la Literatura

La herramienta computacional está diseñada para generar las curvas de transición de los tres modelos para cualquier condición operacional, es por ello que se recomienda validar el algoritmo con sistemas de diferentes ángulos de inclinación y otros diámetros de la tubería.

#### 4.4. Comparación de los Modelos TD, IKH y VKH con Datos Experimentales y Predicción de la Zona *Rolling Wave*

Para la validación de los criterios de transición de Taitel y Dukler, Kelvin Helmholtz Viscoso y No Viscoso, se presentan los mapas de patrones de flujo con datos experimentales que contienen la velocidad superficial de cada fase y el patrón

de flujo del sistema. Estos datos experimentales se lograron mediante la observación de las imágenes de vídeo que fueron tomadas a través de una cámara de alta velocidad e imágenes fotográficas, tal como fue mostrado en la sección anterior.

En la Figura N° 32, se muestra un mapa de patrón de flujo para un sistema aire – agua de tubería horizontal de 5cm de diámetro, en el que se encuentra ubicados los puntos experimentales correspondientes a patrones de flujo estables o perfectamente definidos como el estratificado ondulado (EO), estratificado liso (EL), anular (AN), intermitente (IN) y a su vez se notó la presencia de una serie de transiciones de patrones de flujo, como son intermitente - anular (I-AN), estratificado ondulado – anular (EO-AN) y estratificado liso – intermitente (EL-IN), que ejemplifican las transiciones entre los patrones involucrados, lo cual verifica el hecho de que un flujo no cambia instantáneamente de un patrón de flujo a otro.

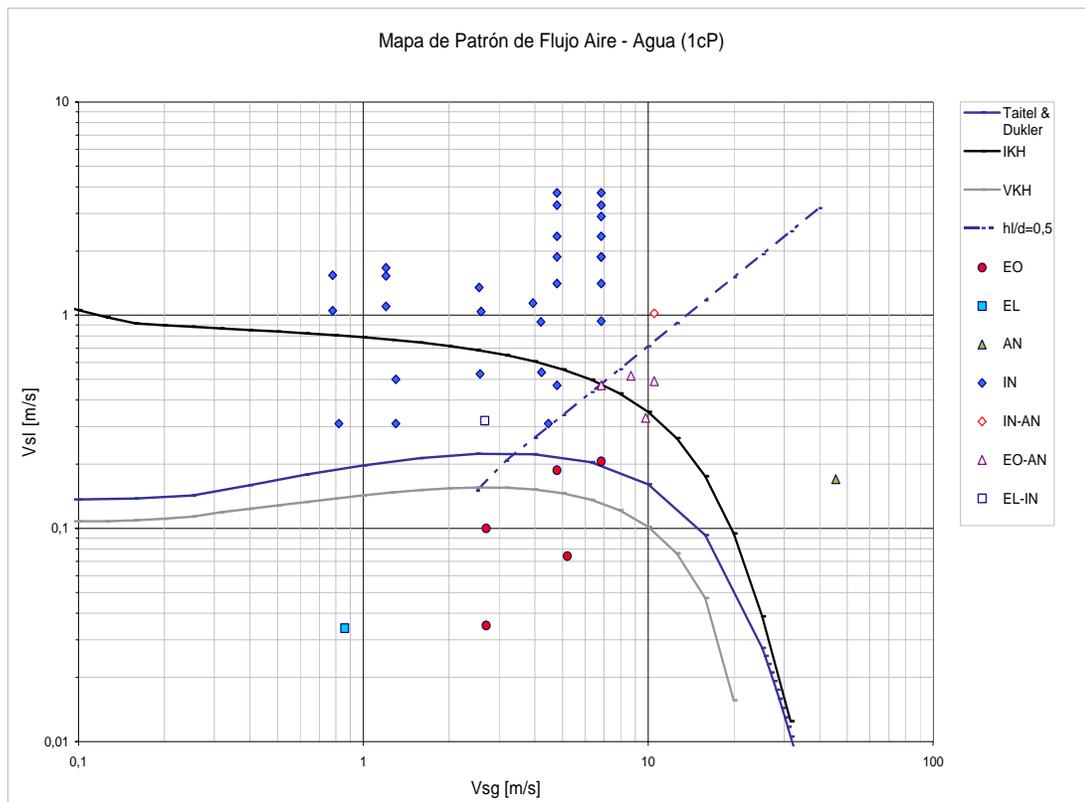


Figura N° 32 Mapa de patrón de flujo de un sistema Aire – Agua, en tubería horizontal de 5cm de diámetro.

En Figura N° 32 se observa que la transición estratificado – intermitente se logra a una velocidad superficial de líquido entre 0.1m/s y 0.2m/s en un intervalo de 0.1 a 10m/s para la velocidad superficial del gas. Mientras en la transición estratificado – anular ocurre a velocidad superficial de líquido menor a 0.1m/s en el intervalo de 10 a 20m/s para la velocidad superficial de gas. De la figura, se observa como el modelo de Taitel y Dukler, presenta mejor cota para la transición estratificado – no estratificado para este sistema agua - aire, puesto que limita perfectamente las zonas de los patrones de flujo. Mientras que el modelo de VKH no limita la zona estratificado del mapa mostrado, porque existen puntos identificados como patrón de flujo estratificado por arriba de la curva de VKH. Así mismo se tiene el modelo de IKH, el cual no limita la zona del patrón de flujo intermitente debido a que existen puntos de este patrón de flujo por debajo de la curva IKH.

Se puede notar en la figura, que no se identificó ningún punto del patrón de flujo *Rolling wave*. Y la zona que según Barnea (1993) propone como *Rolling wave*, entre las curvas VKH e IKH y por debajo de  $h_l/d=0.5$ , se identificó dos puntos que presentaban los patrones de flujo estratificado liso y dos puntos que presentaban la transición estratificado ondulado – anular.

En el siguiente mapa (Figura N° 33) se presentan resultados similares a los obtenidos con aire – agua, con una variación de viscosidad de líquido de 1.3cP, sistema de aire – kerosene en tubería horizontal de 5cm de diámetro. En este mapa se muestra como patrones estables: estratificado ondulado (EO), intermitente (IN), anular (AN), burbuja dispersa (BD) y como transición: estratificado liso – estratificado ondulado (EL-EO), estratificado liso – intermitente (EL-IN), estratificado ondulado – anular (EO-AN), intermitente – burbuja dispersa (IN-BD).

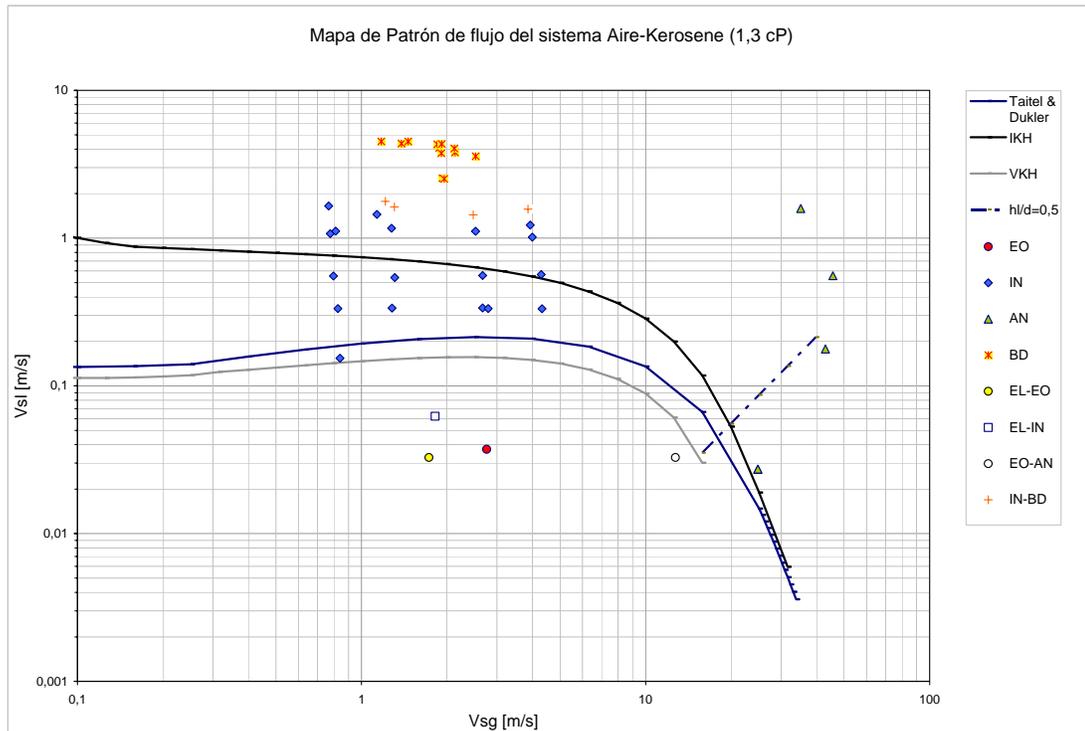


Figura N° 33 Mapa de patrón de flujo de un sistema Aire – Kerosene, en tubería horizontal de 5cm de diámetro.

En la Figura N° 33, se puede apreciar que se trabajaron con velocidades superficiales de líquido superiores a 0.1m/s, excepto 4 puntos, por esta razón se observó en su mayoría el patrón de flujo intermitente. La transición intermitente burbuja dispersa se logra a  $V_{sl}$  aproximadamente de 2m/s para un intervalo de  $V_{sg}$  de 1 a 6m/s. A pesar de los pocos puntos que se tienen para predecir la transición estratificado – no estratificado, se puede decir, que sobre la base de los puntos experimentales presentados en la figura, el modelo VKH representa la mejor curva que limita la zona del patrón de flujo intermitente, debido a que por encima de esta curva se presentan todos los puntos del patrón de flujo intermitente.

Para el mapa de patrón de flujo presentado en la Figura N°33 del sistema aire – kerosene, se puede observar que en la zona *Rolling wave* que expone Barnea (1993), no se observó ningún punto con este patrón de flujo en las imágenes y videos, debido a que no se desarrolló pruebas experimentales talque estuviesen dentro de la

zona *rolling wave* expuesta por Barnea (1993). Por lo tanto no se pudo verificar si el modelo predice correctamente la zona del patrón de flujo *rolling wave*.

En otro orden de ideas, es importante mencionar que sólo se pudo alcanzar observar en los vídeos un punto de flujo estratificado ondulado, un punto de la transición estratificado liso – ondulado y dos puntos de transición estratificado – no estratificado (intermitente y anular), cercanos a la curva de transición VKH.

A continuación se muestra en la Figura N° 34 un mapa de patrón de flujo para un sistema aire – Purolub 150 (viscosidad 691cP) de tubería horizontal de 5cm de diámetro. En este mapa, se tiene como patrones de flujo estables: estratificado liso (EL), estratificado ondulado (EO), intermitente (IN), anular (AN), burbuja dispersa (BD) y como transición: estratificado liso – estratificado ondulado (EL-EO), estratificado liso – intermitente (EL-IN), intermitente – anular (IN-AN), estratificado-ondular – anular (EO-AN), intermitente – burbuja dispersa (IN-BD).

En la Figura N° 34, se aprecia que la región de patrón de flujo intermitente abarca gran parte de la región central del mapa de patrón de flujo, con  $V_{sl}$  entre 0.01 a 2m/s y  $V_{sg}$  de 0.02 a 6m/s. En la figura se observa la transición del patrón intermitente al patrón de burbuja dispersa en un rango de  $V_{sg}$  entre 0.1 y 0.7m/s y  $V_{sl}$  de aproximadamente 1m/s. El patrón de flujo estratificado ondulado se encuentra en una región acotada entre 4 y 20m/s para  $V_{sg}$  y para  $V_{sl}$  se tiene un intervalo de 0.003 a 0.03m/s. Adicionalmente, en lo que respecta al flujo anular, se puede encontrar a  $V_{sg}$  mayores a 10m/s, con  $V_{sl}$  entre 0.01 y 0.3m/s.

La zona *Rolling wave* según la publicación de Barnea (1993) está definida como la región entre las curvas VKH e IKH por debajo de  $hl/D=0.5$ . Según esta ubicación de la zona *Rolling wave*, se puede observar en la Figura N° 34 para el sistema aire – Purolub 150 la ausencia de la zona debido a la superposición de las curvas VKH e IKH. Adicionalmente, en los videos e imágenes fotográficas no se observó ninguna prueba experimental que tuviera las características de este patrón de flujo.

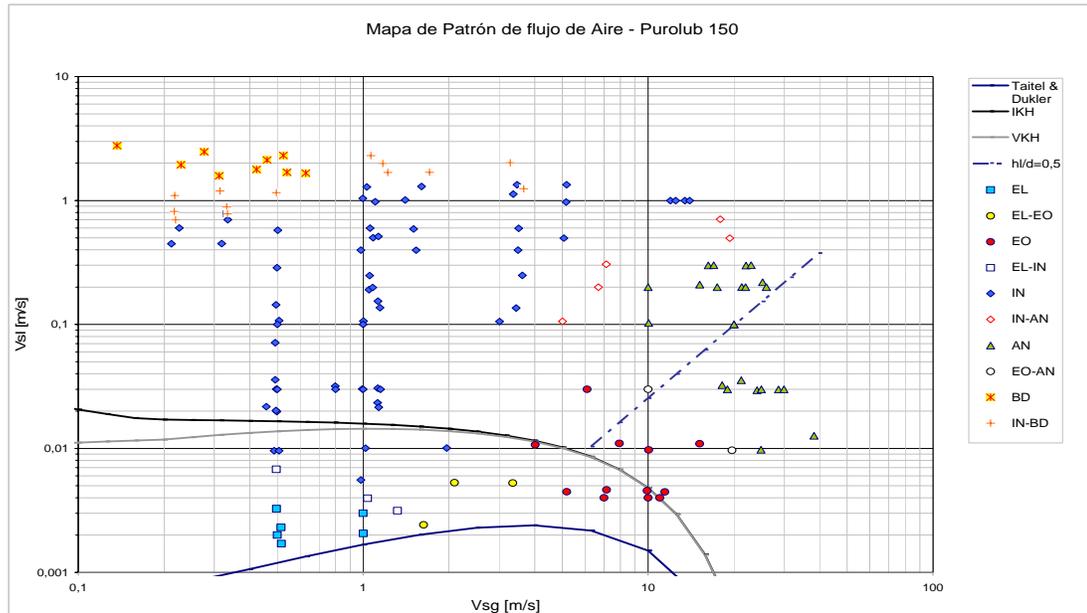


Figura N° 34 Mapa de patrón de flujo de un sistema Aire – Purolub 150, en tubería horizontal de 5cm de diámetro.

La zona de flujo estratificado ha disminuido considerablemente en comparación con los mapas de patrones de flujo aire – agua y aire – kerosene, asociado al aumento de la viscosidad del líquido. La disminución de la zona de patrón de flujo estratificado era lo que se esperaba debido a que el incremento de la viscosidad en una misma velocidad superficial de gas, aumenta el nivel de líquido en la tubería tal que pueda garantizar el equilibrio entre las fases, de aparecer una perturbación, el líquido puede alcanzar el tope de la tubería perdiendo la configuración de flujo estratificado. De la Figura N° 34, se obtiene el modelo de TD no predice la zona de patrón de flujo estratificado, debido a que se encontró datos experimentales de este patrón de flujo por encima de la curva de este modelo.

Además, la región del patrón de flujo estratificado ondulado está limitada por las curvas de TD y VKH e IKH, tal como lo predice Barnea en su artículo del año 1993. Mientras para la región del patrón de flujo anular, se observa en la Figura N° 34, como se encuentran los puntos experimentales por encima de VKH e IKH, sin embargo no está limitada la región por la curva  $h_l/D=0,5$ , como se preveía del

artículo de Barnea (1993), ya que los puntos se encuentran desplazados por encima de la curva  $h_l/D=0.5$ .

A continuación se muestra el mapa de patrón de flujo para el sistema aire – Purolub 320, de tubería horizontal de 5m de diámetro (Figura N° 35). Este mapa presenta los diferentes patrones de flujo como estratificado liso (EL), estratificado ondulado (EO), intermitente (IN), anular (AN), burbuja dispersa (BD), y las siguientes transiciones: estratificado liso – ondulado (EL - EO), estratificado liso – intermitente (EL-IN), intermitente – anular (IN – AN) y estratificado ondulado – anular (EO - AN). Adicionalmente se observa cuatro puntos experimentales, que presentaron la desviación del patrón de flujo estratificado “*Rolling wave*” (RW).

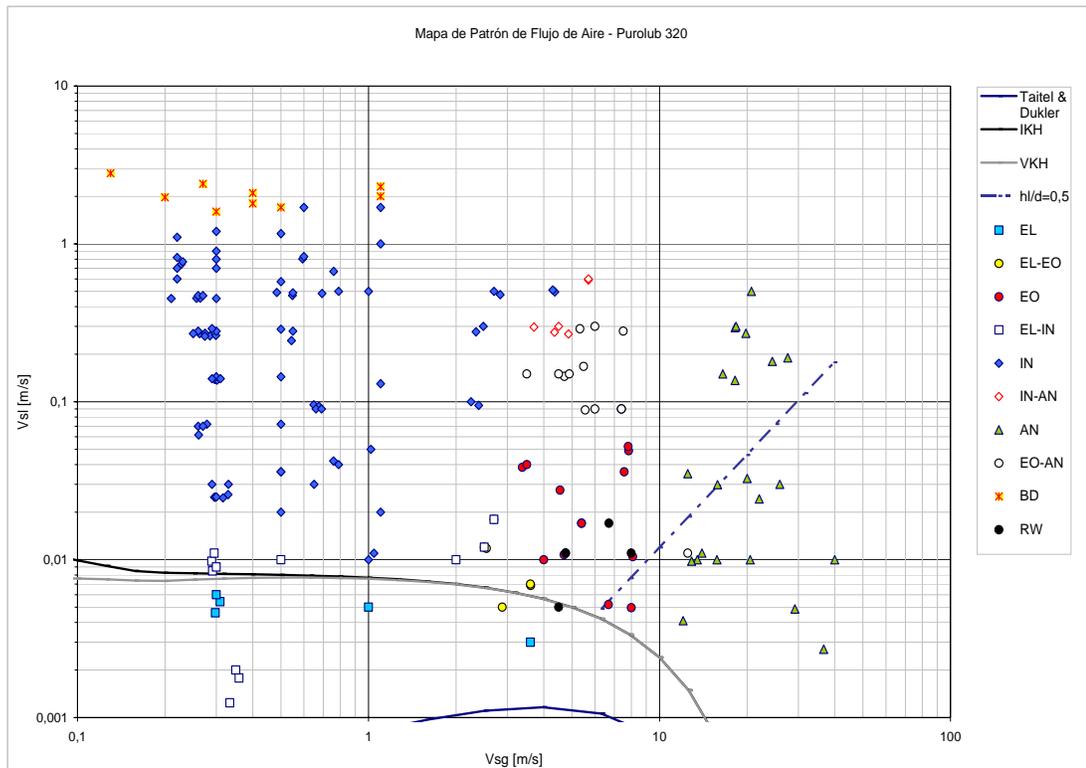


Figura N° 35 Mapa de patrón de flujo de un sistema Aire – Purolub 320, en tubería horizontal de 5cm de diámetro.

En la figura se observa que una gran parte del mapa pertenece al patrón de flujo intermitente, análogo al mapa de patrón de flujo del sistema aire – Purolub 150

de la Figura N° 34, esta zona abarca las velocidades superficiales de líquido alrededor de 0.01 y 1 m/s y velocidad superficial de gas de 0.02 y 6 m/s. El patrón de flujo burbuja dispersa se aprecia dentro de un rango de 0.1 y 2 m/s para la velocidad superficial de gas, mientras para el líquido se tiene de 1 y 3 m/s. Adicionalmente, el patrón de flujo anular se observa para velocidades superficiales de gas mayores a 10 m/s y un amplio rango de velocidad superficial de líquido entre 0.002 y 0.8 m/s. El patrón de flujo estratificado ondulado se encuentra en una región acotada entre 3 y 8 m/s para  $V_{sg}$  y para  $V_{sl}$  se tiene un intervalo de 0.005 y 0.06 m/s.

De la Figura N° 35 se observa, que sigue el comportamiento de la disminución de la zona estratificada al aumentar la viscosidad del líquido del sistema. El modelo de Taitel y Dukler prácticamente desprecia el patrón de flujo estratificado y en los modelos de IKH y VKH se solapan sus curvas, limitando una región más pequeña para el patrón de flujo estratificado en comparación a la Figura N° 34. A su vez, se puede observar que en la figura existen puntos experimentales identificados como estratificado liso y ondulado, lo que garantiza la existencia de este patrón de flujo para esta viscosidad y complementa que el modelo de Taitel y Dukler no predice la transición estratificado – no estratificado para sistemas aire – líquido con viscosidad aproximada de 1500 cP.

Las curvas de los modelos VKH e IKH predicen la estabilidad del flujo estratificado para este sistema de aire – Purolub 320, debido a que el área que encierra estas curvas poseen los puntos de flujo estratificado liso estable, sin embargo, no contienen los puntos experimentales identificados como patrón de flujo estratificado ondulado.

Adicionalmente se puede observar que los modelos no predicen una zona del mapa de patrón de flujo, que contienen los puntos de patrón de flujo estratificado ondulado y *rolling wave*; localizándose por encima de las curvas de IKH y VKH y que según el trabajo de Barnea (1993) esta zona representa el patrón de flujo intermitente. Sin embargo, en los videos si se observó dicho patrón de flujo.

En la figura se observa que todos los puntos identificados como flujo anular (AN) se encuentran fuera de la región del patrón de flujo estratificado, demarcada por la línea de transición estratificado – no estratificado (VKH e IKH), tal como lo expone Barnea (1993), igualmente en la Figura N° 34. Se observa que algunos puntos experimentales identificados como anular, se salen del límite de la curva  $hl/D=0.5$ , lo que implica que la curva  $hl/D=0.5$  no representa una frontera para el patrón de flujo anular.

Es importante mencionar, que los puntos que presentan los patrones de flujo anular y estratificado ondulado, cerca de la transición, su definición es compleja debido a la existencia de la variante del patrón de flujo estratificado “*Rolling wave*”, ya que la onda se desplaza sin bañar la parte superior de la tubería y a medida que incrementa la velocidad superficial de gas, la ondas incrementa hasta un punto que baña la parte superior de la tubería tal que el líquido se adhiere, lo que hace realmente difícil determinar donde ocurre la transición del patrón de flujo estratificado a anular.

Si se observan los mapas de flujo presentados en esta sección del trabajo especial de grado (Figura N° 32, N° 33, N° 34, N° 35), se puede apreciar una serie de patrones de flujo y puntos experimentales correspondientes a la transición entre los patrones estables. Y se puede observar, que las curvas que limitan las diferentes zonas de los patrones de flujo y limitan un patrón de otro en los mapas de patrón de flujo definidas por diferentes criterios deberían ser como una banda, de tal modo que simulen la zona de transición entre los patrones tal como se muestra en los datos experimentales.

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones que se presentan en este trabajo de grado son:

- El algoritmo planteado permite reproducir las curvas de transición estratificado – no estratificado obtenidas con los modelos de Taitel y Dukler, Kelvin Helmholtz Viscoso y No Viscoso, para tubería horizontal de 5cm de diámetro.
- El modelo de Taitel y Dukler y VKH predice la transición estratificado – no estratificado para el sistema aire – agua en tubería horizontal de 5cm de diámetro.
- El modelo de VKH predice la zona de patrón de flujo intermitente en el sistema aire – kerosene en tubería horizontal de 5cm de diámetro.
- El modelo de Taitel y Dukler no predice la transición estratificado – no estratificado para el sistema aire – Purolub 320 en tubería horizontal de 5cm de diámetro.
- Los modelos VKH e IKH, predicen la zona de patrón de flujo anular, pero la curva  $hl/D=0.5$  no delimita correctamente la zona de este patrón de flujo, para los sistemas aire – líquido (kerosene, puro lub 150 y puro lub 320).
- Para el sistema aire – agua en tubería horizontal de 5cm de diámetro no se identificó el patrón de flujo *Rolling wave*, a pesar de estar definida la zona de este patrón de flujo entre las curvas VKH e IKH por debajo de la curva  $hl/D=0.5$ , según Barnea (1993).

- Para el sistema aire-kerosene en tubería horizontal de 5cm de diámetro no se observó ninguna prueba experimental en las imágenes fotográficas y videos con el patrón de flujo *Rolling wave* dentro de la región de este patrón de flujo según lo propuesto por Barnea (1993).
- Para el sistema aire- Purolub 150 en tubería horizontal de 5cm de diámetro no se observó el patrón de flujo *Rolling wave* y el modelo de Barnea (1993) no predice una zona con este patrón de flujo en el mapa de patrón de flujo.
- Los modelos IKH y VKH no predicen la zona que contiene los patrones de flujo estratificado ondulado y *rolling wave* para el sistema aire – Purolub 320 en tubería horizontal de 5 cm de diámetro. Sin embargo, en los videos si se observó dicho patrón de flujo.
- Para sistemas con viscosidad líquido inferiores a 5cP se recomienda el modelo de Taitel y Dukler para la predicción de la transición estratificado – no estratificado. Mientras para viscosidades superiores a 5cp se puede aplicar tanto el modelo VKH como el IKH.

Adicionalmente se tiene las siguientes recomendaciones:

- Validar el algoritmo con sistemas de diferentes ángulos de inclinación y otros diámetros de la tubería.
- Estudiar la zona límite del patrón de flujo anular, tal que se obtenga una correlación que indique la transición de este patrón con el resto de los patrones y se obtenga como resultado un mapa de patrón de flujo más confiable para los rangos de velocidad superficial de gas y de líquido que se maneja para el patrón de flujo anular.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcalá J. (2001). Patrón de flujo intermitente y sus transiciones para aceite-aire en tubería horizontales. Trabajo de grado. Universidad Simón Bolívar, Caracas.
- Andritsos N. y Hanratty T. (1987). Interfacial instability for horizontal gas – liquid flows in pipelines. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol.13, 583-603.
- Andritsos N., Williams L. y Hanratty T. (1989). Effect of liquid viscosity on the stratified – slug transition in horizontal pipe flow. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 15 (6), 877-892.
- Ansari M. y Sani A. (2006). Surface tension effect on stability of two – phase stratified flow. *Fluid Dynamics Research*, Vol. 39 (4), 279-291.
- Akbar M. y Giaasiaan S. (2003). Stability of stratified gas – liquid flow in horizontal annular channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Vol 28, 17-21.
- Asuaje M. (1999). Transición estratificado – no estratificado en flujo gas – líquido viscoso en tubería horizontal. Trabajo de grado. Universidad Simón Bolívar. Caracas.
- Barnea D., Shoham O., Taitel Y. y Dukler A. (1980). Flow pattern transition for gas – liquid flow in horizontal and inclined pipes. Comparison of experimental data with theory. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 6 (3), 215-225.

- Barnea D. (1987). A unified model for predicting flow pattern transitions for the whole range of pipe inclinations. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 13 (1), 1-12.
- Barnea D. (1989). Void fraction measurements in vertical slug flow: applications to slug characteristics and transition. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 15 (4), 495-504.
- Barnea D. (1991). On the effect of viscosity on stability of stratified gas-liquid flow – application to flow pattern transition at various pipe inclinations. *Chemical Engineering Science*, Vol.46 (8), 2123-2131.
- Barnea D. y Taitel Y. (1993). Kelvin-Helmholtz stability criteria for stratified flow: viscous versus non-viscous (inviscid) approaches. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 19 (4), 639-649.
- Barnea D. y Taitel Y. (1994). Interfacial and structural stability of separated flow. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 20 (Suplemento), 387-414.
- Bird R., Stewart W. y LightFoot E. (2006). Fenómenos de transporte. Universidad de Wisconsin, 2<sup>da</sup> Edición. Editorial Limusa.845 p.
- Burden R. y Faires D. (2002). Análisis Numérico. [libro en línea]. Instituto autónomo de México. 7<sup>a</sup> Edición. Thomson Learning. Disponible: <http://books.google.co.ve/books?id=rY7LmjAo61YC&pg=PA48&dq=metodo+d e+biseccion#v=onepage&q=&f=true>. [Consulta: 2009, octubre 17]
- Carvallo R. (1999). Estudio experimental de la transición estratificado – no estratificado en flujo bifásico gas – líquido. Trabajo de grado. Universidad Simón Bolívar. Caracas.
- Colmenares J., Ortega P., Padrino J., y Trallero J.L. (2001). Slug flow model for the prediction of pressure drop for high viscosity oils in horizontal pipeline. .

Society of Petroleum Engineers, Paper 71111. Presentado en SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Porlamar, Isla de Margarita, Venezuela. 12-14 Marzo.

- Crowe C. (2006). *Multiphase Flow Handbook*. Nueva York: Taylor and Francis Group.
- Dukler A. y Hubbard M. (1975). A model for gas – liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. *Ind. Eng. Chem. Fund.* Vol. 14, 337-347.
- García F. (2004). Factor de fricción para flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales para régimen laminar y turbulento. Trabajo de grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Funada T. y Joseph D. (2001). Viscous potential flow analysis of Kelvin-Helmholtz instability in a channel. *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 445 (1), 263-283.
- Hale C. (2000). Slug formation, growth and decay in gas – liquid flows. Trabajo de grado. Universidad de Londres, Inglaterra.
- Hewitt F., Lawrence C. y Ng T. (2004). Friction Factors in stratified two – phase flows. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 82 (3), 309-320.
- Ishii M. y Hibiki T. (2006). *Thermo - Fluid dynamics of two phase flow*. Estados Unidos de América: Springer. 457 p.
- Kadri U., Mudde R., Oliemans R., Bonizzi M. y Andreussi P. (2009). Prediction of the transition from stratified to slug flow or rolling – waves in gas – liquid horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*. Disponible en línea: [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6V45-4WR66KS-&\\_user=281447&\\_coverDate=07%2F10%2F2009&\\_alid=990298763&\\_rdoc=5&\\_fmt=high&\\_orig=search\\_cdi=5749&\\_sort=r&\\_docanchor=&vi](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V45-4WR66KS-&_user=281447&_coverDate=07%2F10%2F2009&_alid=990298763&_rdoc=5&_fmt=high&_orig=search_cdi=5749&_sort=r&_docanchor=&vi)

---

[ew=c& ct=463& acct=C000015978& version=1& urlVersion=0& userid=281447&md5=0a2d2206c361805371d06463812a33c9](http://books.google.co.ve/books?ct=463&acct=C000015978&version=1&urlVersion=0&userid=281447&md5=0a2d2206c361805371d06463812a33c9). [Consulta:2009, Agosto 25]

- Klaus H. (2001). Introducción a la metodología de la investigación empírica: en las ciencias del deporte. [Libro en línea]. Editorial Paidotribo. Disponible en: [http://books.google.co.ve/books?id=bjJYAButFB4C&printsec=frontcover&source=gbs\\_navlinks\\_s#v=onepage&q=&f=false](http://books.google.co.ve/books?id=bjJYAButFB4C&printsec=frontcover&source=gbs_navlinks_s#v=onepage&q=&f=false) [Consulta:2009, Octubre 15]
- Lin P. y Hanratty T. (1986). Prediction of the initiation of slugs with linear stability theory. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 12 (1), 79-98.
- Lin P. y Hanratty T. (1987). Effect of pipe diameter on flow patterns for air – water flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 13, 549-563.
- Mandhane J., Gregory G. y Aziz K. (1974). A flow pattern map for gas –liquid flow in horizontal and near horizontal gas – liquid flow. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 1 (40), 537-553.
- Mata C., Pereyra E., Trallero J. y Joseph D. (2002). Stability of stratified gas – liquid flows. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28 (8), 1249-1268.
- Massi A. (2003). Estudio experimental de flujo bifásico (líquido viscoso y gas) en tubería horizontal y ligeramente inclinadas. Trabajo de grado. Universidad Simón Bolívar. Caracas.
- Mishima K. y Ishii M. (1980). Theoretical prediction of onset of horizontal slug flow. *ASME Journal Fluids Engineering*, Vol. 102 (8), 441-445.
- Muñoz C. (1998). Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis. [Libro en línea]. Prentice Hall Hispanoamericana. Disponible en: [http://books.google.co.ve/books?id=1ycDGW3ph1UC&printsec=frontcover&source=gbs\\_navlinks\\_s#v=onepage&q=&f=true](http://books.google.co.ve/books?id=1ycDGW3ph1UC&printsec=frontcover&source=gbs_navlinks_s#v=onepage&q=&f=true). [Consulta:2009, Octubre 15]

- Omgba C. (2004). Numerical Modelling of transient gas – liquid flows (Application to stratified & slug flow regimes). Trabajo de Grado. Universidad de Cranfield, Inglaterra.
- Pérez A. (2006). Guía Metodológica para Anteproyectos de Investigación. 2ª Edición. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador.
- Shoham O. (2000). Two-phase flow modeling. Trabajo de grado. Universidad de Tulsa, Departamento de Ingenieros de Petróleo: Estados Unidos de América.
- Shoham O. (2006). Mechanistic modeling of gas – liquid two – phase flow in pipes. Universidad de Tulsa, Sociedad de Ingenieros de Petróleo.
- Smith S. (1999). Experimental Investigation of multiple solutions for liquid holdup in upward inclined stratified flow. Trabajo de grado. Universidad de Calgary: Canadá.
- Taitel Y. (1994, agosto 29-31). Advances in two phase flow mechanistic modeling. Society of Petroleum Engineers, Paper 27959. Simposio de Ingeniería Petrolera presentado en la Universidad de Tulsa. Estados Unidos de América.
- Taitel Y. y Dukler A. (1976). A model for predicting flow regime transition in horizontal and near horizontal gas – liquid flow. AIChE Journal, Vol.22 (1), 47-54.
- Wallis G. y Dobson J. (1973). Prediction of the initiation of slugs with linear stability criterion. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 1, 173-193.
- Weisman J., Duncan D., Gibson J. y Crawford T. (1979). Effects of fluid properties and pipe diameter on two – phase flow patterns in horizontal lines. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 5 (6), .437-462.



## **APÉNDICES**

## [APÉNDICE A] TABLAS CON LOS DATOS EXPERIMENTALES AIRE -

### AGUA

A continuación se muestra los datos experimentales de cada patrón de flujo identificado en los vídeos e imágenes fotográficas del sistema aire-agua, tubería horizontal de 5cm de diámetro.

Tabla N° 1 Datos experimentales con el patrón de flujo estratificado liso (aire - agua).

<b>ESTRATIFICADO LISO</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
0,860	0,034

Tabla N° 2 Datos experimentales con el patrón de flujo estratificado ondulado (aire - agua).

<b>ESTRATIFICADO ONDULADO</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
6,845	0,206
2,700	0,035
5,200	0,074
4,782	0,188
2,700	0,100

Tabla N° 3 Datos experimentales con el patrón de flujo anular (aire - agua).

<b>ANULAR</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
45,500	0,170

Tabla N° 4 Datos experimentales con la transición entre los patrones de flujo intermitente – anular (aire - agua).

<b>IN-AN</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
10,500	1,020

Tabla N° 5 Datos experimentales con la transición entre los patrones de flujo intermitente –  
estratificado liso (aire - agua).

<b>EL-IN</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
2,670	0,320

Tabla N° 6 Datos experimentales con el patrón de flujo intermitente (aire - agua).

<b>INTERMITENTE</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
6,845	2,907
6,845	3,282
6,845	3,751
4,782	3,282
4,782	3,751
6,845	0,938
6,845	1,406
6,845	1,875
6,845	2,344
4,782	1,406
4,782	1,875
4,782	2,344
6,845	1,875
2,550	1,350
4,200	0,930
3,940	1,140
0,780	1,050
0,780	1,540
1,200	1,100
2,590	1,040
1,200	1,530
1,200	1,670
2,570	0,530
0,820	0,310
1,300	0,500
4,220	0,540
4,460	0,310
4,782	0,469
1,300	0,310
0,010	0,577

Tabla N° 7 Datos experimentales con la transición entre los patrones de flujo anular - estratificado ondulado (aire - agua).

<b>EO-AN</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
8,700	0,520
10,500	0,490
6,845	0,469
9,800	0,330

## [APÉNDICE B] TABLAS CON LOS DATOS EXPERIMENTALES AIRE - KEROSENE

A continuación se muestra los datos experimentales de cada patrón de flujo identificado en los vídeos e imágenes fotográficas del sistema aire - kerosene, tubería horizontal de 5cm de diámetro.

Tabla N° 8 Datos experimentales con el patrón de flujo intermitente (aire - kerosene).

INTERMITENTE	
V <sub>sg</sub> [m/s]	V <sub>sl</sub> [m/s]
0,776	1,073
1,132	1,448
2,672	0,337
2,792	0,333
2,670	0,559
2,521	1,112
4,324	0,332
4,295	0,567
3,992	1,014
3,929	1,228
0,840	0,154
0,826	0,333
0,796	0,555
0,811	1,117
0,766	1,652
1,282	0,336
1,309	0,541
1,276	1,165
2,792	0,108

Tabla N° 9 Datos experimentales con el patrón de flujo anular (aire - kerosene)..

ANULAR	
V <sub>sg</sub> [m/s]	V <sub>sl</sub> [m/s]
42,961	0,178
35,208	1,586
45,654	0,556
24,837	0,027
24,860	0,027
29,693	0,026
28,913	0,106
28,227	0,212

Tabla N° 10 Datos experimentales con el patrón de flujo estratificado ondulado (aire - kerosene).

<b>ESTRATIFICADO ONDULADO</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
2,760	0,037

Tabla N° 11 Datos experimentales con el patrón burbuja dispersa (aire - kerosene).

<b>BURBUJA DISPERSA</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
1,173	4,515
1,878	4,085
1,930	2,540
2,135	3,807
1,909	3,757
1,382	4,361
1,848	4,315
1,955	2,521
2,524	3,586
2,123	4,044
1,460	4,511
1,916	4,341
1,189	2,209

Tabla N° 12 Datos experimentales con la transición entre los patrones de estratificado liso – estratificado ondulado (aire - kerosene).

<b>EL-EO</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
1,728	0,033

Tabla N° 13 Datos experimentales con la transición entre los patrones de flujo intermitente – estratificado liso (aire - kerosene).

<b>IN-EL</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
1,816	0,062

Tabla N° 14 Datos experimentales con la transición entre los patrones de estratificado ondulado – anular (aire - kerosene).

<b>EO-AN</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
12,736	0,033
16,383	0,029
16,471	0,029

Tabla N° 15 Datos experimentales con la transición entre los patrones de intermitente – burbuja dispersa (aire - kerosene)..

<b>IN-BD</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
2,473	1,438
3,858	1,573
1,306	1,628
1,213	1,772

## [APÉNDICE C] TABLAS CON LOS DATOS EXPERIMENTALES AIRE – PUROLUB 150

A continuación se muestra los datos experimentales de cada patrón de flujo identificado en los vídeos e imágenes fotográficas del sistema aire – Purolub 150, tubería horizontal de 5cm de diámetro.

Tabla N° 16 Datos experimentales con el patrón de flujo estratificado liso (aire – purolub 150).

<b>ESTRATIFICADO LISO</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
0,515	0,002
0,497	0,003
1,001	0,002
0,517	0,002
0,019	2,321
0,500	0,002
1,000	0,003

Tabla N° 17 Datos experimentales con el patrón de flujo estratificado ondulado (aire – purolub 150).

<b>ESTRATIFICADO ONDULADO</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
5,182	0,004
7,152	0,005
9,924	0,005
11,456	0,004
4,016	0,011
7,932	0,011
10,051	0,010
15,167	0,011
7,000	0,004
10,000	0,004
11,000	0,004
6,105	0,030

Tabla N° 18 Datos experimentales con el patrón de flujo intermitente (aire – purolub 150).

<b>INTERMITENTE</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
1,048	0,190
5,060	0,497
5,159	0,971
5,178	1,341
3,471	1,339
3,364	1,126
3,512	0,597
3,498	0,398
3,617	0,249
3,445	0,136
0,457	0,022
1,535	0,397
1,502	0,591
1,079	0,199
1,053	0,248
0,982	0,398
1,058	0,598
0,997	1,041
1,030	1,286
1,405	1,010
1,603	1,296
0,487	0,010
0,507	0,010
0,497	0,020
0,495	0,020
0,492	0,036
0,491	0,071
0,495	0,144
0,498	0,287
0,501	0,575
1,019	0,010
1,965	0,010
1,123	0,023
1,146	0,136
1,084	0,501
1,102	0,977
1,127	0,154
1,131	0,513
1,134	0,021
0,982	0,006
0,226	0,601
0,212	0,448

0,319	0,450
0,335	0,699
0,496	0,030
0,993	0,030
0,798	0,032
1,126	0,031
0,507	0,108
1,002	0,107
11,973	0,997
13,481	1,000
1,000	0,030
0,500	0,100
1,000	0,100
12,500	1,000
14,000	1,000
0,500	0,030
0,800	0,030
1,150	0,030
3,013	0,106

Tabla N° 19 Datos experimentales con el patrón de flujo burbuja dispersa (aire – purolub 150).

<b>BURBUJA DISPERSA</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
0,540	1,688
0,460	2,123
0,137	2,774
0,277	2,468
0,229	1,939
0,312	1,582
0,423	1,781
0,629	1,664
0,525	2,309

Tabla N° 20 Datos experimentales con la transición entre los patrones de flujo estratificado liso – estratificado ondulado (aire – purolub 150).

<b>EL-EO</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
1,630	0,002
3,354	0,005
2,093	0,005

Tabla N° 21 Datos experimentales con el patrón de flujo anular (aire – purolub 150).

<b>ANULAR</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
24,916	0,010
38,237	0,013
18,199	0,032
24,117	0,029
28,730	0,030
21,239	0,036
10,050	0,103
20,041	0,100
16,278	0,300
22,072	0,299
25,234	0,219
21,316	0,200
15,166	0,210
25,000	0,030
30,000	0,030
17,000	0,300
23,000	0,300
26,000	0,200
22,000	0,200
17,500	0,200
10,000	0,200
20,000	0,100
19,000	0,030

Tabla N° 22 Datos experimentales con la transición entre los patrones de flujo intermitente – estratificado liso (aire – purolub 150).

<b>IN-EL</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
1,319	0,003
0,496	0,007
1,036	0,004
0,334	0,783

Tabla N° 23 Datos experimentales con la transición entre los patrones de flujo intermitente – anular (aire – purolub 150).

<b>IN-AN</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
5,009	0,106
7,133	0,306
19,347	0,497
17,920	0,706
6,700	0,200

Tabla N° 24 Datos experimentales con la transición entre los patrones de flujo estratificado ondulado-anular (aire – purolub 150).

<b>EO-AN</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
19,706	0,010
10,000	0,030

Tabla N° 25 Datos experimentales con la transición entre los patrones de flujo intermitente –burbuja dispersa (aire – purolub 150).

<b>IN-BD</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
3,660	1,246
1,709	1,690
0,496	1,155
1,221	1,684
1,173	1,989
1,065	2,302
0,097	2,768
3,282	2,014
0,053	2,334
0,218	1,098
0,217	0,815
0,220	0,697
0,332	0,892
0,315	1,194
0,334	0,783

## [APÉNDICE D] TABLAS CON LOS DATOS EXPERIMENTALES AIRE – PUROLUB 320

A continuación se muestra los datos experimentales de cada patrón de flujo identificado en los vídeos e imágenes fotográficas del sistema aire – Purolub 320, tubería horizontal de 5cm de diámetro.

Tabla N° 26 Datos experimentales con el patrón de flujo estratificado liso (aire – purolub 320).

<b>ESTRATIFICADO LISO</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
0,309	0,005
0,298	0,005
0,300	0,006
1,000	0,005
3,600	0,003

Tabla N° 27 Datos experimentales con el patrón de flujo estratificado ondulado (aire – purolub 320).

<b>ESTRATIFICADO ONDULADO</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
7,558	0,036
4,553	0,028
7,839	0,049
4,699	0,011
8,094	0,010
3,378	0,038
6,680	0,005
8,001	0,005
7,400	0,090
4,760	0,011
5,400	0,017
3,500	0,040
4,000	0,010
7,800	0,052
5,400	0,017

Tabla N° 28 Datos experimentales con la transición entre los patrones de flujo estratificado liso – estratificado ondulado (aire – purolub 320).

<b>EL-EO</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
3,610	0,007
2,700	0,018
3,600	0,007
2,500	0,012
2,545	0,012
2,880	0,005

Tabla N° 29 Datos experimentales con la transición entre los patrones de flujo intermitente – estratificado liso (aire – purolub 320).

<b>IN-EL</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
0,291	0,008
0,290	0,010
0,359	0,002
0,334	0,001
0,295	0,011
0,500	0,010
0,300	0,009
0,350	0,002
2,500	0,012
2,700	0,018
2,000	0,010

Tabla N° 30 Datos experimentales con el patrón de flujo *Rolling Wave* (aire – purolub 320)..

<b>RW</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
4,760	0,011
7,990	0,011
4,500	0,005
6,700	0,017

Tabla N° 31 Datos experimentales con el patrón de flujo intermitente (aire – purolub 320).

<b>INTERMITENTE</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
0,484	0,492
0,759	0,668
0,544	0,244
0,548	0,471
0,649	0,096
2,391	0,095
2,340	0,277
0,758	0,042
0,261	0,062
0,263	0,270
0,257	0,452
0,296	0,025
0,296	0,138
0,285	0,262
0,228	0,743
0,692	0,485
0,594	0,802
2,835	0,476
4,368	0,496
0,279	0,072
0,264	0,454
0,274	0,271
0,298	0,025
0,298	0,139
0,299	0,263
0,675	0,094
0,330	0,026
1,045	0,011
0,316	0,025
0,302	0,137
0,274	0,260
0,550	0,280
0,550	0,490
0,660	0,090
2,250	0,100
0,260	0,070
0,260	0,280
0,260	0,470
0,300	0,025
0,300	0,144
0,300	0,280
0,230	0,770
0,790	0,500

---

0,600	0,830
0,650	0,030
2,700	0,500
4,300	0,510
0,270	0,070
0,270	0,470
0,290	0,030
0,290	0,140
0,290	0,290
0,690	0,090
0,330	0,030
1,020	0,050
0,310	0,140
0,250	0,270
0,500	0,020
0,500	0,036
0,500	0,036
0,500	0,072
0,500	0,144
0,500	0,288
0,500	0,576
0,500	1,160
1,000	0,010
1,100	0,130
1,000	0,500
1,100	1,000
1,100	1,700
0,220	1,100
0,220	0,820
0,220	0,700
0,220	0,600
0,210	0,450
0,300	0,700
0,300	0,800
0,300	0,900
0,600	1,700
0,300	0,450
2,480	0,300
0,300	1,200
1,100	0,020
0,790	0,040
0,130	2,800
0,270	2,400
2,250	0,100
2,480	0,300
0,790	0,040

0,300	0,280
3,700	0,150

Tabla N° 32 Datos experimentales con el patrón de flujo anular (aire – purolub 320).

<b>ANULAR</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
19,794	0,271
18,184	0,136
15,821	0,030
18,183	0,295
20,016	0,033
24,391	0,180
22,034	0,024
12,053	0,004
29,184	0,005
36,645	0,003
20,800	0,000
16,500	0,150
18,300	0,300
12,500	0,035
14,000	0,011
20,700	0,500
27,600	0,190
25,900	0,030
15,760	0,010
20,500	0,010
40,000	0,010
13,482	0,010
12,879	0,010
7,244	0,271
7,500	0,280
18,000	0,037

Tabla N° 33 Datos experimentales con el patrón de flujo burbuja dispersa (aire – purolub 320).

<b>BURBUJA DISPERSA</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
0,500	1,700
0,400	2,100
1,100	2,000
1,100	2,300
0,090	2,700
0,025	2,300
0,050	2,300
0,200	1,970
0,300	1,600
0,400	1,800
0,270	2,400
0,130	2,800

Tabla N° 34 Datos experimentales con la transición entre los patrones de flujo intermitente – anular (aire – purolub 320).

<b>IN-AN</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
4,356	0,275
4,866	0,269
5,698	0,589
5,700	0,600
4,500	0,300
3,704	0,297
0,000	0,000

Tabla N° 35 Datos experimentales con la transición entre los patrones de flujo estratificado ondulado-anular (aire – purolub 320).

<b>EO-AN</b>	
$V_{sg}$ [m/s]	$V_{sl}$ [m/s]
4,710	0,145
5,556	0,089
5,487	0,167
5,325	0,290
3,500	0,150
4,900	0,150
6,000	0,090
6,000	0,300
4,500	0,150
7,400	0,090
7,500	0,280
12,500	0,011

---

## [APÉNDICE E] MÉTODO DE BISECCIÓN

Este método consiste en la búsqueda de una raíz, o solución, de una ecuación de la forma  $f(x)=0$ . Se supone que  $f$  es una función continua definida en el intervalo  $[a,b]$  con  $f(a)$  y  $f(b)$  de signos diferentes. De acuerdo con el teorema de valor intermedio, existe un número  $p$  en  $(a,b)$  tal que  $f(p)=0$ . Si bien el procedimiento se aplica aunque exista más de una raíz en el intervalo  $(a,b)$ , por razones de simplicidad suponemos que la raíz de ese intervalo es única. El método requiere dividir varias veces a la mitad los subintervalos de  $[a,b]$ , y en cada paso localizar la mitad que contenga  $p$  (Burden, 2002).

Para empezar, supongamos que  $a_1=a$  y  $b_1=b$ , y sea  $p_1$  el punto medio de  $[a,b]$  es decir:

$$p_1 = a_1 + \frac{b_1 - a_1}{2} = \frac{a_1 + b_1}{2}$$

Si  $f(p_1)=0$ , entonces  $p=p_1$ ; de no ser así, entonces  $f(p_1)$  tiene el mismo signo que  $f(a_1)$  y que  $f(b_1)$ . Si  $f(p_1)$  y  $f(a_1)$  tienen el mismo signo, entonces  $p \in [p_1, b_1]$  y tomamos  $a_2=p_1$  y  $b_2=b_1$ . Si  $f(p_1)$  y  $f(a_1)$  tienen signos opuestos, entonces  $p \in [a_1, p_1]$  y tomamos  $a_2=a_1$  y  $b_2=p_1$ . Después volvemos a aplicar el proceso al intervalo  $[a_2, b_2]$ , véase la siguiente figura (Figura N° 36) (Burden, 2002).

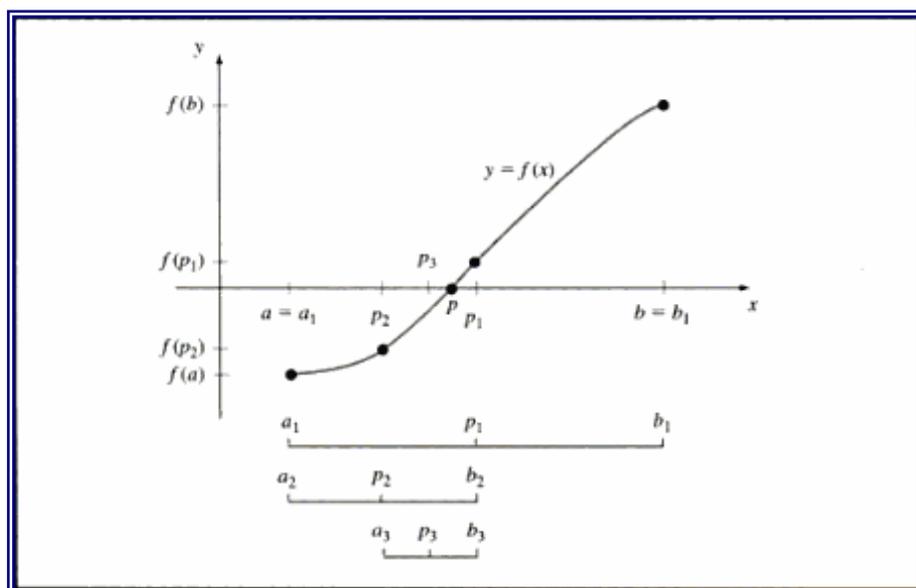


Figura N° 1 Método de Bisección (Adaptado de Burden, 2002)

---



---

## [APÉNDICE F] CODIFICACIÓN DEL ALGORITMO EN VISUAL BASIC

NOTA:

LAS LETRAS VERDES: SON COMENTARIOS

LAS LETRAS AZULES: SON PALABRAS RESERVADAS PARA VISUAL BASIC

```

-----
'-----
'-----PROGRAMA DE LOS MODELOS DE TD,VKH E IKH-----
'REALIZADO POR: MARIANGEL PESQUERA---Julio-2009-----
'C.I. 18039953-----
'-----
'-----
'-----DECLARACIÓN DE LAS VARIABLES Y CONSTANTES-----

Public Const g = 9.81

Public Const pi = 3.14159265358979

Public D, pl, pg, viscG, viscL, Tsup, Rug, Ang As Double

Public Vsg, Vsl, Vg, Vl, nl As Double

Private A, Ag, Al, Sl, Sg, Si, Dg, Dl As Double

Private Tg, Tl, Ti As Double

```

---

---

'-----MÓDULO DE LECTURA DE DATOS-----'

```
Sub Lectura_de_Datos()  
  
    Sheets("Hoja Inicial").Select  
  
    D = Cells(6, 5)      ' [m]  
  
    p1 = Cells(6, 6)    ' [kg/m3]  
  
    p2 = Cells(6, 7)    ' [kg/m3]  
  
    viscL = Cells(6, 8) ' [Pa.s]  
  
    viscG = Cells(6, 9) ' [Pa.s]  
  
    Tsup = Cells(6, 10) ' [N.m]  
  
    Rug = Cells(6, 11)  ' [Adimensional]  
  
    Ang = Cells(6, 12)  ' [°]  
  
End Sub
```

'-----FUNCIÓN PARA HALLAR EL ARCCOSENOS DE UN ANGULO-----'

```
Function arcCoseno(ByVal X As Double) As Double  
  
    If (X = -1) Then  
  
        arcCoseno = pi  
  
    Else  
  
        If (X = 0) Then  
  
            arcCoseno = pi / 2  
  
        Else  
  
            If (X = 1) Then  
  
                arcCoseno = 0  
  
            End If  
  
        End If  
  
    End If
```

```
Else
    If (X < 0) Then
        arcCoseno = Atn(((1 - X ^ 2) ^ 0.5) / X) + pi
    Else
        arcCoseno = Atn(((1 - X ^ 2) ^ 0.5) / X)
    End If
End If
End If
End If
End Function

'MODULO PARA HALLAR LAS VARIABLES GEOMÉTRICAS DEL BALANCE DE MOMENTO

Sub Calculo_De_Variables_Geométricas(nl, D, ByRef A, ByRef Ag, ByRef
Al, ByRef Sl, ByRef Sg, ByRef Si, ByRef Dg, ByRef Dl)

    ArcC = arcCoseno(2 * nl - 1)

    A = pi * (D ^ 2) / 4

    Al = 0.25 * D ^ 2 * (pi - ArcC + (2 * nl - 1) * Sqr(1 - (2 * nl
- 1) ^ 2))

    Sl = D * (pi - ArcC)

    Ag = 0.25 * D ^ 2 * (ArcC - (2 * nl - 1) * Sqr(1 - (2 * nl - 1)
^ 2))

    Sg = D * (ArcC)

    Si = D * Sqr(1 - (2 * nl - 1) ^ 2)

    If (Sl = 0) Then Sl = 0.000001
```

```
If (Sg = 0) Then Sg = 0.000001

If (Si = 0) Then Si = 0.000001

Dl = 4 * Al / Sl

Dg = 4 * Ag / (Sg + Si)

If (Al = 0) Then

    Al = 0.000001

    Dl = 4 * Al / Sl

End If

If (Ag = 0) Then

    Ag = 0.000001

    Dg = 4 * Ag / (Sg + Si)

End If

End Sub

'-----MÓDULO PARA EL CÁLCULO DE LOS ESFUERZOS DE CORTE G, L, I-----

Sub Calculo_de_los_Esfuerzos(nl, D, Ag, Al, Sl, Sg, Si, Dg, Dl,
ByVal Vl, ByVal Vg, ByRef Tl, ByRef Tg, ByRef Ti)

    Dim cont As Double

    Dim rel, reg As Double

    rel = Vl * pl * Dl / viscL

    reg = (Dg * Vg * pg / viscG)

    If (rel < 1502.11) Then

        Tl = (16 * (rel) ^ -1) * (pl * Vl ^ 2) / 2
```

```

Else

    Tl = ((0.046) * rel ^ -0.2) * (pl * Vl ^ 2) / 2

End If

If (reg < 1502.11) Then

    Tg = (16 * (reg) ^ -1) * (pg * Vg ^ 2) / 2

Else

    Tg = ((0.046) * reg ^ -0.2) * (pg * Vg ^ 2) / 2

End If

Ti = (0.0142) * (pg * (Vg - Vl)) * Abs(Vg - Vl) / 2

End Sub

'-FUNCIÓN PARA EL CÁLCULO DEL ERROR ASOCIADO AL BALANCE DE MOMENTO--

Function Balance_de_Momento(ByVal N As Double, ByVal Vsg, ByVal Vsl,
ByRef Vg, ByRef Vl)

    Call Calculo_De_Variables_Geométricas(N, D, A, Ag, Al, Sl, Sg,
Si, Dg, Dl)

    Vg = Vsg * A / Ag

    Vl = Vsl * A / Al

    Call Calculo_de_los_Esfuerzos(N, D, Ag, Al, Sl, Sg, Si, Dg, Dl,
Vl, Vg, Tl, Tg, Ti)

    Balance_de_Momento = Tg * (Sg / Ag) - Tl * (Sl / Al) + Ti * Si *
((1 / Al) + (1 / Ag)) - (pl - pg) * g * Sin(Ang)

End Function

```

---

'-----MÓDULO DE BISECCIÓN PARA LA ECUACIÓN COMBINADA DE MOMENTO-----'

```
Sub Biseccion_en_Balance_de_Momento(ByRef nl, ByVal Vsg, ByVal Vsl,  
ByRef Vl, ByRef Vg, ByRef Error)
```

```
    Dim nl1, nl2, nl3 As Double
```

```
    Dim Error1, Error3 As Double
```

```
    Dim Vl1, Vl3, Vg1, Vg3 As Double
```

```
    nl1 = 0.001
```

```
    nl2 = 0.999
```

```
    Do
```

```
        nl3 = (nl1 + nl2) / 2
```

```
        Error1 = Balance_de_Momento(nl1, Vsg, Vsl, Vg1, Vl1)
```

```
        Error3 = Balance_de_Momento(nl3, Vsg, Vsl, Vg3, Vl3)
```

```
        If (Error1 * Error3 < 0) Then
```

```
            nl2 = nl3
```

```
        Else
```

```
            nl1 = nl3
```

```
        End If
```

```
    Loop Until (Abs(Error3) < 0.001)
```

```
    nl = nl3
```

```
    Vl = Vl3
```

```
    Vg = Vg3
```

```
    Error = Error3
```

---

End Sub

'-----FUNCIÓN QUE CALCULA EL ERROR ASOCIADO AL MODELO DE TD-----'

Function Transición\_Taitel\_Duckler(nl, Vl, Vg)

Dim Rl, Rg As Double

Call Calculo\_De\_Variables\_Geométricas(nl, D, A, Ag, Al, Sl, Sg,  
Si, Dg, Dl)

Rl = Al / A

Rg = Ag / A

Transición\_Taitel\_Duckler = Vg - Vl - (1 - nl) \* Sqr((pl \* Rg +  
pg \* Rl) \* (pl - pg) \* g \* Cos(Angulo) \* A / (pg \* pl \* Si)) ' ec 2

End Function

'-----MÉTODO ITERATIVO PRINCIPAL DEL MODELO DE TAITEL Y DUKLER-----'

Sub Cuerpo\_Principal\_TD()

Dim F, cont, cont1 As Integer

Dim Error, Error2, Error1 As Double

Dim Vsl1, Vsl2, Vl1, Vl2, Vg1, Vg2 As Double

F = 3

Call Lectura\_de\_Datos

Vsg = 0.01

Do

cont1 = 1

Vsl = 0.001

```
If (Vsg >= 10) Then Vsl = Vsl / 100

Error1 = 0

Error2 = 0

cont = 1

Do

    Error1 = Error2

    Vsl2 = Vsl

    If (cont <> 1) Then

        If (Error2 < 0) Then

            Vsl = Vsl * 2

        Else

            Vsl = Vsl / 2

        End If

    End If

    Vsl1 = Vsl

    Call Biseccion_en_Balance_de_Momento(nl, Vsg, Vsl, Vl,
Vg, Error)

    Error2 = Transición_Taitel_Duckler(nl, Vl, Vg)

    cont = cont + 1

    If (Error1 * Error2 < 0) Then

        Do

            Vsl = (Vsl1 + Vsl2) / 2
```

---

```
Call Biseccion_en_Balance_de_Momento(nl, Vsg, Vs11,
Vl1, Vg1, Error)

Error1 = Transición_Taitel_Duckler(nl, Vl1, Vg1)

Call Biseccion_en_Balance_de_Momento(nl, Vsg, Vs1,
Vl, Vg, Error)

Error2 = Transición_Taitel_Duckler(nl, Vl, Vg)

If (Error1 * Error2 < 0) Then

    Vs12 = Vs1

Else

    Vs11 = Vs1

End If

Loop Until (Abs(Error2) < 0.001)

End If

Loop Until (Abs(Error2) < 0.001)

Sheets("TD").Select

F = F + 1

Cells(F, 2) = Vsg

Cells(F, 3) = Vs1

If (Vsg >= 20) Then

    Vsg = (10 ^ ((Log(Vsg) / Log(10)) + 0.01))

Else

    Vsg = (10 ^ ((Log(Vsg) / Log(10)) + 0.2))
```

```
End If

Loop Until (Vsg > 34)

End Sub

'-----FUNCIÓN QUE CALCULA EL ERROR ASOCIADO AL MODELO DE IKH-----

Function Transición_IKH(nl, D, Vg, Vl, Vsl, Vsg)

Dim AA, BB1, BB2, BB, CC, DD, EE, DEN As Double

Dim Rl, Rg As Double

Dim K, ff As Double

Call Calculo_De_Variables_Geométricas(nl, D, A, Ag, Al, Sl, Sg, Si,
Dg, Dl)

Rl = Al / A

Rg = Ag / A

DEN = (pl / Rl) + (pg / Rg)

CC = (1 / DEN) * ((pl * Vl ^ 2 / Rl) + (pg * Vg ^ 2 / Rg) - (pl -
pg) * g * Cos(Ang) * A / Si)

AA = (1 / DEN) * ((pl * Vl / Rl) + (pg * Vg / Rg))

DD = Tsup * A / (DEN * Si)

Transición_IKH = -(AA ^ 2 - CC)

End Function

'-----MÉTODO ITERATIVO PRINCIPAL DEL MODELO DE IKH-----

Sub Cuerpo_Principal_IKH()

Dim F, cont, cont1 As Integer
```

```
Dim Error, Error2, Error1 As Double

Dim Vs11, Vs12, V11, V12, Vg1, Vg2 As Double

F = 3

Call Lectura_de_Datos

Vsg = 0.01

Do

    cont1 = 1

    Vs1 = 10

    Error1 = 0

    Error2 = 0

    cont = 1

    Do

        Error1 = Error2

        Vs12 = Vs1

        If (cont <> 1) Then

            If (Error2 < 0) Then

                Vs1 = Vs1 * 2

            Else

                Vs1 = Vs1 * 0.9

            End If

        End If

        Vs11 = Vs1
```

```
Call Biseccion_en_Balance_de_Momento(nl, Vsg, Vsl, Vl,
Vg, Error)

Error2 = Transición_IKH(nl, D, Vg, Vl, Vsl, Vsg)

cont = cont + 1

If (Error1 * Error2 < 0) Then

Do

Vsl = (Vsl1 + Vsl2) / 2

Call Biseccion_en_Balance_de_Momento(nl, Vsg, Vsl1,
Vl1, Vg1, Error)

Error1 = Transición_IKH(nl, D, Vg1, Vl1, Vsl1,
Vsg)

Call Biseccion_en_Balance_de_Momento(nl, Vsg, Vsl,
Vl, Vg, Error)

Error2 = Transición_IKH(nl, D, Vg, Vl, Vsl, Vsg)

If (Error1 * Error2 < 0) Then

Vsl2 = Vsl

Else

Vsl1 = Vsl

End If

Loop Until (Abs(Error2) < 0.0001)

End If

Loop Until (Abs(Error2) < 0.0001)

Sheets("IKH").Select
```

```

F = F + 1

Cells(F, 2) = Vsg

Cells(F, 3) = Vsl

Vsg = (10 ^ ((Log(Vsg) / Log(10)) + 0.1))

Loop Until (Vsg > 34)

End Sub

'-----FUNCIÓN QUE CALCULA EL ERROR ASOCIADO AL MODELO DE VKH-----

Function Transición_VKH(nl, D, Vg, Vl, Vsl, Vsg)

Dim AA, BB1, BB2, BB, CC, DD, EE, DEN As Double

Dim Rl, Rg As Double

Dim Kv, ff As Double

Dim C4, C5 As Double

Call Calculo_De_Variables_Geométricas(nl, D, A, Ag, Al, Sl, Sg, Si,
Dg, Dl)

Rl = Al / A

Rg = Ag / A

DEN = (pl / Rl) + (pg / Rg)

CC = (1 / DEN) * ((pl * Vl ^ 2 / Rl) + (pg * Vg ^ 2 / Rg) - (pl -
pg) * g * Cos(Ang) * A / Si)

AA = (1 / DEN) * ((pl * Vl / Rl) + (pg * Vg / Rg))

BB1 = (Balance_de_Momento(nl, Vsg, Vsl + 0.00001 * Vsl / 2, Vg, Vl)
- Balance_de_Momento(nl, Vsg, Vsl - 0.00001 * Vsl / 2, Vg, Vl)) /
(0.00001 * Vsl)

```

---

```

BB2 = (Balance_de_Momento(nl, Vsg + 0.00001 * Vsg / 2, Vsl, Vg, Vl)
- Balance_de_Momento(nl, Vsg - 0.00001 * Vsg / 2, Vsl, Vg, Vl)) /
(0.00001 * Vsg)

```

```

BB = (1 / (2 * DEN)) * (BB1 - BB2)

```

```

DD = Tsup * A / (DEN * Si)

```

```

EE = -(1 / DEN) * (pi * D / Si / 4) * (Balance_de_Momento(nl +
0.00001 / 2, Vsg, Vsl, Vg, Vl) - Balance_de_Momento(nl - 0.00001 /
2, Vsg, Vsl, Vg, Vl)) / 0.00001

```

```

C5 = EE / (2 * BB)

```

```

C4 = (pl * Vl * Rg + pg * Vg * Rl) / (pl * Rg + pg * Rl)

```

```

Transición_VKH = ((EE / (2 * BB)) - AA) ^ 2 - (AA ^ 2 - CC) ' - DD

```

```

End Function

```

```

'-----MÉTODO ITERATIVO PRINCIPAL DEL MODELO DE VKH-----

```

```

Sub Cuerpo_Principal_VKH()

```

```

    Dim F, cont, cont1 As Integer

```

```

    Dim Error, Error2, Error1 As Double

```

```

    Dim Vsl1, Vsl2, Vl1, Vl2, Vg1, Vg2 As Double

```

```

    F = 3

```

```

    Call Lectura_de_Datos

```

```

    Vsg = 0.01

```

```

    Do

```

```

        cont1 = 1

```

```

        Vsl = 1

```

```
Error1 = 0

Error2 = 0

cont = 1

Do

    Error1 = Error2

    Vsl2 = Vsl

    If (cont <> 1) Then

        If (Error2 < 0) Then

            Vsl = Vsl * 2

        Else

            Vsl = Vsl * 0.9

        End If

    End If

    Vsl1 = Vsl

    Call Biseccion_en_Balance_de_Momento(nl, Vsg, Vsl, Vl,
Vg, Error)

    Error2 = Transición_VKH(nl, D, Vg, Vl, Vsl, Vsg)

    cont = cont + 1

    If (Error1 * Error2 < 0) Then

        Do

            Vsl = (Vsl1 + Vsl2) / 2
```

---

```
        Call Biseccion_en_Balance_de_Momento(nl, Vsg, Vsl1,
Vl1, Vg1, Error)

        Error1 = Transición_VKH(nl, D, Vg1, Vl1, Vsl1,
Vsg)

        Call Biseccion_en_Balance_de_Momento(nl, Vsg, Vsl,
Vl, Vg, Error)

        Error2 = Transición_VKH(nl, D, Vg, Vl, Vsl, Vsg)

        If (Error1 * Error2 < 0) Then

            Vsl2 = Vsl

        Else

            Vsl1 = Vsl

        End If

        Loop Until (Abs(Error2) < 0.0001)

    End If

Loop Until (Abs(Error2) < 0.0001)

Sheets("VKH").Select

F = F + 1

Cells(F, 2) = Vsg

Cells(F, 3) = Vsl

Vsg = (10 ^ ((Log(Vsg) / Log(10)) + 0.1))

Loop Until (Vsg > 20)

End Sub
```

---

---

'-----MODELO QUE CONSTRUYE LA CURVA DE HL/D=0.5-----'

```
Sub Cuerpo_Principal_Hl()  
  
    Dim F, cont, cont1 As Integer  
  
    Dim Error, Error2, Error1 As Double  
  
    Dim Vsl1, Vsl2, Vl1, Vl2, Vg1, Vg2 As Double  
  
    F = 3  
  
    Call Lectura_de_Datos  
  
    Vsg = 1  
  
    Do  
  
        cont1 = 1  
  
        Vsl = 0.01  
  
        Error1 = 0  
  
        Error2 = 0  
  
        cont = 1  
  
        nl = 0.5  
  
        Do  
  
            Error1 = Error2  
  
            Vsl2 = Vsl  
  
            If (cont <> 1) Then  
  
                If (Error2 > 0) Then  
  
                    Vsl = Vsl * 2  
  
                Else
```

```
Vs1 = Vs1 * 0.9

End If

End If

Vs11 = Vs1

Error2 = Balance_de_Momento(n1, Vsg, Vs1, Vg, V1)

cont = cont + 1

If (Error1 * Error2 < 0) Then

    Do

        Vs1 = (Vs11 + Vs12) / 2

        Error1 = Balance_de_Momento(n1, Vsg, Vs11, Vg1, V11)

        Error2 = Balance_de_Momento(n1, Vsg, Vs1, Vg, V1)

        If (Error1 * Error2 < 0) Then

            Vs12 = Vs1

        Else

            Vs11 = Vs1

        End If

    Loop Until (Abs(Error2) < 0.0001)

End If

Loop Until (Abs(Error2) < 0.0001)

Sheets("hl-D").Select

F = F + 1

Cells(F, 2) = Vsg
```

---

```
Cells(F, 3) = Vsl

Vsg = (10 ^ ((Log(Vsg) / Log(10)) + 0.1))

Loop Until (Vsg > 50)

End Sub

'-----MÓDULO QUE EJECUTA LOS MÓDULOS DE LOS MODELOS-----

Sub Botón17_AlHacerClic()

Dim i As Integer

For i = 4 To 50

    Sheets("TD").Select

    Cells(i, 2) = ""

    Cells(i, 3) = ""

    Sheets("IKH").Select

    Cells(i, 2) = ""

    Cells(i, 3) = ""

    Sheets("VKH").Select

    Cells(i, 2) = ""

    Cells(i, 3) = ""

Next

Sheets("Hoja Inicial").Select

If (Cells(32, 1) = True) Then

Call Cuerpo_Principal_TD

End If
```

```
Sheets("Hoja Inicial").Select

If (Cells(33, 1) = True) Then

Call Cuerpo_Principal_IKH

End If

Sheets("Hoja Inicial").Select

If (Cells(34, 1) = True) Then

Call Cuerpo_Principal_VKH

End If

Call Cuerpo_Principal_H1

End Sub
```