

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Determinación Experimental de la Fracción Volumétrica de líquido con deslizamiento en Flujo Bifásico de aire y agua en Tuberías Horizontales

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los bachilleres:

Leyton D., Carlos.

Hernández P., Luis.

Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Determinación Experimental de la Fracción Volumétrica de líquido con deslizamiento en Flujo Bifásico de aire y agua en Tuberías Horizontales

TUTOR ACADÉMICO: **Prof. García, Francisco.**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los bachilleres:

Leyton D., Carlos.

Hernández P., Luis.

Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
 FACULTAD DE INGENIERIA
 ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
 DEPARTAMENTO DE ENERGETICA



Caracas, 24 de noviembre de 2.008

ACTA

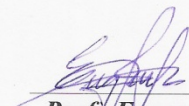
Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

HERNANDEZ LUIS y LEYTON CARLOS


Titulado:

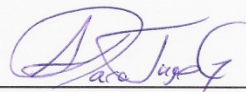
“DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA FRACCION VOLUMETRICA DE LIQUIDO CON DESLIZAMIENTO EN FLUJO BIFASICO DE AIRE Y AGUA EN TUBERIAS HORIZONTALES”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Titulo de Ingeniero Mecánico.


 Prof. Eugenio Sansone
 Jurado




 Prof. Julio Segura
 Jurado


 Prof. Francisco García
 Tutor

“NÚCLEO DE INGENIERIA “ARMANDO MENDOZA” HACIA EL 30º ANIVERSARIO”

DEDICATORIA

A mi Familia, a Daniela

Carlos E. Leyton

A mi Familia

Luis Manuel Hernández

AGRADECIMIENTOS

Al **CDCH** por el apoyo prestado a través de los proyectos PI 08-00-6245-2008 y PG 08-00-5653-2007 y la ayuda institucional No 08.00.6681.2007.

Leyton D., Carlos y Hernández P., Luis

Determinación Experimental de la Fracción Volumétrica de líquido con deslizamiento en Flujo Bifásico de aire y agua en Tuberías Horizontales

Tutor Académico: Prof. Francisco García. Trabajo Especial de Grado. Caracas, UCV.
Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2008. 97 págs.

Palabras Claves: Flujo Bifásico, Fracción Volumétrica de Líquido, Deslizamiento entre las fases, Correlaciones Empíricas, Modelos Mecanicistas.

RESUMEN

En este trabajo se realizó la determinación experimental de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento para flujo bifásico de aire y agua en tuberías horizontales. Para esto el banco experimental de flujo bifásico Gas – Líquido ubicado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela fue modificado con el fin de instalar un sistema de retención de líquido para obtener de manera indirecta el parámetro de estudio. Esto consistió en la instalación de 2 válvulas de cierre rápido para cortar el flujo en el tramo de visualización y un sistema de desvío, compuesto por otra válvula de la misma clase que las anteriores y un accesorio tipo “Tee”, a fin de mantener un flujo continuo y evitar fallos en los materiales y equipos. El cálculo de la fracción volumétrica de líquido se realizó mediante la medición de la altura de la película de agua una vez ejecutada la acción de cierre de válvulas, para dicha medición fue empleado un paquete computacional de procesamiento de imágenes en el cual la altura de líquido se determina digitalmente. Se desarrolló una base experimental con 213 datos. Se observó un decrecimiento de la fracción volumétrica de líquido en la medida que aumenta la velocidad superficial de gas y un incremento de ésta en la medida que aumenta la velocidad superficial de líquido. Finalmente se presentó la evaluación de 10 correlaciones empíricas, 2 modelos mecanicistas y la definición del modelo homogéneo. La evaluación muestra que las dos mejores correlaciones obtienen errores absolutos promedios menores al 15%, en contraposición al mejor modelo mecanicista que obtiene un error porcentual absoluto de 24,8%. El no considerar el deslizamiento entre las fases tal como lo propone el modelo homogéneo origina un error absoluto promedio de 68,3% en la determinación de la fracción volumétrica de líquido frente a los datos experimentales generados.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
NOMENCLATURA, SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PROBLEMA EN ESTUDIO	4
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES	5
1.2.1. Objetivo General.....	5
1.2.2. Objetivos Específicos	5
1.2.3. Alcances.....	6
1.2.4. Metodología.....	7
CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE FLUJO BIFÁSICO	11
2.2. ANTECEDENTES	15
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE LÍQUIDO	23
3.1. CIRCUITO DE FLUJO BIFASICO	23
3.2. EL BANCO DE ENSAYOS.....	25
3.3. ELEMENTOS DEL BANCO DE ENSAYO	27
3.3.1. Seccion de desvio de flujo	27

3.3.2.	Valvulas de cierre rápido	29
3.3.3.	Sistema de suministro de fluidos de operación (agua – aire)	33
3.3.4.	Elementos de medición	35
3.3.5.	Componentes para la captura de imágenes	37
3.4.	SINTESIS DE LAS MODIFICACIONES REALIZADAS AL BANCO EXPERIMENTAL	40
CAPÍTULO IV:	ENSAYOS EXPERIMENTALES	42
4.1.	CÁLCULO DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE LÍQUIDO CON DESLIZAMIENTO “LIQUID HOLDUP”	42
4.2.	MEDICIÓN DE LA ALTURA DE LÍQUIDO.....	45
4.3.	PROTOCOLO EXPERIMENTAL PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE LÍQUIDO EN FLUJO BIFÁSICO GAS-LÍQUIDO	53
CAPÍTULO V:	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
5.1.	BASE DE DATOS EXPERIMENTALES DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE LÍQUIDO.....	56
5.2.	EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LOS MODELOS SELECCIONADOS.....	68
SÍNTESIS Y CONCLUSIONES.....	72
RECOMENDACIONES.....	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
APÉNDICE.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Componentes del Sistema de Instrumentación y Control del Circuito de Flujo Bifásico	32
Tabla 2. Parámetros Dimensionales del Banco Experimental de Flujo Bifásico.....	41
Tabla 3. Tabla de valores para el Cálculo del volumen total de la zona de Visualización.....	52
Tabla 4. Datos experimentales por patrón de flujo.	56
Tabla 5. Rango de valores obtenidos en los experimentos de flujo bifásico	58
Tabla 6. Acrónimos de los modelos y correlaciones seleccionadas.....	68
Tabla 7. Evaluación de la precisión de los modelos y/o correlaciones seleccionados contra la data experimental de 213 puntos obtenida en el banco de ensayos.	69
Tabla A. 1. Valores en la incertidumbre de medición de la fracción volumétrica de líquido.	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una tubería ocupada por la fase Gaseosa y Líquida.	12
Figura 2. Deslizamiento y retraso del líquido (Haoulo, 2007).....	14
Figura 3. Patrones de flujo en tuberías horizontales. (Suarez y Toro, 2007).....	18
Figura 4. Descripción de los Elementos que conforman el Circuito de Flujo Bifásico	24
Figura 5. Se muestra un sistema de Unión Manguera – Válvula en el Banco Experimental.	26
Figura 6. Ejemplo de Uniones empleadas en el Banco Experimental. A la derecha, se aprecia un sistema de Juntas Tubería – Válvula, a la izquierda un sistema de Juntas Tubería – Tubería.....	26
Figura 7. (a) Ensamble del Accesorio, (b) Accesorio tipo “T” instalado en el circuito de Flujo Bifásico.	27
Figura 8. (a) Flujo a través del Accesorio tipo “T” en la modalidad de Operación, (b) Flujo a través del Accesorio tipo “T” en la modalidad de desvío.....	28
Figura 9. En la imagen se aprecia la disposición de las Válvulas de Cierre Rápido en el Circuito de Flujo Bifásico.	29
Figura 10. Unidad Operativa de la Válvula de Cierre Rápido con señalización de las partes.	30

Figura 11. (a) Isometría de la base de válvulas, (b) Disposición de las válvulas 1 y de desvío en el circuito de flujo Bifásico.....	31
Figura 12. Diagrama de la conexiones eléctricas y Neumáticas del Banco Experimental.....	33
Figura 13. Botonera de Control del Sistema de Apertura – Cierre de Válvulas de Bola.....	33
Figura 14. (a) Compresor Reciprocante ubicado en la sala de Calderas. (b) Compresor Reciprocante ubicado en el Galpón de Máquinas Térmicas FIUCV. (Suarez y Toro, 2007).	34
Figura 15. Bomba de Suministro de Líquido del Banco experimental de Flujo Bifásico.	34
Figura 16. Sección de Mezcla, Circuito de Flujo Bifásico.	35
Figura 17. Curvas de Calibración de Placas Orificio del Sistema de Medición de Suministro de Líquido. (Cela y Fuentes 2008)	35
Figura 18. (a) Vórtex de Medición de Bajos Caudales de Aire. (b) Vórtex de Medición de Altos Caudales de Aire.	36
Figura 19. (a) Reflejo de la luz sobre la tubería. (b) Reflejo de la luz sobre la caja. (Haoulo, 2007)	37
Figura 20. Colocación de anime comprimido en las paredes superior, inferior y posterior de la caja de Visualización.....	38

Figura 21. Vista Lateral y Frontal con la Disposición de la Iluminación de la Zona de Visualización del Circuito de Flujo Bifásico.	39
Figura 22. (a) Cámara de Video HD. (b) Montaje de la Cámara de Video en la Plataforma de Toma de Imágenes y Videos.....	39
Figura 23. Esquema del sistema de desvío de flujo bifásico existente en el banco experimental.....	40
Figura 24. Zonas de trazado del mapa de patrones de flujo (Cela y Fuentes, 2008). .	43
Figura 25. Imagen sin procesar tomada en el momento del experimento.....	45
Figura 26. Carga de la Fotografía al software de procesamiento.....	46
Figura 27. Calibración de la Imagen.	47
Figura 28. Verificación de la calibración de la imagen para la posterior medición de la altura de líquido.	47
Figura 29. Medición de las alturas máximas y mínimas respecto al menisco.	48
Figura 30. Esquema de la sección transversal de tubería, (http://mathworld.wolfram.com/CircularSegment.html)	49
Figura 31. Balanza marca OHAUS, apreciación: $\pm 0,001$ kg. Ubicada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química UCV.....	51
Figura 32. Mapa de patrones de flujo.....	57

Figura 33. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 0,080-0,088m/s.....	59
Figura 34. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 0,223-0,259m/s.....	59
Figura 35. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 0,330-0,352m/s.....	60
Figura 36. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 0,470-0,485m/s.....	60
Figura 37. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 0,673-0,685m/s.....	61
Figura 38. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 0,953-0,965m/s.....	62
Figura 39. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 1,170-1,180m/s.....	63
Figura 40. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 1,353-1,366m/s.....	63
Figura 41. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 1,502-1,522m/s.....	64
Figura 42. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un rango de U_{SL} de 2,006-2,028m/s.....	64

Figura 43. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un rango de U_{SL} de 2,199-2,245m/s.....	65
Figura 44. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un rango de U_{SL} de 2,518-2,532m/s.....	65
Figura 45. Datos experimentales de fracción volumétrica de líquido con deslizamiento vs. Velocidades superficiales de gas y líquido.....	66
Figura 46. Diagrama de paridad entre los valores de fracción volumétrica de líquido con deslizamiento H_L y sin deslizamiento λ_L	67
Figura 47. Diagrama de paridad entre los valores de H_L experimental y los valores de H_L teóricos.....	70
Figura A. 1. Planos constructivos de la Sección de desvío de flujo (1/5).....	83
Figura A. 2. Planos constructivos de la Sección de desvío de flujo (2/5).....	84
Figura A. 3. Planos constructivos de la Sección de desvío de flujo (3/5).....	85
Figura A. 4. Planos constructivos de la Sección de desvío de flujo (4/5).....	86
Figura A. 5. Planos constructivos de la Sección de desvío de flujo (5/5).....	87
Figura A. 6. Manual del actuador neumático de las válvulas de cierre rápido (1/6). .	88
Figura A. 7. Manual del actuador neumático de las válvulas de cierre rápido (2/6). .	89
Figura A. 8. Manual del actuador neumático de las válvulas de cierre rápido (3/6). .	90
Figura A. 9. Manual del actuador neumático de las válvulas de cierre rápido (4/6). .	91
Figura A. 10. Manual del actuador neumático de las válvulas de cierre rápido (5/6). 92	
Figura A. 11. Manual del actuador neumático de las válvulas de cierre rápido (6/6). 93	
Figura A. 12. Manual de la válvula solenoide de las válvulas de cierre rápido (1/2). 94	
Figura A. 13. Manual de la válvula solenoide de las válvulas de cierre rápido (2/2). 95	
Figura A. 14. Manual del interruptor posicionador de válvulas de cierre rápido.	96
Figura A. 15. Dimensiones de la válvula de bola.	97

NOMENCLATURA, SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Nomenclatura

A : Área transversal de la tubería

D : Diámetro

e : Desviación normal del promedio

E_1 : Error porcentual promedio

E_2 : Error porcentual absoluto promedio

E_3 : Desviación Estándar del error porcentual promedio

E_4 : Raíz cuadrada del promedio del error porcentual al cuadrado (root mean square percent error)

G : Flujo másico total por unidad de área o velocidad másica

h_L : Altura del líquido

H_L : Fracción volumétrica del líquido con deslizamiento

L : Longitud de tubería

\dot{m} : Tasa de flujo másico

m : Masa

n : Número de datos, número de puntos o mediciones

Q : Caudal, Tasa de flujo volumétrico

U : Velocidad superficial, velocidad de mezcla.

V : Volumen

x : Fracción másica del gas

XM : Factor de Lockhart y Martinelli

Símbolos Griegos

α : Fracción volumétrica ocupada por la fase gaseosa

Δ : Variación o diferencia.

ε : Rugosidad total,

λ : Fracción volumétrica de gas o líquido sin deslizamiento.

μ : Viscosidad dinámica.

π : Número pi.

ρ : Densidad.

φ : Error relativo porcentual

Subíndices y Superíndices

exp: Experimental.

G: Gas

L: Líquido

SG: Superficial del gas.

SL: Superficial del líquido

T: Total

v: volumétrico

Abreviaturas

AN: Flujo Anular

ABDC: Correlación de Abdul-Majeed (1996)

BBC: Correlación de Beggs y Brill (1973)

BARC: Correlación transformada de Baroczy, Butterworth (1975)

BD: Flujo burbuja dispersa

CSC: Correlación de Chen y Spedding (1981)

FPHC: Correlación clasificadas por patrón de flujo de H_L , por García (2004)

GMM: Modelo mecanicista de Gómez *et al.* (2000)

HME: Evaluación de la fracción volumétrica de líquido del modelo homogéneo

LMC: Correlación de Lockhart y Martinelli (1949)

NYC: Correlación de Nishino y Yamazaki (1963)

SL: Flujo tapón

SW: Flujo estratificado ondulado

THOC: Correlación transformada de Thom, Butterworth (1975)

TMC: Correlación del modelo teórico de H_L , por García (2004)

UHC: Correlación universal compuesta de H_L , por García (2004)

XMM: Modelo mecanicista de Xiao *et al.* (1990)

INTRODUCCIÓN

El flujo de fluidos en tuberías es una de las aplicaciones más comunes e importantes en diversas áreas de la ingeniería. Se puede encontrar distintos arreglos en el tipo de flujo circulante, uno de estos, tema de estudio de este Trabajo Especial de Grado es el Flujo Multifásico, específicamente Flujo Bifásico Gas – Líquido, en el cual ambas fases fluyen simultáneamente a través de un conducto. Este tipo de flujo bifásico es una de las configuraciones más complejas que existen. Por un lado, debido a la gran variedad de disposiciones relacionadas con la distribución espacial de ambas fases a lo largo de la tubería; estas configuraciones espaciales se conocen como patrones de flujo. Por otra parte, se debe a lo complicado de cuantificar en qué proporción están fluyendo ambas fases; se define a esta proporción como la fracción volumétrica de líquido para el caso en que se estudie a la fase líquida, y la fracción de vacío para el caso del gas.

El flujo bifásico gas – líquido ocurre en una gran variedad de campos industriales. Ejemplos de esto son las industrias: petrolera, química, nuclear y geotérmica, así como también, en una amplia gama de aplicaciones ingenieriles. Este tipo de flujo es frecuente en la industria Petrolera, Química y de Procesos. En la industria petrolera, el flujo bifásico ocurre durante la producción y el transporte del petróleo y gas natural. Este tipo de flujo ocurre tanto en los pozos como en las líneas de transporte: tuberías horizontales, inclinadas y verticales. En la producción costa afuera, estas líneas pueden recorrer distancias sustanciales antes de llegar a los centros de separación por lo que es necesaria la creación de métodos para determinar la caída de presión y de la fracción volumétrica de líquido (Holdup), para saber el tamaño de las líneas de flujo y los separadores a utilizar. En la industria química y de procesos, se encuentra flujo bifásico en casi todas las aplicaciones. El diseño de dichas plantas requiere de un método para determinar, tanto la caída de presión y la fracción de líquido en las tuberías, como también el proceso de transferencia de calor y masa. La determinación del tipo de patrón de flujo es requerida especialmente para un apropiado diseño del reactor.

Conocer el gradiente de presión, la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento “Liquid Holdup” y el patrón de flujo existente durante el flujo de gas y de líquido en tuberías es necesario para el diseño de equipos que operen con flujo bifásico. En flujo bifásico las velocidades de las fases generalmente no son iguales por lo que la determinación de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento es de gran importancia para conocer su comportamiento.

Ha existido la necesidad de generar métodos aplicados al manejo de este flujo los cuales han estimulado una extensa investigación sobre esta área desde la década de los 50. En la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela se construyó un Banco Experimental para el estudio de Flujo Bifásico Gas – Líquido y de trabajos realizados anteriormente (Haoulo 2007, Suarez y Toro 2007), se ha desarrollado una base experimental de patrones de flujo en tuberías horizontales e inclinadas ascendente y descendente. Sin embargo, hasta en presente no se han realizado experimentos para determinar la fracción volumétrica de líquido por no contar con los equipos para tal fin. En este sentido, se realizaron un conjunto de modificaciones al banco de ensayos para estudiar la fracción volumétrica de líquido, entre estas se tiene la instalación de válvulas de cierre rápido para efectuar la retención y una sección de desvío de flujo.

El estudio experimental de esta variable permite una mejor comprensión de este fenómeno. Por otra parte, la adquisición de datos experimentales es necesaria para el desarrollo y/o validación de modelos y correlaciones que permitan determinar la Fracción Volumétrica de Líquido. El objetivo del presente Trabajo Especial de Grado es realizar experimentos para determinar la fracción Volumétrica de Líquido “Liquid Holdup” en tuberías horizontales para esto es necesario la instalación de un sistema al Circuito de Flujo Bifásico con el fin de generar una base de datos experimental que permita el entendimiento de esta propiedad, al mismo tiempo, que sirva de fundamento en la validación de diferentes correlaciones y modelos presentados en la literatura especializada.

Este trabajo de grado está compuesto por cinco capítulos. El capítulo I, se presenta el planteamiento del problema, los objetivos y alcances de este estudio así como la metodología utilizada.

El capítulo II, lo conforma una revisión bibliográfica, cubriendo aspectos fundamentales sobre flujo bifásico en tuberías horizontales y mencionando brevemente antecedentes acerca del tema, incluyendo en estos los modelos y correlaciones utilizadas para la evaluación de la fracción volumétrica de líquido.

En el capítulo III, se realiza una descripción del banco experimental, los elementos que lo conforman y modificaciones realizadas para la recolección de los datos para el cálculo de la fracción volumétrica de líquido.

En el capítulo IV, se presenta una explicación detallada de la metodología empleada para la adquisición de aquellos parámetros necesarios para la determinación de la variable de estudio de este trabajo de grado. La determinación de la fracción volumétrica de líquido está limitada por el intervalo de operación del banco experimental a partir de las velocidades mínimas y máximas de las fases alcanzadas en flujo monofásico. Se diseña un protocolo experimental para realizar las pruebas tomando en cuenta las condiciones de operación del banco experimental.

Los resultados obtenidos se muestran en el capítulo V. Primero se presenta un resumen de los datos experimentales, mostrando en forma gráfica la base de datos desarrollada en función de las velocidades superficiales de agua y aire. Luego se presenta la evaluación del desempeño de 13 modelos y correlaciones utilizados en la determinación de la fracción volumétrica de líquido presentes en la literatura especializada, finalizando con la síntesis de análisis de resultados y sus respectivas conclusiones, junto con las recomendaciones pertinentes para futuros trabajos de investigación en el área de flujo bifásico en tuberías horizontales.

CAPÍTULO I: PROBLEMA EN ESTUDIO

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estudio del flujo bifásico ha tenido auge por el interés de ciertas industrias, como la petrolera y la del gas natural, en optimizar y hacer más rentable el transporte de sus productos. La importancia de esto es de tal magnitud, que el estudio de flujos multifásicos se ha venido desarrollando desde la década de los 50 en un intento por entender el comportamiento de las mezclas de múltiples fases, enfocados principalmente al cálculo de la caída de presión en la tubería y la determinación de la fracción volumétrica de líquido y el patrón de flujo. Otros lugares donde se puede encontrar cierto interés en el estudio de estas variables es en la industria química, nuclear, plantas termoeléctricas, en la industria de la calefacción, ventilación, refrigeración y acondicionamiento de aire (HVAC & R industries) así como también en el transporte neumático.

En general la mayoría de los modelos y correlaciones para determinar el gradiente de presión de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías requieren conocer directa o indirectamente la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento.

De lo anteriormente expuesto, se propone determinar experimentalmente la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento para flujo bifásico de aire y agua en tuberías horizontales.

1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general del Trabajo de Grado, aquí propuesto, es determinar experimentalmente la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento (Liquid Holdup) para flujo bifásico de aire y agua en tuberías horizontales. Para cumplir este objetivo, se deben realizar los siguientes objetivos específicos:

1.2.2. Objetivos Específicos

- 1) Construir e Instalar el sistema de desvío de flujo bifásico.
- 2) Instalar el sistema de medición de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento en el banco experimental de flujo bifásico.
- 3) Diseñar el protocolo experimental para realizar las mediciones de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento para el intervalo de operación del banco experimental de flujo bifásico.
- 4) Realizar mediciones de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento para el intervalo de operación del banco experimental de flujo bifásico.
- 5) Desarrollar una base de datos experimental de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento clasificando los datos por patrón de flujo.
- 6) Evaluar el desempeño para predecir la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento de diferentes modelos presentados en la literatura especializada usando los datos experimentales generados en el punto precedente.

1.2.3. Alcances

- 1) Para realizar las pruebas se utilizó el banco experimental para el estudio de flujo bifásico en tuberías construido por Tovar e Ibarra (2006).
- 2) El diseño y la construcción del circuito de toma de datos, está limitado por la configuración estructural del banco experimental y por las características de las válvulas de cierre rápido adquiridas previo a la ejecución de este trabajo.
- 3) Los valores obtenidos experimentalmente de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento dependen de los patrones de flujo generados en el banco experimental para el estudio de flujo bifásico en tuberías construido por Tovar e Ibarra (2006).
- 4) Se evaluó el desempeño de 10 correlaciones, 2 modelos mecanicistas y la definición del modelo homogéneo en la determinación de la fracción volumétrica de líquido. Las 10 correlaciones seleccionadas fueron las que presentaron el mejor desempeño en el trabajo desarrollado por García *et al.* (2005). La evaluación se realizó comparando los resultados teóricos de dichas correlaciones y modelos con los resultados experimentales generados en el circuito experimental de flujo bifásico. La programación e implantación de las correlaciones y modelos seleccionados no formó parte de este TEG.

1.2.4. Metodología

La metodología desarrollada en el presente trabajo, se puede dividir en tres partes. La primera relacionada con la recolección de los datos experimentales, la segunda correspondiente al procesamiento de los datos a fin de obtener la fracción volumétrica de líquido y la última se refiere a la evaluación del desempeño de diferentes correlaciones y modelos presentados en la literatura especializada para evaluar la fracción volumétrica de líquido comparándolos con los datos experimentales generados.

Previamente a la elaboración de este Trabajo de Grado se llevó a cabo una revisión bibliográfica con el fin de conocer aspectos fundamentales sobre Flujo Bifásico, enfocándose en el tema concerniente a la fracción volumétrica de líquido.

Una vez adquirido el conocimiento básico del tema, se procedió a la obtención de los datos. Para ello fue necesaria la realización de una serie de modificaciones al banco experimental para el estudio de flujo bifásico Gas – Líquido en tuberías construido por Tovar e Ibarra (2006). Dichas modificaciones consistieron en la instalación de un sistema de retención de flujo bifásico para la obtención de la fracción volumétrica de líquido. Este sistema está constituido por la *sección de desvío de flujo* y la *sección de visualización y prueba*, en la cual se realiza la medición de la altura de la fracción de líquido mediante la captura de imágenes. Para la recolección de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento se emplearon tres válvulas de bola de cierre rápido accionadas neumáticamente. Dos válvulas fueron instaladas en la *sección de visualización y prueba* y la tercera fue colocada en la *sección de desvío*. Las válvulas son controladas simultáneamente por posicionadores de contacto seco accionadas por un solo interruptor. Cuando las válvulas de la *sección de visualización y prueba* se encuentran abiertas, la válvula de la *sección de desvío* permanece cerrada y viceversa.

Una vez finalizadas las pruebas experimentales, se realizó el procesamiento de las imágenes para determinar la altura de líquido necesaria para el cálculo de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento. Para ello fue requerido el uso del programa MediaCybernetics® Image-Pro Plus 6.0. En la imagen tomada se logra apreciar claramente el diámetro interno de la tubería, conociendo previamente dicho valor, se emplea el programa para la calibración y posterior cálculo de la fracción de líquido.

En una hoja de cálculo de Microsoft® Excel previamente programada con las formulas de área de la sección transversal de líquido A_{STL} y fracción volumétrica de líquido H_L , fueron introducidos los valores de altura de líquido obtenidos en el procesamiento de imágenes mencionado anteriormente.

El cálculo del área de la sección transversal de líquido se obtiene de la relación geométrica dada por la Ec. (1), la cual se detalla en la sección 4.2

$$A_{STL} = R^2 \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right) - (R-h)\sqrt{2Rh-h^2} \quad (1)$$

Siendo, R el radio interno de la tubería y h la altura de líquido

La fracción de volumétrica de líquido con deslizamiento viene dada por:

$$H_L = \frac{V_L}{V_T} \quad (2)$$

Donde, V_L es el volumen que ocupa la fase líquida contenida en un segmento de tubería y V_T el volumen total de dicho segmento.

Finalmente, se evaluó la precisión de las 10 correlaciones que obtuvieron el mejor desempeño en el trabajo desarrollado por García et al. (2005), comparando los valores calculados frente a la base de datos experimental desarrollada. Adicionalmente, se evaluaron los modelos de Xiao *et al.* (1990), Gómez *et al.* (2000) y la definición del modelo homogéneo.

Dicha comparación se realizó mediante el cálculo de 4 parámetros estadísticos frecuentemente utilizados (Gregory y Fogarasi, 1985; Xiao et al., 1990).

Estos parámetros estadísticos se definen como:

- El error porcentual promedio E_1 :

$$E_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi_i \quad (3)$$

Siendo

$$\varphi_i = \left(\frac{H_{L_{calc}} - H_{L_{exp}}}{H_{L_{exp}}} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

n = Número de datos experimentales

- El error porcentual absoluto promedio E_2 :

$$E_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\varphi_i| \quad (5)$$

- La desviación estándar del error porcentual promedio E_3 :

$$E_3 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varphi_i - E_1)^2} \quad (6)$$

- La desviación estándar del valor calculado menos el valor experimental dividido entre el valor experimental o la raíz cuadrada del promedio del error porcentual al cuadrado (root mean square percent error) E_4 :

$$E_4 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varphi_i)^2} \quad (7)$$

El error porcentual promedio E_1 , es una medida de la concordancia entre los valores calculados y experimentales. Este indica en promedio, el grado de sobrepredicción (valores positivos) o subpredicción de los valores calculados con respecto a los experimentales. Similarmente, el error porcentual absoluto promedio E_2 , es una medida de la concordancia entre los valores calculados y experimentales. Sin embargo, los errores positivos y negativos no se cancelan entre sí. Por esta razón, el error porcentual absoluto promedio es considerado un parámetro clave para evaluar la capacidad de predicción de un conjunto de modelos y correlaciones. La desviación estándar del error porcentual promedio E_3 , indica el grado de dispersión de los errores con respecto al promedio. La raíz cuadrada del promedio del error porcentual al cuadrado (root mean square percent error) E_4 , indica el grado de dispersión entre los valores calculados y los valores experimentales. (Cravino y Pérez, 2007)

CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE FLUJO BIFÁSICO

Se han establecido para flujo bifásico, en nuestro caso de estudio gas – líquido, una serie de términos que se presentan a continuación:

- Tasa de flujo másico de la mezcla \dot{m}_M [M/T]:

$$\dot{m}_M = \dot{m}_L + \dot{m}_G \quad (8)$$

donde, \dot{m}_L : Tasa de flujo másico de líquido

\dot{m}_G : Tasa de flujo másico de gas

- Tasa de flujo volumétrico de la mezcla Q_M [L³/T]:

$$Q_M = Q_L + Q_G \quad (9)$$

donde, Q_L : tasa de flujo volumétrico de líquido

Q_G : tasa de flujo volumétrico de gas

- Velocidad de la fase líquida U_L [L/T]:

$$U_L = \frac{Q_L}{A_L} \quad (10)$$

- Velocidad de la fase líquida U_G [L/T]:

$$U_G = \frac{Q_G}{A_G} \quad (11)$$

donde A_L y A_G son las áreas de la sección transversal ocupadas por la fase líquida y la fase gaseosa respectivamente en la tubería, como se muestra en la Figura 1.

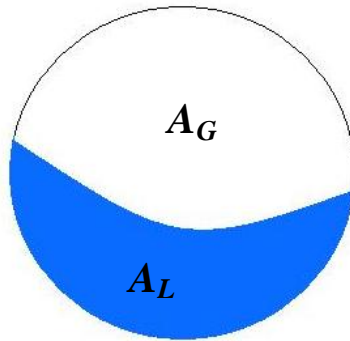


Figura 1. Esquema de una tubería ocupada por la fase Gaseosa y Líquida.

- Velocidad de mezcla de las fases U_M [L/T]:

$$U_M = U_{SL} + U_{SG} \quad (12)$$

donde,

$$U_{SL} = \frac{Q_L}{A} \text{ es la velocidad superficial del líquido,} \quad (13)$$

$$U_{SG} = \frac{Q_G}{A} \text{ es la velocidad superficial del gas,} \quad (14)$$

y A es el área de sección transversal de la tubería.

Es importante destacar que las velocidades de cada fase son distintas a la velocidad superficial de líquido y la velocidad superficial de gas; estas velocidades superficiales se definen como si las fases circularan de manera individual en la tubería. En la práctica no existe forma directa alguna de realizar la medición de las velocidades de cada fase.

- Fracción volumétrica de Líquido con deslizamiento o holdup H_L : La fracción volumétrica de líquido instantáneo $H_L(r,t)$ se refiere a un elemento diferencial de volumen y representa la fracción volumétrica de líquido para un tiempo y

lugar específico de la tubería, (Shoham, 2000). El valor promedio de la fracción volumétrica de líquido instantáneo viene dado por:

$$\langle \overline{H_L} \rangle = \frac{\iint H_L(r, t) dr dt}{\int dr \int dt} \quad (15)$$

Se define como la relación entre el volumen V_L que ocupa la fase líquida contenida en un segmento de tubería y el volumen total V_T de dicho segmento, para un instante de tiempo y una posición determinada dentro de la tubería. Para valores promedio de tiempo, longitud y velocidad se deriva la siguiente relación para la fracción volumétrica de líquido:

$$H_L = \frac{V_L}{V_T} \quad (16)$$

La fracción volumétrica de líquido varía desde cero, cuando el fluido es solamente gas, hasta uno, cuando la tubería sólo contiene líquido. El método más común para medir la fracción volumétrica de líquido es aislar un segmento de la corriente del fluido mediante el cierre rápido y simultáneo de válvulas y posterior medición de la cantidad de líquido atrapado. (Giordano y Pagnone, 2002)

Cuando un líquido y un gas fluyen simultáneamente en un conducto, la interfaz gas-líquido puede tomar una variedad de configuraciones conocidas como patrones de flujo. Baker fue uno de los primeros investigadores en reconocer la importancia de los patrones de flujo como un punto de partida para el cálculo de la caída de presión, y la transferencia de calor y de masa (Suárez y Toro, 2007).

La relación entre el volumen ocupado por la fase gaseosa y el volumen total es la fracción volumétrica de gas con deslizamiento o fracción de vacío H_G .

$$H_G = \frac{V_G}{V_T} = 1 - H_L \quad (17)$$

Cuando no existe deslizamiento entre ambas fases estas viajan a la misma velocidad, entonces, la fracción volumétrica de líquido sin deslizamiento λ_L se puede expresar en términos del caudal de líquido Q_L y el total $Q_T = Q_L + Q_G$

$$\lambda_L = \frac{Q_L}{Q_T} \quad (18)$$

Se expresa de forma similar la fracción volumétrica de gas sin deslizamiento como:

$$\lambda_G = \frac{Q_G}{Q_T} = 1 - \lambda_L \quad (19)$$

De modo que $U_L = U_G$, entonces $H_L = \lambda_L$. Este fenómeno se presenta de manera más explícita en el esquema presentado en la figura 2:

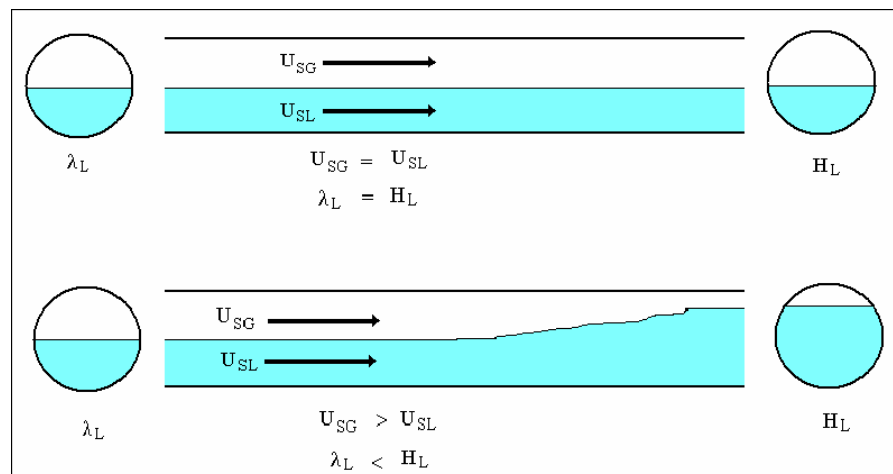


Figura 2. Deslizamiento y retraso del líquido (Haoulo, 2007)

2.2. ANTECEDENTES

El Flujo Bifásico Gas – Líquido se encuentra en diferentes procesos de la industria. Ejemplo de esto son las industrias de petróleo, química, nuclear y geotérmica.

Cuando un flujo bifásico se desplaza por una tubería, los fluidos que lo conforman van tomando diferentes distribuciones geométricas a lo largo del trayecto. Esta distribución geométrica, es lo que se conoce como patrones de flujo. Dicha distribución, puede tomar una gran variedad de configuraciones las cuales dependen de la topografía de la interfaz (Suarez y Toro, 2007). El patrón de flujo se refiere a cómo se distribuyen las fases al fluir simultáneamente a través de una tubería, es decir, a la forma que adopta el flujo bajo determinadas condiciones de caudal, (Beggs y Brill, 1973).

En flujo horizontal la descripción de patrones de flujo propuesta por Barnea *et al.*, (1980) es una de las más aceptadas. Barnea *et al.* (1980), proponen clasificar los patrones de flujo en tubería horizontal en flujo estatificado, flujo tapón, flujo burbuja y flujo anular como se observa en la Figura 3.

- *Flujo Estratificado*: Las fases están separadas por la acción de la gravedad, donde la fase líquida fluye en el fondo de la tubería y el gas en el tope. El flujo estratificado se subdivide en estratificado liso y estratificado ondulado de acuerdo a la forma que presente la superficie de líquido.
 - Estratificado liso (*Stratified Smooth Flow, SS*): se caracteriza por una separación completa de las fases, en la cual el líquido fluye por el fondo de la tubería y el gas por la parte superior de la misma.

- Estratificado ondulado (*Stratified Wavy Flow*, **SW**): se produce al aumentar la velocidad del gas con respecto a la que se tenía en el estratificado liso, produciendo ondas en la interfaz gas – líquido.
- *Flujo Anular*: En flujo anular una película de líquido rodea un núcleo de gas que fluye a alta velocidad y el cual puede contener gotas de líquido donde ambas fases están íntimamente mezcladas. Cuando el flujo de gas es relativamente bajo, la mayoría del líquido fluye como una película en el fondo de la tubería, mientras ondas inestables de líquido fluyen alrededor de la tubería humedeciendo su periferia. Este patrón de flujo se conoce como flujo anular ondulado.
 - Anular (*Annular Flow*, **AN**): Éste se evidencia al manipular grandes caudales de gas. Usualmente se observan gotas de líquido desplazándose a través del centro gaseoso y, a consecuencia del efecto de la gravedad, la película del fondo de la tubería es generalmente más gruesa que la superior.
 - Anular Ondulado (*Wavy Annular Flow*, **AW**): En caudales más bajos de gas, la mayor parte del líquido fluye en el fondo del tubo, mientras ondas aireadas inestables son barridas alrededor de la periferia cubriendo la pared de tubo superior de vez en cuando. Este tipo de flujo se encuentra en el límite de transición de los flujos: Estratificado ondulado, Tapón y Anular. No es Estratificado Ondulado, porque, el líquido es barrido alrededor del tubo cubriendo la parte superior de este con una película delgada. Tampoco es Flujo Tapón porque el líquido no cubre la totalidad de la sección transversal del tubo. Por consiguiente, estas ondas aireadas o espumantes no son aceleradas a la velocidad del gas, pero se mueven más lentamente que la fase gaseosa.

- Flujo Burbuja dispersa (*Dispersed Bubbles*, **DB**): se observan pequeñas burbujas de gas esparcidas en la parte superior de la tubería. Una de las fases se encuentra dispersa con respecto a la otra. En este caso tenemos la fase de gas dispersa en líquido, es decir, se presenta distribuida en burbujas discretas dentro de la fase líquida continua. Normalmente existe mayor concentración de burbujas hacia la parte superior de la tubería que hacia la parte inferior debido al efecto gravitatorio.

- *Flujo Intermitente*: En este patrón tapones de líquido fluyen alternadamente a lo largo de la tubería seguidos por burbujas de gas que fluyen sobre una película de líquido. El flujo intermitente se subdivide en flujo tapón y flujo burbuja alargada. Cuando el flujo no presenta perturbaciones y no existen burbujas de gas en el tapón de líquido el patrón de flujo se denomina burbuja alargada. Para altas tasas de flujo cuando el tapón de líquido presenta burbujas de gas el patrón de flujo se denomina tapón.
 - Burbuja Elongada (*Elongated Bubble Flow*, **EB**): se caracteriza por presentar burbujas en forma de bala que tienden a moverse a lo largo de la parte superior de la tubería.
 - Flujo Tapón (*Slug Flow*, **SL**): en este régimen, se forman grandes burbujas de gas que son transportadas rápidamente a lo largo de la tubería, observándose, generalmente, cierta cantidad de líquido fluyendo bajo ellos. Dicho líquido es empujado hacia el tope de la tubería formando tapones de líquido entre los bolsillos de gas (Hewitt, 1978). Además, este patrón presenta un vórtice característico el cual se denomina zona de mezcla donde el gas se disuelve en el cuerpo del líquido.

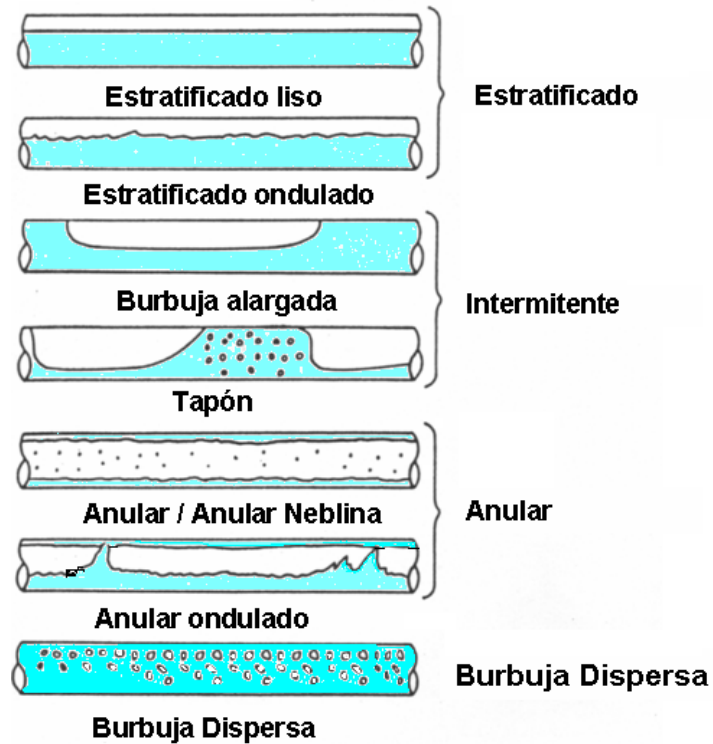


Figura 3. Patrones de flujo en tuberías horizontales. (Suarez y Toro, 2007)

En el modelo de flujo homogéneo, el flujo bifásico es supuesto como un fluido pseudo-homogéneo con una velocidad y propiedades físicas promedio de la mezcla. Otros tipos de modelado en el flujo bifásico para hallar la fracción volumétrica de líquido lo constituyen los modelos de correlación, los cuales generan relaciones de datos experimentales en función de grupos adimensionales que controlan los mecanismos del fenómeno en estudio. Entre estas correlaciones se encuentran:

Armand (1946), derivó una correlación simple para evaluar la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento para flujo bifásico en tuberías horizontales la cual es un caso especial del modelo teórico desarrollado por Nguyen y Spedding (1977 a y b) y es recomendada para flujo burbuja y flujo intermitente (Spedding y Chen, 1984).

En 1949 Lockhart y Martinelli proponen un modelo de flujo separado en el cual ellos suponen que cada fase fluye por separado, indistintamente de las condiciones de operación, por lo que cada configuración de flujo puede tener velocidades y propiedades físicas diferentes. Debido a esto, es analizada cada una de las fases utilizando las herramientas desarrolladas para flujo monofásico. Luego se propuso una correlación generalizada que relacionaba variables experimentales como el parámetro adimensional de presión y la fracción volumétrica, las cuales corresponden a la función del factor de Lockhart Martinelli X y la fracción del tubo ocupada por una fase, respectivamente.

$$X = \sqrt{\frac{\left(\frac{dp}{dl}\right)_{SL}}{\left(\frac{dp}{dl}\right)_{SG}}}; \frac{H_L}{H_G} = f(X) \quad (20)$$

Butterworth (1975), mostró que la correlación de Lockhart y Martinelli puede ser aproximada a:

$$\frac{H_L}{H_G} = 0,28X^{0,71} \quad (21)$$

Flanigan (1958), desarrolló una correlación para determinar la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento basada en datos de flujo de petróleo y de gas natural adquiridos en un campo de producción de crudo.

Hoogendoorn (1959), desarrolló una correlación para evaluar la fracción volumétrica de gas con deslizamiento H_G para flujo de aire-aceite en tuberías horizontales.

Hughmark (1962), correlacionó diversas bases de datos experimentales para obtener una relación funcional del factor K utilizado en la correlación de Bankoff (1960).

Baroczy (1963), presentó de manera gráfica un conjunto de curvas para evaluar la fracción de vacío de flujo bifásico en tuberías. Butterworth (1975) desarrolló una ecuación que presenta un excelente ajuste con las curvas de Baroczy para fracciones de vacío menores a 0.9

Nishino y Yamasaki (1963), presentaron un modelo simple para evaluar la fracción de vacío,

$$H_G = 1 - \sqrt{\frac{(1-x)\rho_G}{x\rho_L + (1+x)\rho_G}} \quad (22)$$

Thom (1964), correlacionó datos experimentales de la fracción de vacío agua – vapor. Butterworth (1975), mostró que esta correlación puede ser aproximada por:

$$\frac{H_L}{H_G} = \left(\frac{1-x}{x}\right) \left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.89} \left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right)^{0.18} \quad (23)$$

Eaton *et al.* (1967), desarrollaron una correlación para evaluar la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento H_L para flujo de aire y agua en tuberías de 1 y 2 pulg.

Beggs y Brill (1973), desarrollaron una correlación que permite determinar los patrones de flujo, la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento y el gradiente de presión en flujo bifásico aire-agua en tuberías de cualquier inclinación. El modelo fue desarrollado en base a 584 pruebas y solo tres regímenes de flujo fueron considerados: segregado, intermitente y distribuido, estos patrones de flujo fueron observados en tuberías horizontales. Este método posee la ventaja de calcular la fracción volumétrica de líquido como si la tubería fuera horizontal y luego, utilizando un factor de corrección por inclinación Ψ , se calcula para el ángulo de inclinación real.

Chen y Spedding (1981), desarrollaron una correlación para determinar la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento en flujo horizontal estratificado y anular basada en los estudios realizados por Lockhart y Martinelli (1949). Para flujo estratificado Chen y Spedding (1981) proponen utilizar la siguiente correlación:

$$\frac{H_L}{H_G} = \frac{X^{2/3}}{1 + X^{2/3}} \quad (24)$$

Posteriormente, Chen y Spedding (1983), realizaron un estudio teórico de la forma de la correlación propuesta por Butterworth (1975) para determinar la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento en flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías. Para flujo bifásico horizontal estratificado totalmente laminar o totalmente turbulento Chen y Spedding (1983) utilizaron la correlación propuesta por Butterworth (1975) en función de los caudales volumétricos de gas y de líquido en lugar de la fracción másica de gas.

Spedding y Chen (1984), analizaron el desempeño de las correlaciones desarrolladas por Chen y Spedding (1983) frente a una amplia base de datos experimentales de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento de flujo bifásico horizontal, inclinado y vertical ascendente.

Ma *et al.* (1991), desarrollaron dos métodos simplificados de medición de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento, uno el método de la impedancia mejorado, en el cual un circuito procesador de alta frecuencia es desarrollado para medir y amplificar los cambios de voltaje entre los electrodos. El segundo, el método de la presión diferencial, en el cual un transmisor comercial de presión diferencial es usado para determinar la presión estática de un flujo bifásico.

Abdul-Majeed (1996), realizó un estudio para simplificar y mejorar el modelo mecanicista desarrollado por Taitel y Dukler (1976) para estimar la fracción volumétrica de líquido de flujo bifásico en tuberías horizontales.

García *et al.* (2005), correlacionaron más de 2000 experimentos de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías con un amplio intervalo de condiciones de operación y propiedades de fluidos para generar correlaciones empíricas de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento.

Los *modelos mecanicistas*, por su parte, intentan modelar matemáticamente la física del fenómeno en estudio aplicando principios fundamentales, como el de conservación de la masa, de cantidad de movimiento lineal y de energía, a volúmenes de control que por lo general se consideran promedios espaciales y temporales de las propiedades y velocidades de los fluidos (Cravino y Pérez, 2007). Entre estos modelos se destacan los desarrollados por Xiao *et al.* (1990) y Gómez *et al.* (2000).

Xiao *et al.* en 1990, presentaron un modelo mecanicista en el cual realizaron un estudio extenso para flujo de gas-líquido en tuberías horizontales, el modelo era capaz de determinar el patrón de flujo y evaluar la fracción volumétrica de líquido y caída de presión para flujo estratificado, intermitente, anular o burbuja dispersa. Luego, trabajando con un banco de prueba cuyo fluido de trabajo era petróleo y gas, desarrollaron una base de datos, la misma fue comparada con los modelos más comúnmente usados para flujo bifásico, concluyéndose que el comportamiento del método propuesto por Xiao era más exacto que el de las correlaciones empleadas.

Gómez *et al.* (2000), desarrollaron un modelo mecanicista unificado para predecir el patrón de flujo, gradiente de presión y la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento en tuberías horizontales y verticales con flujo ascendente. El modelo propuesto incluye nuevos criterios que permiten obtener transiciones suaves entre los diferentes patrones de flujo eliminando el problema de las discontinuidades (García *et al.*, 2004).

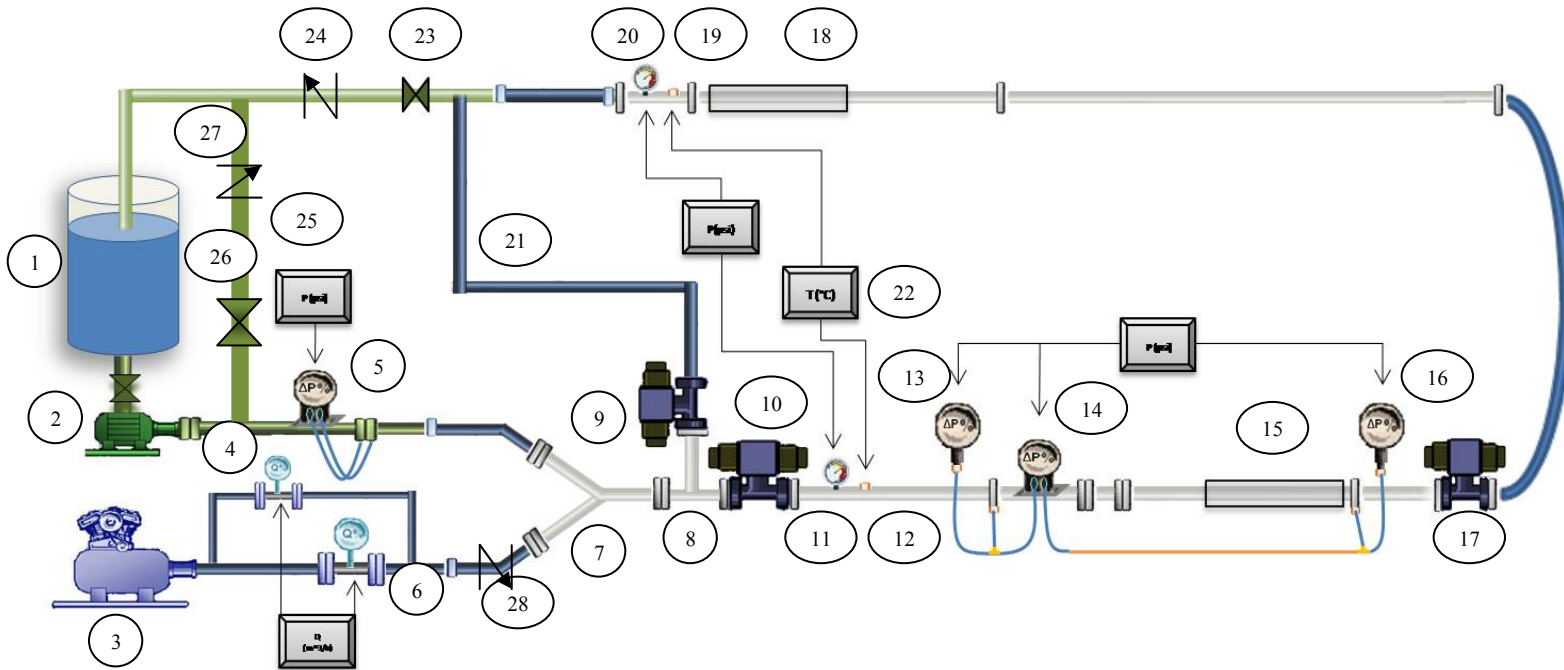
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE LÍQUIDO

3.1. CIRCUITO DE FLUJO BIFASICO

En este trabajo de grado, se utilizó el banco experimental construido por Tovar e Ibarra (2006), y adaptado por Haoulo (2007) para el estudio experimental de patrones de flujo bifásico gas-líquido en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas.

Para calcular la fracción volumétrica de líquido se realizó una serie de modificaciones necesarias al circuito experimental. Dichas modificaciones consistieron en la instalación de un sistema de retención de flujo. Este sistema está constituido por la *sección de desvío de flujo* y la *sección de visualización y prueba*, en la cual se realiza la toma de la altura de la fracción de líquido mediante la captura de imágenes.

En la Figura 4 se muestra un diagrama del circuito experimental de flujo bifásico ubicado en Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica.



- 1.- Tanque de Almacenamiento de Líquido.
- 2.- Bomba de Suministro de Líquido.
- 3.- Compresor de Suministro de Aire.
- 4.- Vórtex para Bajos Caudales.
- 5.- Medidor de Presión Diferencial de Placa Orificio.
- 6.- Vórtex para Altos Caudales.
- 7.- Zona de Mezcla.

- 8.- Sección de Desvío de Flujo.
- 9.- Válvula de Desvío.
- 10.- Válvula 1.
- 11.- Manómetro Analógico de presión inicial.
- 12.- Termocupla de temperatura inicial.
- 13.- Manómetro Digital de Presión Local 1.
- 14.- Manómetro Diferencial Digital.

- 15.- Zona de Visualización Horizontal y Ascenso.
- 16.- Manómetro Digital de Presión Local 2.
- 17.- Válvula 2.
- 18.- Zona de Visualización Descenso.
- 19.- Termocupla de temperatura final.
- 20.- Manómetro Analógico de presión final.
- 21.- Sección de desvío de flujo.

- 22.- Indicador de temperatura inicial y final.
- 23.- Válvula de Retorno.
- 24.- Válvula Unidireccional de flujo, sección de retorno
- 25.- Indicador de presión diferencial, Placa Orificio.
- 26.- válvula de retorno de líquido
- 27.- Válvula Unidireccional de flujo, retorno de liquido
- 28.- Válvula Unidireccional de flujo, suministro de gas

Figura 4. Descripción de los Elementos que conforman el Circuito de Flujo Bifásico

3.2. EL BANCO DE ENSAYOS

Para este Trabajo Especial de Grado, se utiliza el banco experimental de flujo bifásico construido por Tovar e Ibarra (2006), el cual está constituido por un conjunto de tuberías transparentes de acrílico de 0,0381 m (1½ pulg.) de diámetro, las cuales forman un circuito en forma de “U”. Tiene una longitud de 5,49 m, de los cuales 2,77 m forman la zona de prueba con una relación de longitud – diámetro (L/d) de 72, aproximadamente, en esta zona se instaló la *sección de visualización y prueba*. La zona de desarrollo tiene 2,37 m de longitud, con una relación L/d de 62, aproximadamente.

Este circuito descansa sobre una estructura metálica, que permite variar el ángulo de inclinación del conjunto de tuberías desde una posición horizontal hasta una vertical. Como el circuito tiene dos ramas paralelas de tuberías, una de ellas se utiliza para trabajar con flujo ascendente y la otra para flujo descendente. El suministro de las dos fases (líquida - gas) es realizado mediante una bomba centrífuga de 5,59 kW (7,5 HP) y dos compresores industriales ubicados en el galpón del Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica (Suárez y Toro, 2007).

Se instalaron 3 válvulas de bola de cierre rápido accionadas neumáticamente las cuales controlan el flujo de fluidos dependiendo de la modalidad de operación, esto con la finalidad de realizar la observación de la altura de líquido. Para la instalación de las válvulas del sistema de retención de flujo fue necesario hacer cambios en el tipo de juntas de tubería existentes, dichas modificaciones del sistema de unión tubería – manguera, tubería – tubería, tubería – válvula, manguera – válvula constan de un par de bridas enfrentadas a tope y acopladas entre sí con 4 tornillos de 0,0127 m (½ pulgada) para las juntas tubería – manguera, tubería – tubería y tornillos de 0,0159 m (5/8 pulgada) para las uniones tubería – válvula y manguera – válvula.

El sistema de unión manguera – válvula consta de una brida de aluminio conectada a la manguera de retorno mediante un niple combinado, como se muestra en la Figura 5.

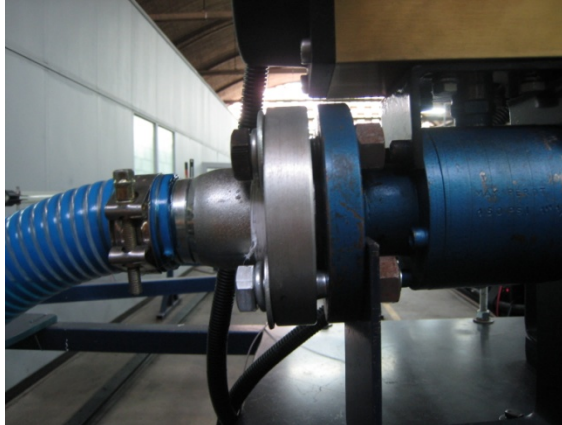


Figura 5. Se muestra un sistema de Unión Manguera – Válvula en el Banco Experimental.

Para el caso de la unión tubería – válvula el ensamble consta de una brida de acrílico pegada en el extremo de la tubería del mismo material. En el caso de la unión tubería – tubería es hecho similar al anterior, pero con ambas bridas de acrílico pegadas a cada extremo de tubería, un ejemplo de esto se encuentra en la unión del accesorio de desvío y la sección de mezcla respectivamente (Figura 6).

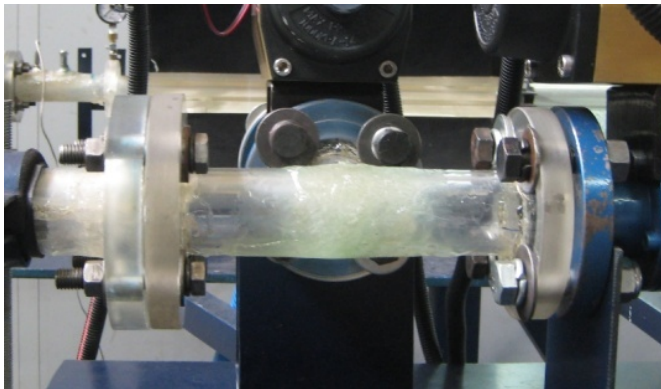


Figura 6. Ejemplo de Uniones empleadas en el Banco Experimental. A la derecha, se aprecia un sistema de Juntas Tubería – Válvula, a la izquierda un sistema de Juntas Tubería – Tubería.

La incorporación de este tipo de junta al circuito se realizó con la finalidad de lograr una mejor unión entre las mangueras tanto de agua como de aire con las tuberías, mejorando así las conexiones usadas en trabajos anteriores: abrazaderas convencionales, las cuales no soportaban las presiones máximas alcanzadas en el banco provocando fugas y separación de las mangueras con las tuberías.

3.3. ELEMENTOS DEL BANCO DE ENSAYO

3.3.1. SECCION DE DESVIO DE FLUJO

Esta sección permite el flujo continuo a través del sistema al momento de activar las válvulas de cierre para la visualización de la altura de líquido necesaria y posterior cálculo de la fracción volumétrica de líquido.

La sección de desvío consta de un accesorio tipo de “Tee” de 0.0381 m (1½ pulg.) hecho del mismo material de las tuberías del circuito de flujo bifásico para permitir observar el comportamiento del fluido que pasa a través de él y fue acoplada tanto a las válvulas 1 y de desvío como a la *Sección de Mezcla* por lo que se construyeron bridas siguiendo las dimensiones de la norma ASME B16.5a (1998).

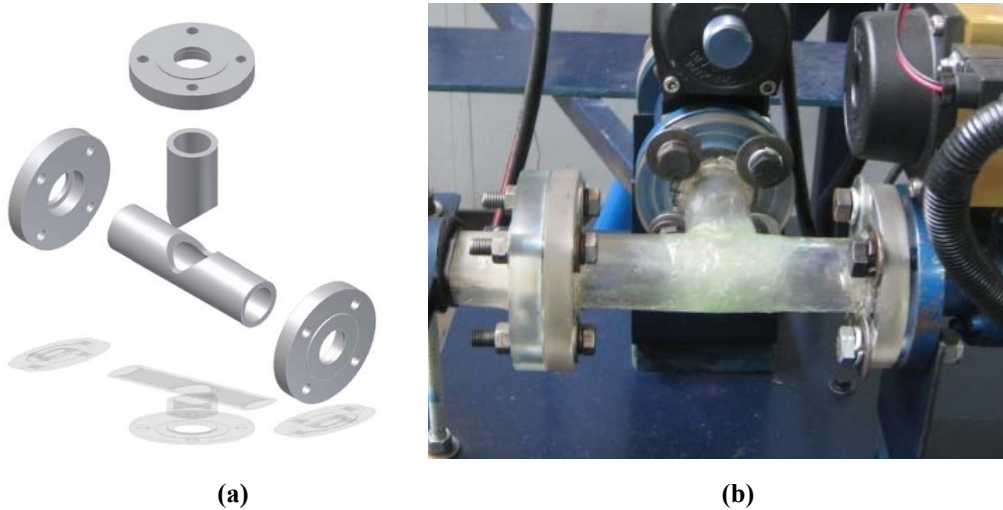
The image consists of two parts. Part (a) is a 3D CAD model showing an exploded view of a Tee fitting assembly. It includes a central Tee pipe, two flanges with four bolt holes each, and several gaskets. Part (b) is a photograph of the same Tee fitting installed in a laboratory setup. The Tee is connected to various pipes and valves, and a greenish liquid is visible flowing through it.

Figura 7. (a) Ensamble del Accesorio, (b) Accesorio tipo “T” instalado en el circuito de Flujo Bifásico.

27

En el mercado no existe un accesorio “T” fabricado en material acrílico, por lo que fue necesaria la construcción del mismo a partir de una sección continua de tubería, los cortes de las piezas y su ensamble se muestra en la Figura 7. La instalación fue realizada inmediatamente después de la sección de mezcla y direcciona el flujo hacia la válvula 1 que al estar abierta permite el flujo para el estudio de caída de presión y observación de patrones (Figura 8.a) ó hacia la válvula de desvío que al encontrarse abierta permite que el flujo retorne al tanque de descarga (Figura 8.b).

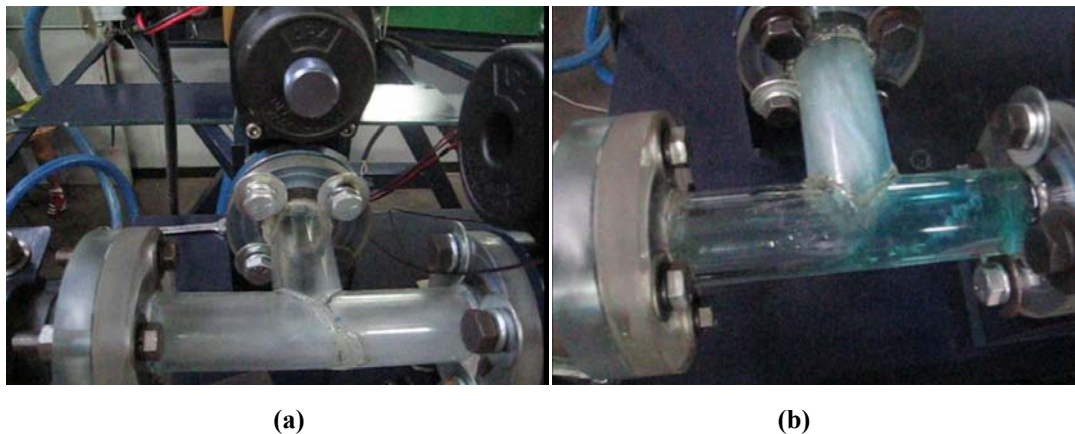


Figura 8. (a) Flujo a través del Accesorio tipo “T” en la modalidad de Operación, (b) Flujo a través del Accesorio tipo “T” en la modalidad de desvío.

Una vez acoplado el accesorio tipo “T”, se procede a la instalación de la manguera spiraflex de 0.0508 m (2 pulg.) a la válvula de desvío mediante el sistema de unión válvula – manguera, mientras que el otro extremo es conectado directamente a la zona de retorno. En la Figura 9 se muestra un esquema del sistema de desvío de flujo.

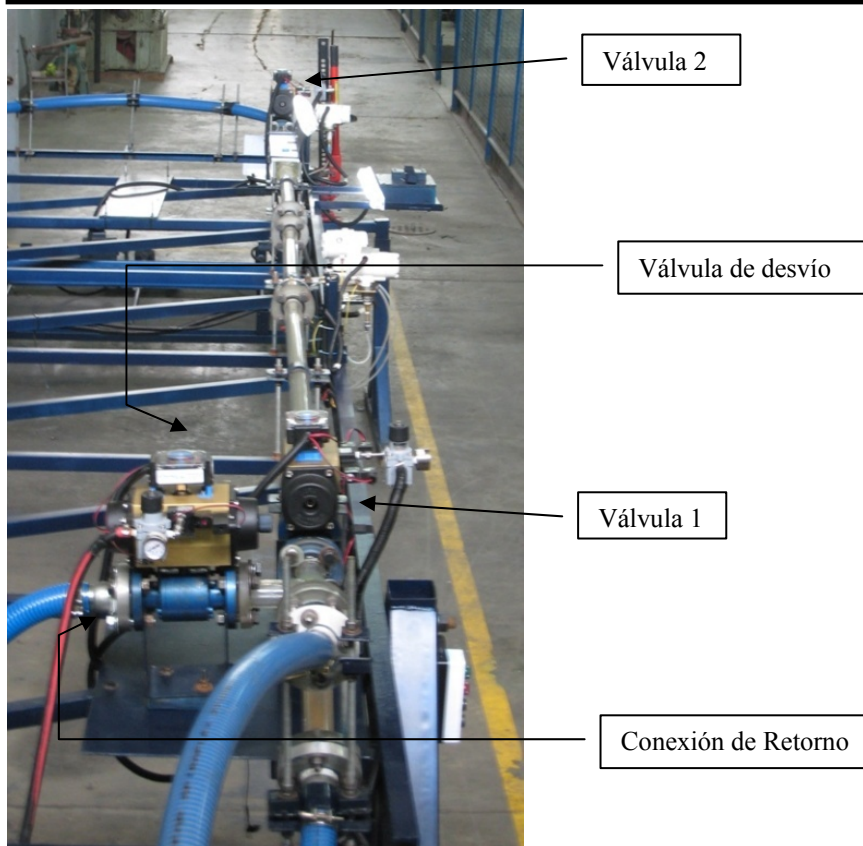


Figura 9. En la imagen se aprecia la disposición de las Válvulas de Cierre Rápido en el Circuito de Flujo Bifásico.

3.3.2. VALVULAS DE CIERRE RÁPIDO

Se utilizaron tres válvulas ANSI 150 material del cuerpo e internos de acero al carbono ASTM A105, tipo bola con un diámetro interno de 0.0381m (1½ pulg), estas soportan presiones de hasta 827,37 kPa (120 lb/pulg²).

Cada válvula es operada por un actuador neumático de doble acción marca *Remote Control (RCI)*, modelo RC440 D-A, falla en la última posición, y trabaja con un rango de presión de entre 206,84 y 979,05 kPa (30-142 lb/pulg²)

Incluyen los siguientes accesorios:

- Indicador de Posición marca Control Link, modelo CR012H – 2SPDT.
- Válvula solenoide 4 vías, marca VERSA, modelo CGG – 4232 – HC – D024, cuerpo en aluminio, 24 voltios.

- Filtro regulador de aire con Manómetro, marca *Masoneilan*, modelo 78 – 40, el cual trabajaba con rango de presión de 35-700 kPa (5 – 100 lb/pulg²) y un rango de temperatura de -40° – 83°C.

Todos estos componentes mencionados anteriormente fueron ensamblados como una unidad operativa. En la Figura 10 se muestran los diferentes componentes de las válvulas.

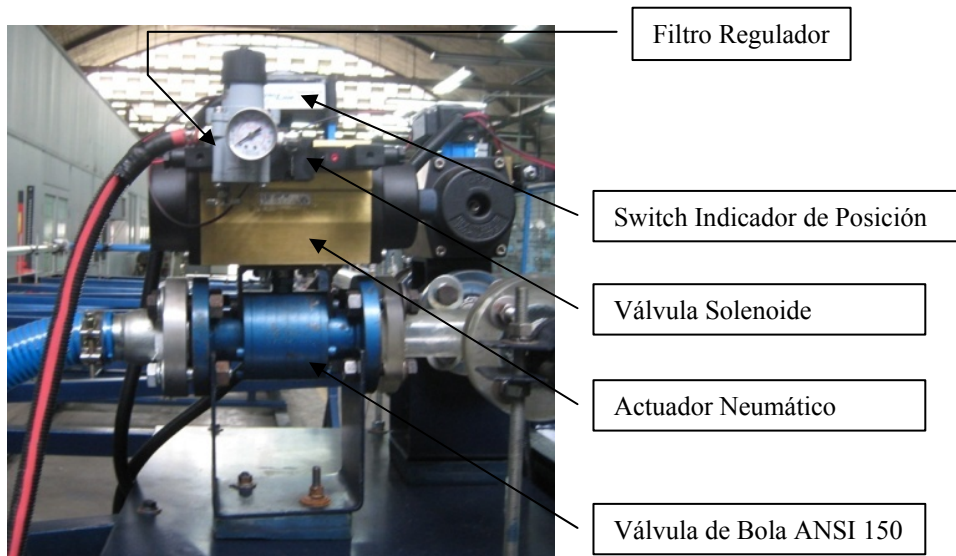


Figura 10. Unidad Operativa de la Válvula de Cierre Rápido con señalización de las partes.

3.3.2.1. INSTALACION DE LAS VALVULAS DE CIERRE RAPIDO

Para llevar a cabo la instalación de las tres válvulas de cierre rápido se procedió a la construcción de bases para cada una de las mismas, el material usado fue acero de 4,5 mm de espesor (Figura 11.a), dos de las válvulas (válvula 1 y de desvío) fueron colocadas sobre una lamina de acero al comienzo del circuito de 4,5 mm de espesor y 73 x 51 cm (Figura 11.b). La válvula 2 fue instalada al final de la zona de prueba ascendente sobre una lamina de acero de cuyas dimensiones son de 42 x 26 cm y 4,5 mm de espesor.

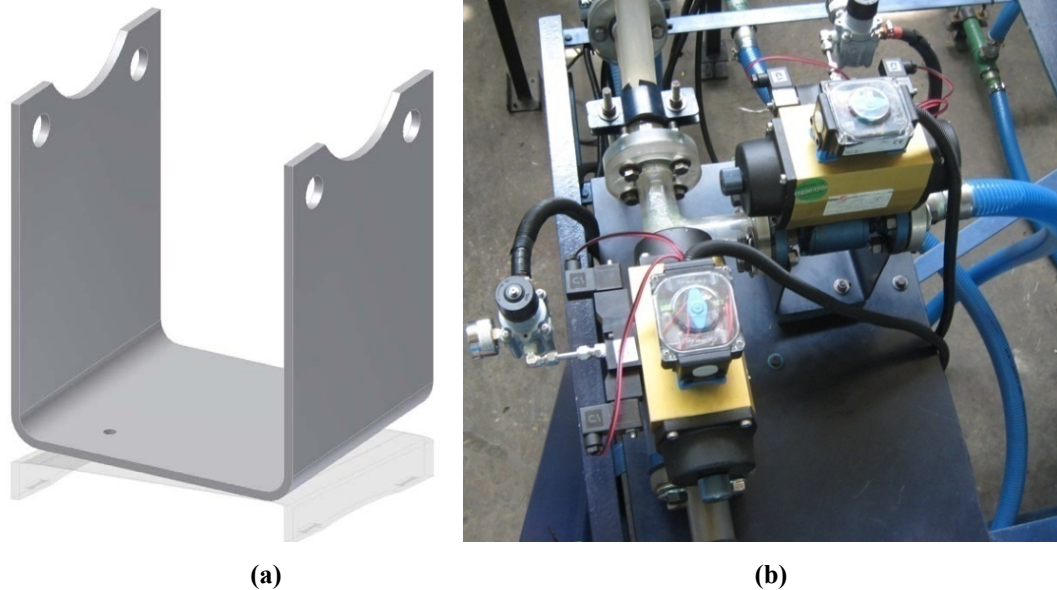


Figura 11. (a) Isometría de la base de válvulas, (b) Disposición de las válvulas 1 y de desvío en el circuito de flujo Bifásico.

3.3.2.2. *INSTALACION DEL PANEL DE CONTROL DE DESVIO FLUJO*

El control de apertura y cierre de las válvulas, viene dado por indicadores de posición, estos dispositivos están compuestos por interruptores de contacto seco, que dependiendo de la posición de la válvula de bola, envían la señal a la válvula solenoide permitiendo el paso del aire al actuador para así efectuar la ejecución de apertura o cierre deseada. La ejecución del movimiento de apertura y cierre, viene dado por un conjunto de controles manuales instalados en el apoyo “A” del banco experimental de flujo bifásico. La acción apertura – cierre de las válvulas de bola, se realizó de tal manera que fuese fácil de ejecutar por cualquier usuario del sistema; esto se debe al accesorio posicionador instalado por el fabricante, que permite con un solo pulsador accionar las tres válvulas. En la Tabla 1, se listan los componentes del sistema de Instrumentación y Control del Circuito de Flujo Bifásico. En la Figura 12, se muestra el diagrama de las conexiones eléctricas y neumáticas del banco experimental.

Tabla 1. Componentes del Sistema de Instrumentación y Control del Circuito de Flujo Bifásico

ELEMENTOS DE INSTRUMENTACION Y CONTROL CFB	
1. Lámpara Superior, zona de Visualización	2. Lámpara Inferior, zona de Visualización
3. Transformador 110 VCA – 8.4 VCD, Cámara de Video	4. Cámara de Video SONY® HDR-SR7
5. Interruptor manual ON – OFF	6. Transformador 110 VCA – 24VCD, Sistema de Instrumentación y Control Circuito de Flujo Bifásico
7. Pulsador de Seguridad ON – OFF	8. Pulsador de Apertura – Cierre de Válvulas de Cierre Rápido
9. Pantalla indicadora de presión manométrica 1	10. Medidor de presión de Membrana, presión manométrica 1
11. Pantalla indicadora de presión manométrica 2	12. Medidor de presión de Membrana, presión manométrica 2
13. Pantalla indicadora de presión diferencial CBF	14. Medidor de presión de Membrana, presión diferencial
15. Pantalla indicadora de Flujo Volumétrico de Gas	16. Medidor de Flujo tipo VORTEX, 1 pulg ó 2 pulg
17. Pantalla indicadora de presión diferencial, Placa Orificio	18. Placa Orificio, ½ pulg, ¾ pulg, 1 pulg
19. Interruptor 2 vías, Válvula de desvío	20. Válvula Solenoide, Válvula de Desvío de Flujo
21. Actuador Neumático, Válvula de Desvío de Flujo	22. Interruptor 2 vías, Válvula 2
23. Válvula Solenoide 2	24. Actuador Neumático, Válvula 2
25. Interruptor 2 vías, Válvula 1	26. Válvula Solenoide 1
27. Actuador Neumático, Válvula 1	28. Interruptor 2 vías, Indicador de Posición de Válvulas
29. Luz Roja, Operación de desvío, Holdup	30. Luz Verde, Operación Circulación FB, caída de Presión

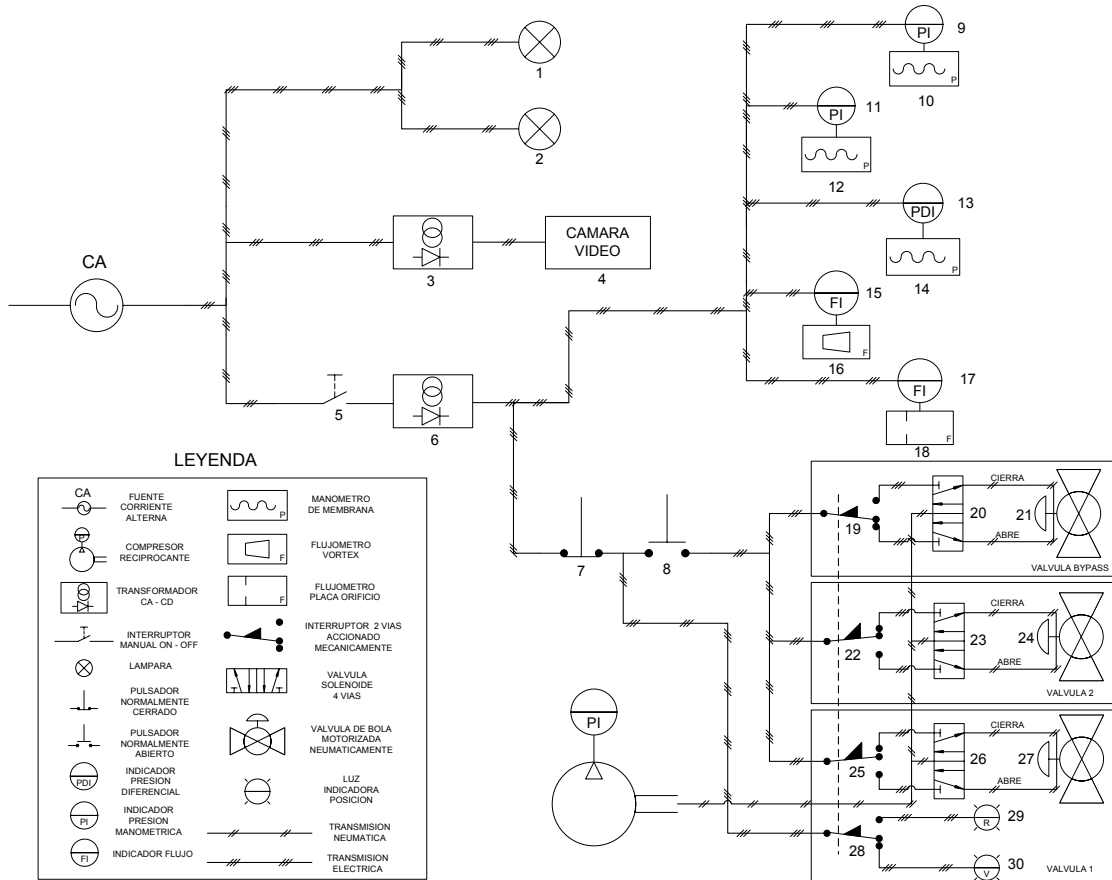


Figura 12. Diagrama de la conexiones eléctricas y Neumáticas del Banco Experimental.

El sistema de control manual se encuentra alojado en una botonera instalada en el apoyo “A” del banco experimental de Flujo Bifásico. En esta botonera se encuentran las partes: (7), (8), (29), (30) mencionadas en la Tabla 1 y se muestran en la figura 13.

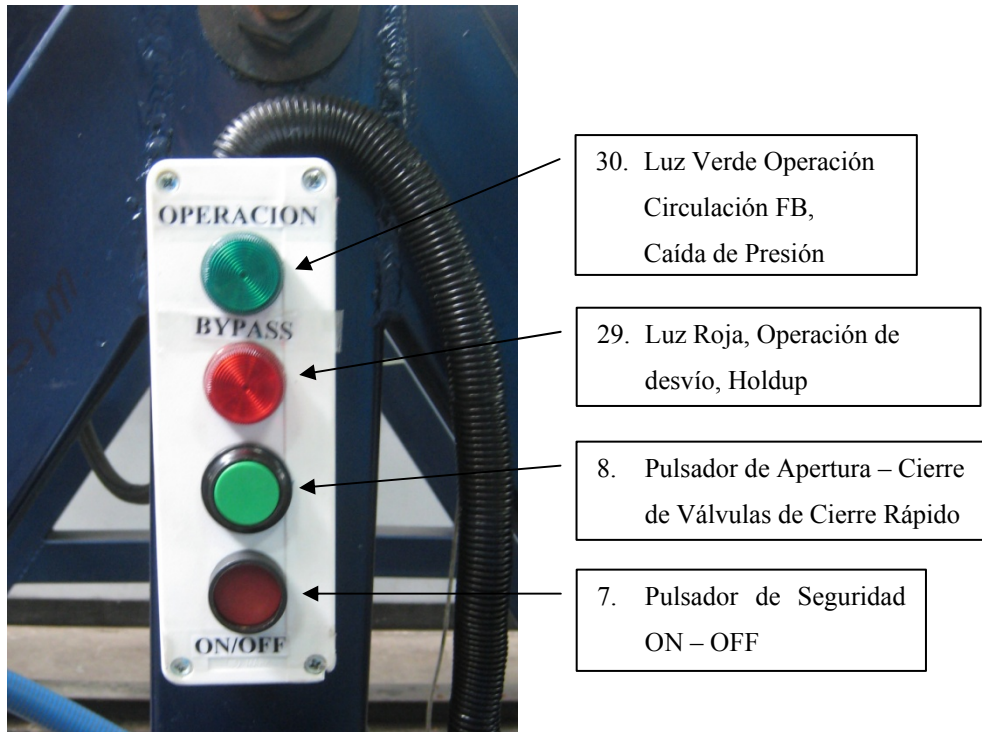


Figura 13. Botonera de Control del Sistema de Apertura – Cierre de Válvulas de Bola.

3.3.3. SISTEMA DE SUMINISTRO DE FLUIDOS DE OPERACIÓN (AGUA – AIRE)

Para el suministro de los fluidos se usaron los sistemas descritos en el trabajo de grado de (Toro y Suarez, 2007) el cual consiste de dos compresores recíprocos industriales, uno ubicado en el galpón de máquinas térmicas de la escuela de Ingeniería Mecánica y consta de un motor de 11,2 kW (15 HP) de potencia, con capacidad de 1378,96 kPa (200 lb/pulg²) de presión, pero por seguridad solo trabaja hasta 827,37 kPa (120 lb/pulg²) (Figura 14.a). El segundo compresor está ubicado en la sala de calderas y cuenta con un motor eléctrico trifásico de 14,9 kW (20 HP) de

potencia, con capacidad de 1378,96 kPa (200 lb/pulg²) de presión el cual también por seguridad solo opera a 1034,22 kPa (150 lb/pulg²) (Figura 14.b). Para el suministro de Líquido se tiene una bomba centrífuga de 5,59 kW (7,5 HP) que puede manejar un caudal de 0,00505 m³/s (80 GPM) a una presión de 414 kPa (80 lb/pulg²) (Figura 15).



(a)

(b)

Figura 14. (a) Compresor Reciprocante ubicado en la sala de Calderas. (b) Compresor Reciprocante ubicado en el Galpón de Máquinas Térmicas FIUCV. (Suarez y Toro, 2007).



Figura 15. Bomba de Suministro de Líquido del Banco experimental de Flujo Bifásico.

3.3.3.1. ZONA DE MEZCLA

La mezcla de ambas fases se lleva a cabo mediante la unión “Y” realizada en el mismo material acrílico transparente de 0,0381 m (1½ pulg) de diámetro. El suministro de aire se realiza por la parte superior mientras que el del agua se realiza por la parte inferior con la finalidad de promover la estratificación de las fases. Celaya y Fuentes (2008), diseñaron los acoples rígidos (bridas) entre las mangueras flexibles y las tuberías de acrílico con el fin de ampliar el rango de operación del banco. En la figura 16, se muestra la *sección de mezcla*.

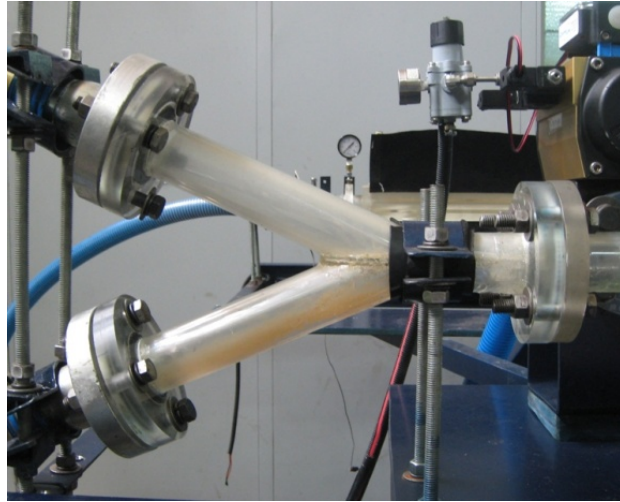


Figura 16. Sección de Mezcla, Circuito de Flujo Bifásico.

3.3.4. ELEMENTOS DE MEDICIÓN

3.3.4.1. SUMINISTRO DE AGUA

La medición del Caudal de agua se realiza mediante un juego de placas orificio, conectados a un medidor de presión diferencial digital marca ABB con un intervalo de 2,5 – 250 kPa y una precisión de ± 10 kPa. En la figura 17 se presentan las curvas de calibración de las placas orificio (Cela y Fuentes, 2008).

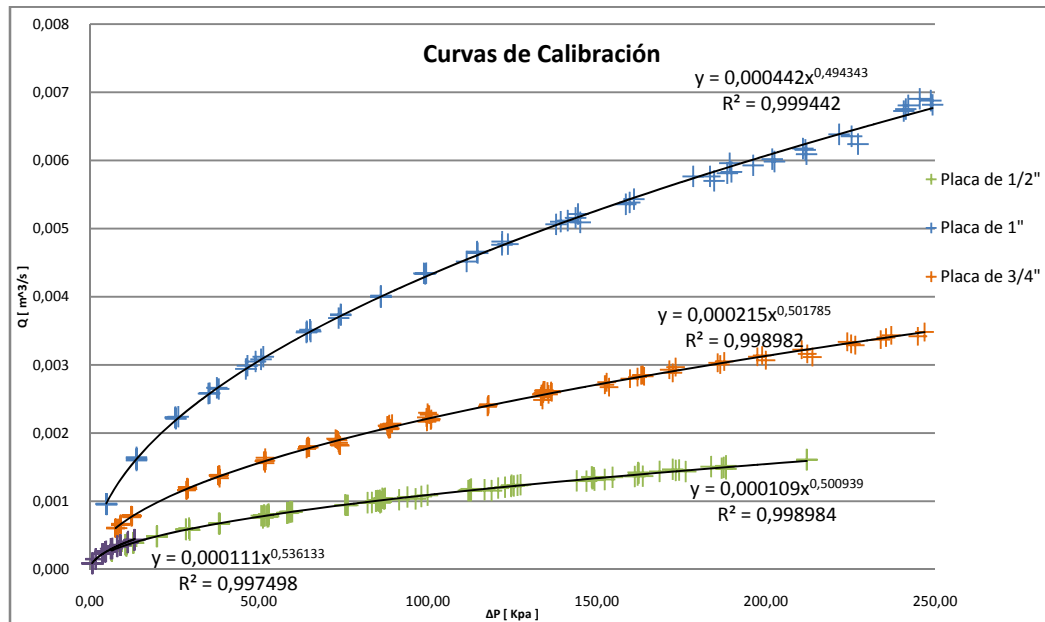
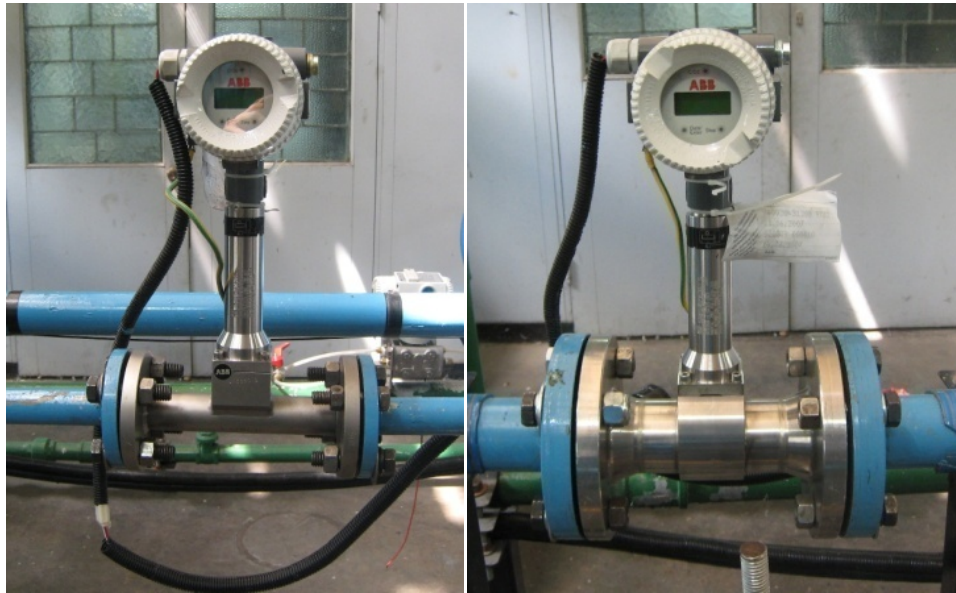


Figura 17. Curvas de Calibración de Placas Orificio del Sistema de Medición de Suministro de Líquido. (Cela y Fuentes 2008)

3.3.4.2. *SUMINISTRO DE AIRE*

La medición del caudal de aire se realiza mediante fluxómetros de gas tipo Vórtex marca ABB. Para altos caudales de gas se utilizó un equipo para medir en la línea de suministro de aire de 50,08 mm (2 pulg.) en un intervalo de medición de 40 a 500 m³/h con una precisión de ± 5 m³/h, como se muestra en la Figura 18.a. En el caso de bajos caudales de aire se empleo un equipo para la medición en la línea de 25,4 mm (1 pulg) con un intervalo de medición de 12 a 82 m³/h con una precisión de $\pm 0,82$ m³/h (Figura 18.b).



(a)

(b)

Figura 18. (a) Vórtex de Medición de Bajos Caudales de Aire. (b) Vórtex de Medición de Altos Caudales de Aire.

3.3.5. COMPONENTES PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES

3.3.5.1. CAJA DE VISUALIZACIÓN

El reflejo de la luz en la superficie circular de la tubería de acrílico, influye de manera negativa en la captura de los imágenes de los patrones de flujo (Figura 19.a); una solución a este problema fue la construcción de una caja rectangular que rodea a la tubería de acrílico llena de glicerina, la cual es llamada caja de visualización (Haoulo, 2007). En la Figura 19.b se muestra el reflejo de la luz sobre la caja de visualización.

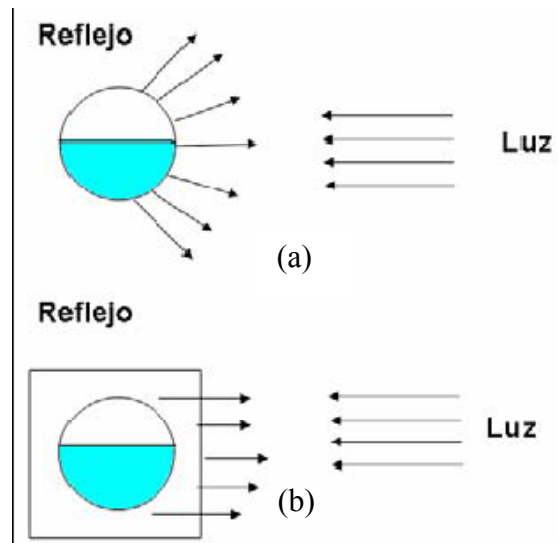


Figura 19. (a) Reflejo de la luz sobre la tubería. (b) Reflejo de la luz sobre la caja. (Haoulo, 2007)

La caja de Visualización construida como parte de los trabajos de Toro y Suarez (2007) y Haoulo (2007), anteriormente estaba cubierta en sus paredes superior, inferior y posterior con una cartulina de color blanco que servía como filtro para dirigir la luz emitida y dos paneles de color negro en la parte frontal para aumentar el contraste entre el entorno y la zona de muestra, pero el efecto obtenido en las imágenes registradas no poseía la calidad visual requerida. Es por esto, que se colocaron unos filtros de anime comprimido recubiertos por cartulina blanca en la pared superior e inferior y se cambiaron por unos nuevos los paneles de color negro

de la parte frontal de la caja de visualización para mejorar el reflejo de luz y la calidad de la imagen, ver Figura 20.



Figura 20. Colocación de anime comprimido en las paredes superior, inferior y posterior de la caja de Visualización.

3.3.5.2. *SISTEMA DE ILUMINACIÓN*

El banco de pruebas está ubicado en el galpón de máquinas térmicas de la escuela de Ingeniería Mecánica, el cual no cuenta con un sistema de iluminación adecuada para la obtención tanto de fotos como videos necesarios para este trabajo, por lo que fue necesario realizar cambios en el circuito de flujo bifásico tanto a la iluminación como cambios al mismo fluido, en este caso agua. Con respecto a la iluminación se consultó a un especialista en iluminación de fotografía. Este recomendó la utilización de luz blanca, además, del montaje de las lámparas con la finalidad de mejorar el contraste entre las fases y la definición del diámetro interno. En este sentido, se colocaron dos bombillos fluorescentes de 17W ubicados como se muestran en la Figura 21.

El líquido por su naturaleza incolora tiene un pobre contraste que no permite realizar capturas fotográficas aptas debido a las condiciones del entorno donde está ubicado el banco de pruebas. Una solución a éste problema consistió en tinter el agua con 50 ml de colorante artificial azul en los 520 l de capacidad del tanque principal (0.0096% v/v o 96 ppmv), pudiendo de esta manera visualizar claramente la interfaz de los fluidos, (Cela y Fuentes, 2008).

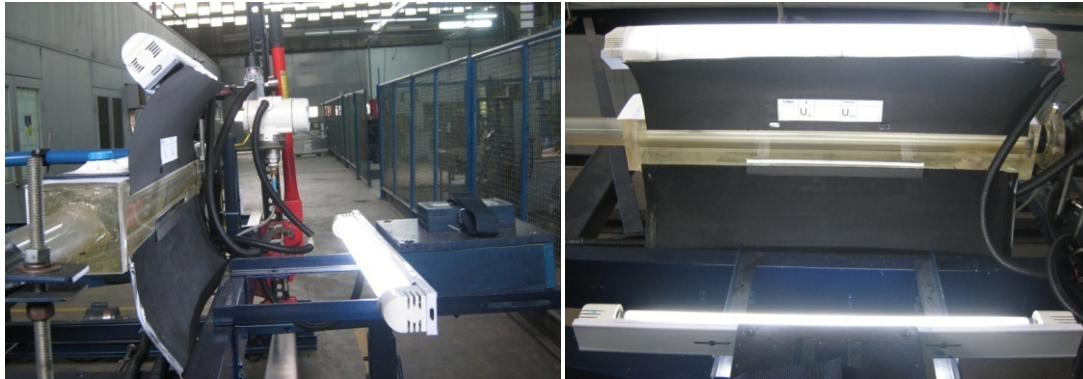


Figura 21. Vista Lateral y Frontal con la Disposición de la Iluminación de la Zona de Visualización del Circuito de Flujo Bifásico.

3.3.5.3. CÁMARA DE VIDEO

Para la toma de imágenes se usó una cámara SONY® handycam de alta definición (Full HD 1080) modelo HDR-SR7 con una memoria interna de 60 GB, con una velocidad de filmación de 30 Fotogramas por segundo y una resolución para videos de 3.2 Megapíxeles y para fotografía de hasta 6.1 Megapíxeles. Esta cámara fue colocada sobre una plataforma fija a la estructura del banco y alineada con la caja de visualización, como se muestra en la Figura 22.



Figura 22. (a) Cámara de Video HD. (b) Montaje de la Cámara de Video en la Plataforma de Toma de Imágenes y Videos.

3.4. SINTESIS DE LAS MODIFICACIONES REALIZADAS AL BANCO EXPERIMENTAL

En flujo bifásico las velocidades de las fases generalmente no son iguales por lo que la determinación de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento es un parámetro a determinar. En este sentido, el banco de ensayos se acondicionó con 3 válvulas de cierre rápido dispuestas de manera que, al cerrar dos de ellas (instaladas en la *sección de visualización y prueba*) se pueda observar la fracción volumétrica de líquido dentro de la tubería. Para realizar la medición de la fracción volumétrica de líquido, el flujo suministrado por la sección de mezcla es desviado mediante la instalación de un accesorio en forma de "T" ubicado entre la sección de mezcla, la válvula 1 y la válvula de desvío; luego de la válvula de desvío se conecta con una manguera flexible la cual direcciona el flujo al final del circuito de regreso al tanque principal. Se muestra en la figura 23 un esquema de lo mencionado anteriormente.

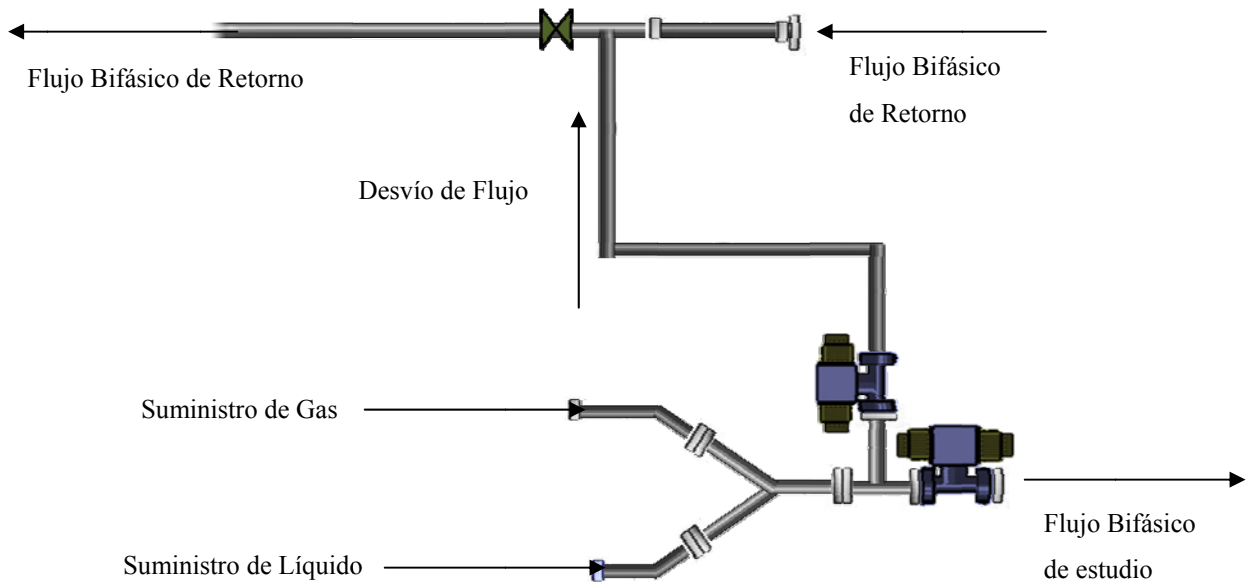


Figura 23. Esquema del sistema de desvío de flujo bifásico existente en el banco experimental.

El sistema de unión entre la sección de mezcla, la sección de retorno y la válvula se realizó mediante el ensamble de bridas; por lo que se obtuvo un aumento en el rango de funcionamiento del Circuito de Flujo Bifásico. En la tabla 3 se presentan las características operacionales para flujo monofásico del Banco experimental luego de realizados los cambios o mejoras.

Tabla 2. Parámetros Dimensionales del Banco Experimental de Flujo Bifásico

<i>Características de Operación y Dimensiones del Circuito Experimental de Flujo Bifásico</i>	
Fase Líquida	Agua
Fase Gaseosa	Aire
Flujo Volumétrico de Líquido Máximo Reportado	0,00379 m ³ /s
Flujo Volumétrico de Líquido Mínimo Reportado	0,000090 m ³ /s
Flujo Volumétrico de Gas Máximo Reportado	0,0486 m ³ /s
Flujo Volumétrico de Gas Mínimo Reportado	0,0033 m ³ /s
Rango de Velocidades Superficiales de Líquido	0,079 – 3,324 m/s
Rango de Velocidades Superficiales de Gas	2,895 – 42,628 m/s
Tipo de Flujo	Horizontal, Ascendente y Descendente (-90° – +90°)
Presión Máxima de Operación	413,69 kPa 60 (lb/pulg ²)
Temperatura Máxima de Operación	60° C

CAPÍTULO IV: ENSAYOS EXPERIMENTALES

4.1. CÁLCULO DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE LÍQUIDO CON DESLIZAMIENTO “LIQUID HOLDUP”

Una vez hechas cada una de las modificaciones del banco de ensayo, se realizan los ensayos experimentales.

Al momento de comenzar cualquier recolección de datos experimentales, es necesario revisar y purgar los dos equipos de suministro de aire, esto debido al condensado formado en el fondo del tanque de almacenamiento, para así evitar el arrastre de líquido en las líneas de gas. Este líquido asociado, altera los ensayos a realizar, ocasiona daños en los equipos de medición y tuberías de acrílico ya que este condensado contiene un alto contenido de partículas abrasivas (incrustaciones y óxido férrico) producto del envejecimiento de los tubos. Este proceso se realiza todos los días al encender el compresor y al menos tres veces al día.

Posterior a la revisión de los equipos de suministro tanto de gas como de líquido se procede a la instalación de la instrumentación de medición de flujo, el medidor de flujo volumétrico de gas (VORTEX) tanto para la tubería de suministro de aire de 0.0254 m (1 pulg.) como para la de 0.0508 m (2 pulg.) de diámetro, dependiendo del caudal de gas a usar; el medidor de flujo volumétrico de líquido (Placa Orificio) que dependiendo del caudal a manejar en el banco se colocaba una de las tres placas disponibles.

Culminado este paso se procede a energizar el Banco Experimental, verificando el correcto funcionamiento de cada uno de los equipos; una vez que la presión en los compresores llegaba a su máxima carga, se abre la válvula de suministro de aire para las válvulas neumáticas, verificando en el regulador de presión un valor de 275,79 (40 lb/pulg²). Es muy importante realizar esta revisión antes de cada activación del sistema de desvío de flujo para evitar el mal funcionamiento de alguna de las válvulas, ya que si no se tiene la presión adecuada no podrían activarse de manera simultánea, perdiendo el arreglo.

Seguidamente se enciende la bomba asegurándose que la válvula de suministro y la válvula de desvío estén cerradas y que la válvula de retorno del banco esté totalmente abierta. El manejo de las válvulas para proporcionar una cantidad de flujo volumétrico de gas y de líquido se determinó siguiendo la matriz experimental desarrollada por Cela y Fuentes (2008). La matriz experimental de flujo bifásico se divide en cuatro zonas, su trazado es función de los equipos de medición de caudal y depende del intervalo de medición de cada uno. En la Figura 24 se muestra de manera más clara la división de la matriz experimental.

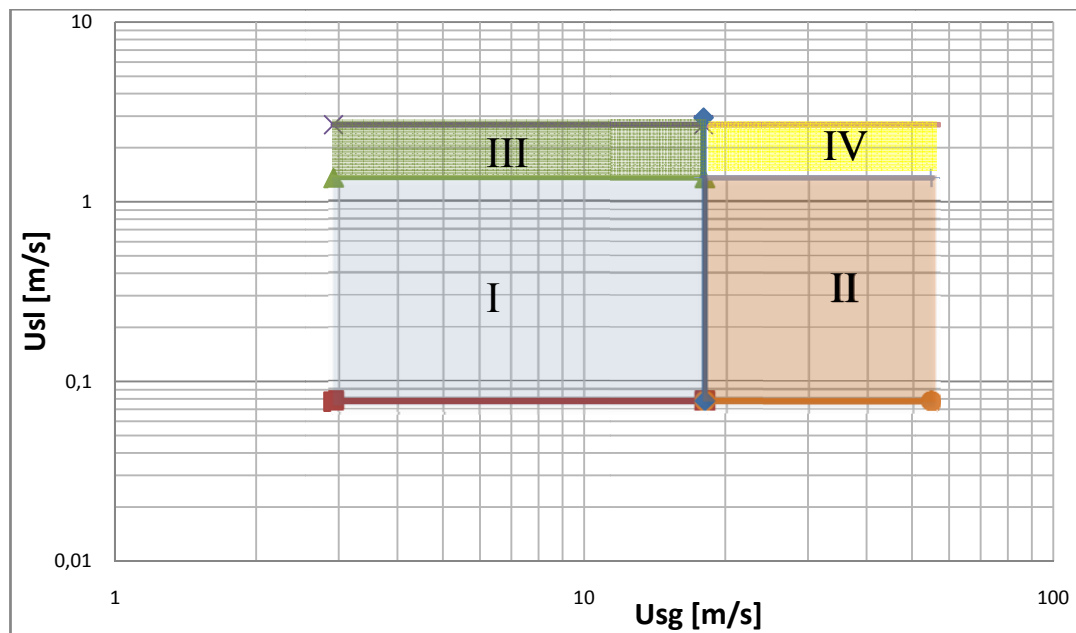


Figura 24. Zonas de trazado del mapa de patrones de flujo (Cela y Fuentes, 2008).

El trazado de las cuatro zonas del mapa experimental consiste en mantener líneas horizontales de caudal de líquido constante y aumentando de forma gradual el caudal de gas, para cubrir todo el rango de velocidades superficiales de cada fase y tener una mejor condición de operación en las pruebas. En el primer cuadrante, se emplea la placa orificio de menor diámetro interno 0,0127 m ($\frac{1}{2}$ pulgada) y el medidor de flujo volumétrico, Vórtex de 0,0254 m (1 pulgada) necesario para bajos caudales de aire. Luego en el segundo cuadrante, se emplea el medidor volumétrico de altos caudales Vórtex de 0,0508 m (2 pulgadas) y se mantiene la misma placa orificio 0,0127 m ($\frac{1}{2}$ pulgada) utilizada en el primer cuadrante. En el tercer cuadrante, donde se manejan altos caudales de agua se utiliza la placa orificio de 0,019 m ($\frac{3}{4}$ pulgada) de diámetro y el medidor de flujo volumétrico de 0,0254 m (1 pulgada). De manera similar, en el cuarto cuadrante se hace uso del medidor de flujo volumétrico de 0,0508 m (2 pulgadas) y se mantiene la placa orificio de 0,019 m ($\frac{3}{4}$ pulgada) de diámetro utilizada en el tercer cuadrante. (Cela y Fuentes, 2008).

Una vez determinadas las velocidades de gas y líquido a fijar en los medidores se procede a realizar los ensayos experimentales, iniciando estos con la apertura de las válvulas de suministro. Al alcanzar dichos valores se espera un tiempo prudencial para que se estabilice la lectura de los instrumentos de medición, aprovechando este tiempo para la filmación del patrón de flujo. Al lograr que se estabilice la condición de operación se reportan los valores exactos de porcentaje tanto de agua como de aire observados en el indicador, seguidamente se calculan las velocidades en la hoja de datos experimental dependiendo del tipo de aparato e intervalo de medición y se anotan en un acrílico transparente el cual se coloca en la zona de visualización; este mostraba para cada filmación las velocidades de las fases, número de toma, fecha y ángulo de inclinación. Al tener los valores mencionados y una filmación del patrón se activa el panel de desvío de flujo reteniendo así el flujo de fluidos entre las válvulas 1 y 2, inmediatamente se cierra la válvula de suministro de aire esto para disminuir el impacto sobre la manguera de retorno permitiendo también la carga de los compresores; sin cerrar la válvula de suministro de líquido. Una vez asentado el agua se procede a tomar la fotografía de la altura de líquido.

Tomada la imagen se activa el control apertura y cierre de válvulas cambiando a la condición de operación. Es de suma importancia acotar que para los casos en los cuales la presión estática acumulada en la zona de prueba al momento de efectuar la toma de altura de líquido sobrepasa los 137,9 kPa (20 lb/pulg²) el impacto recibido por el accesorio de desvío de flujo y la sección de mezcla debido a la liberación de presión es considerable. Para contrarrestar esto se abre el suministro de aire hasta más o menos igualar la presión acumulada en la zona con la retención de líquido

La medición de la fracción volumétrica de líquido se realiza de manera indirecta, el método empleado fue el de medir el nivel de líquido y por medio de relaciones geométricas obtener el parámetro de estudio. Este método consiste en fotografiar cada una de las pruebas realizadas para posteriormente determinar la altura de líquido, ya que este parámetro es fundamental en los cálculos subsiguientes, a continuación se muestra el proceso de medición de la fracción volumétrica de líquido.

4.2. MEDICIÓN DE LA ALTURA DE LÍQUIDO

Como primer paso se tiene la captura de la imagen y posterior clasificación según el número de toma. En la figura 24 se muestra un ejemplo de una fotografía sin realizar la medición de la altura de líquido.

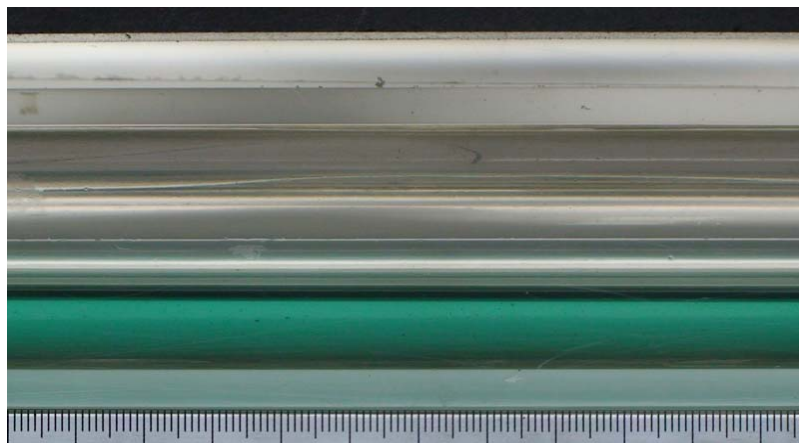


Figura 25. Imagen sin procesar tomada en el momento del experimento

Seguidamente para la medición de la altura de líquido, debido a la naturaleza de la *Sección de Visualización*, se tiene poca precisión si esta se realiza de manera directa sobre la caja de visualización empleando algún instrumento de uso común, como por ejemplo una regla calibrada. Como solución a esto, se emplea una herramienta digital de procesamiento de imágenes: MediaCybernetics® Image-Pro Plus 6.0, la cual cuenta con una interfaz ó módulo de calibración, en otras palabras, conociendo una medida en el entorno de la imagen, se puede interpolar o extrapolar ésta para dar el valor de otras distancias desconocidas. El valor de altura se obtiene de la siguiente manera:

- Se carga la imagen a medir, como se muestra en la Figura 26:

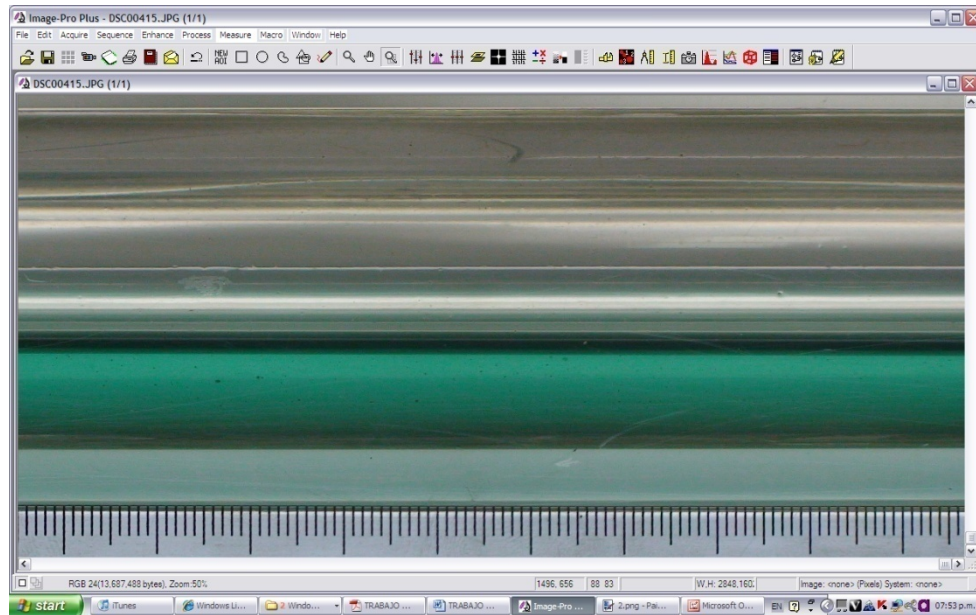


Figura 26. Carga de la Fotografía al software de procesamiento.

- Se llama al módulo de calibración y conociendo una medida específica, para este caso, el diámetro interno de la tubería cuyo valor es 0,0381 m, se define en la imagen los límites de este diámetro y se le asigna su valor (Figura 27).

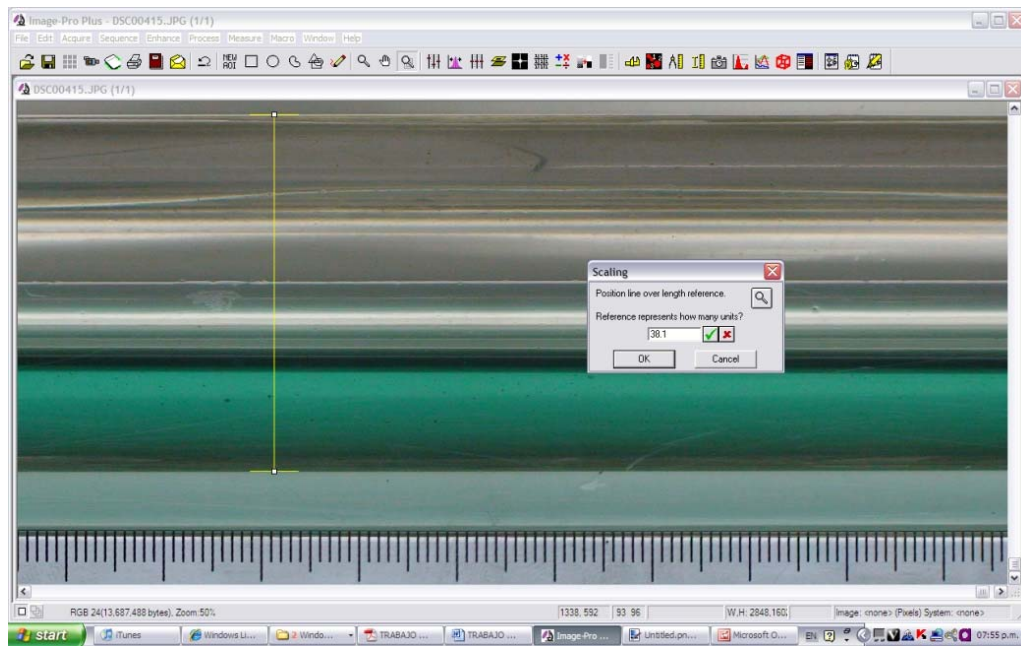


Figura 27. Calibración de la Imagen.

- Una vez asignado el valor de calibración a la imagen, se verifica la escala con la regla que aparece en la fotografía como se muestra en la Figura 28.

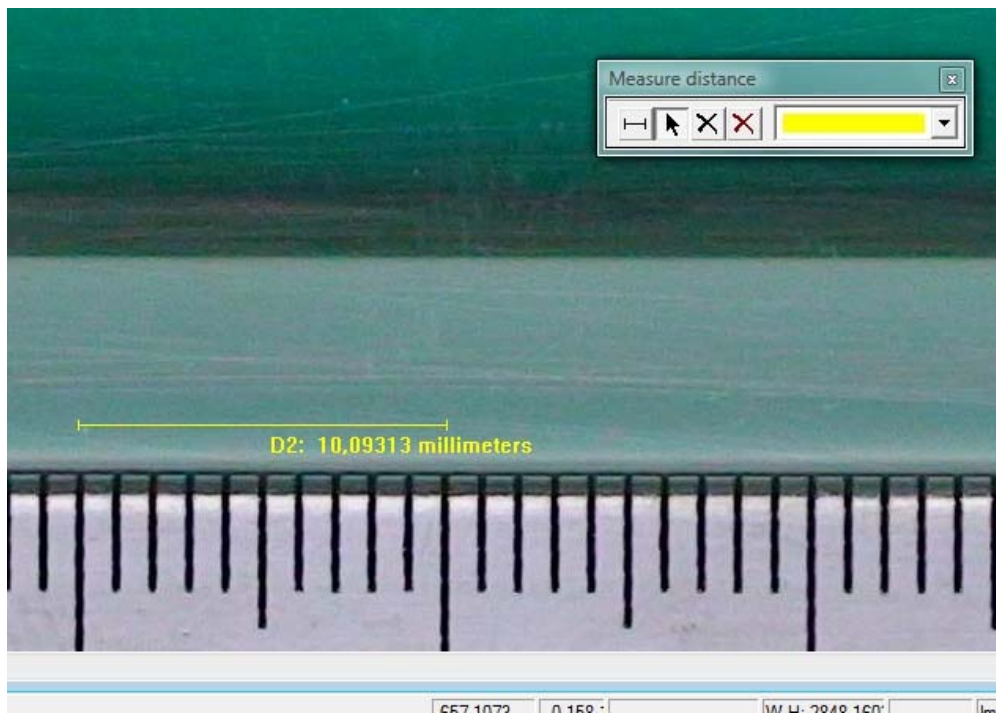


Figura 28. Verificación de la calibración de la imagen para la posterior medición de la altura de líquido.

- Calibrada la imagen con su respectiva verificación, el siguiente paso es determinar la altura del líquido como se muestra en la Figura 29. Esta se toma desde el límite del diámetro interno inferior hasta la parte inferior del menisco y luego desde el mismo límite interno hasta la parte superior del menisco, esto para conseguir un valor promedio y calcular el error asociado a esta medición.

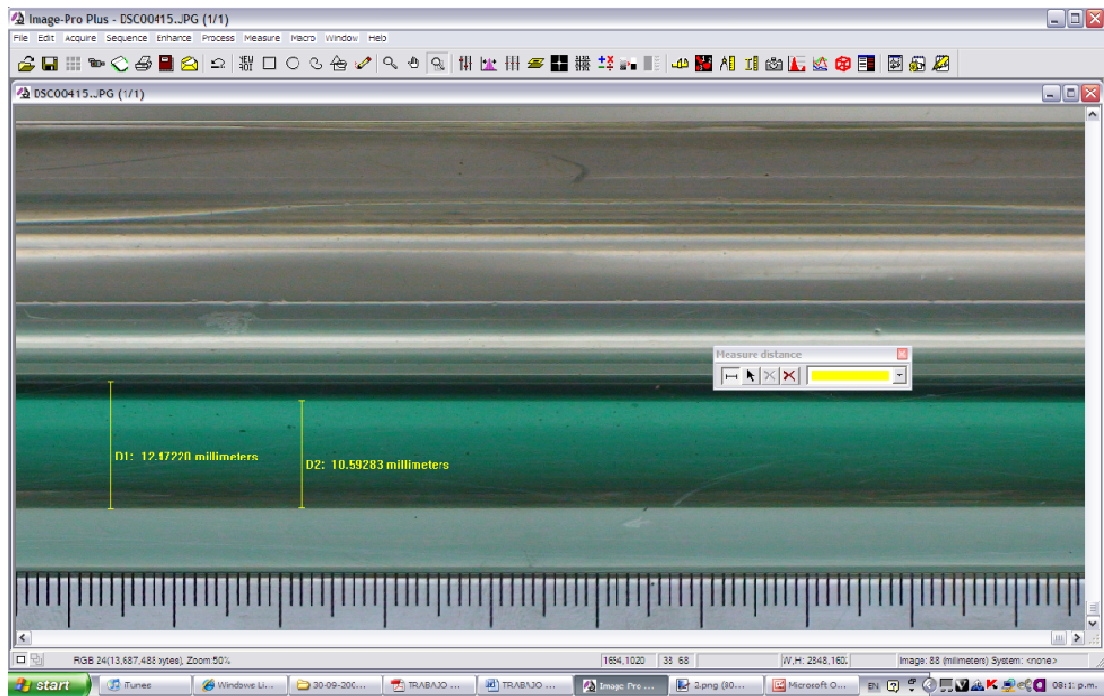


Figura 29. Medición de las alturas máximas y mínimas respecto al menisco.

- Obtenidos los valores de altura se introducen a la hoja de cálculo previamente programada con la ecuación del área de sección transversal ocupada por la fase líquida. Esta ecuación viene dada por la siguiente relación mostrada en la Figura 30:

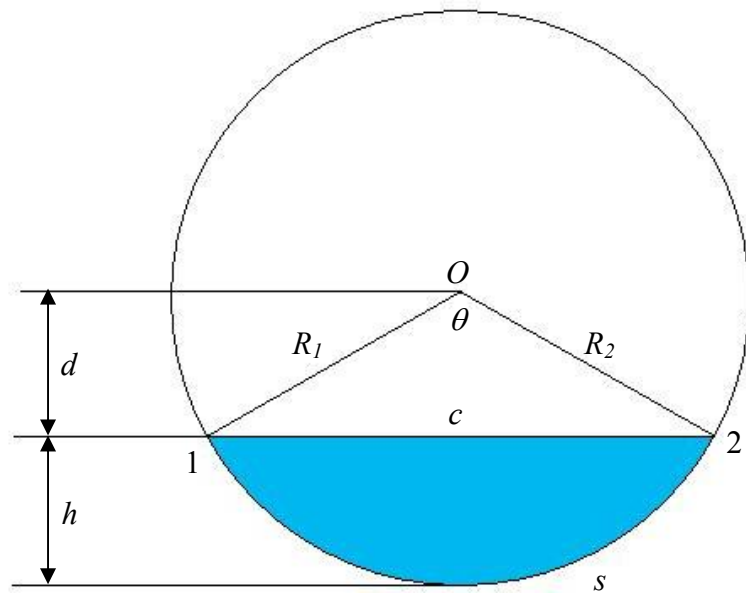


Figura 30. Esquema de la sección transversal de tubería,
(<http://mathworld.wolfram.com/CircularSegment.html>)

Siendo: R : radio de tubería, $R = h + d \rightarrow d = R - h$ (23)

h : altura de líquido,

La longitud de arco $s = R\theta$ (24)

La distancia d ,

$$d = R \cos\left(\frac{1}{2}\theta\right) \quad (25)$$

$$d = \frac{1}{2}c \cot\left(\frac{1}{2}\theta\right) \quad (26)$$

$$d = \frac{1}{2}\sqrt{4R^2 - c^2} \quad (27)$$

La cuerda c ,

$$c = 2R \operatorname{sen}\left(\frac{1}{2}\theta\right) \quad (28)$$

$$c = 2d \tan\left(\frac{1}{2}\theta\right) \quad (29)$$

$$c = 2\sqrt{R^2 - d^2} \quad (30)$$

$$c = 2\sqrt{h(R-h)} \quad (31)$$

El ángulo θ obedece a la relación,

$$\theta = \frac{s}{R} \quad (32)$$

$$\theta = 2\text{acos}\left(\frac{d}{R}\right) \quad (33)$$

$$\theta = 2\text{atan}\left(\frac{c}{2d}\right) \quad (34)$$

$$\theta = 2\text{asen}\left(\frac{c}{2R}\right) \quad (35)$$

El área de sección transversal de líquido A_{STL} está dada por la relación:

$$A_{STL} = A_{\text{sector circular}}(R_1 R_2 s) - A_{\text{triángulo isosceles}}(102)$$

$$A_{STL} = \frac{1}{2}R^2(\theta - \text{sen } \theta) \quad (36)$$

$$A_{STL} = \frac{1}{2}(Rs - cd) \quad (37)$$

$$A_{STL} = R^2\text{acos}\left(\frac{d}{R}\right) - d\sqrt{R^2 - d^2} \quad (38)$$

Transformando en función del Radio de la altura h , finalmente se tiene que:

$$A_{STL} = R^2\text{acos}\left(\frac{R-h}{R}\right) - (R-h)\sqrt{2Rh - h^2} \quad (39)$$

- Finalizado el cálculo del área de la sección transversal ocupada por la fase líquida, lo siguiente es la determinación del Volumen Total V_T de la *sección de visualización y prueba* contenido en la tubería entre las válvulas 1 y 2. Para esto se llena completamente de líquido haciendo pasar a través de ella solamente agua, se activa el sistema de control manual de apertura y cierre de válvulas clausurando el líquido entre las válvulas 1 y 2. Se retiran los accesorios de desvío de flujo y de mezcla conectados y se desactiva la válvula 2, esto se efectúa al cortar el suministro de aire al actuador por medio del regulador de presión.

Posteriormente, fue drenada el agua a un recipiente para medir su masa, se empleo para el mismo una Balanza marca: OHAUS (Figura 30) con una apreciación de $\pm 0,001$ kg y la temperatura ambiente T_{amb} en una tabla de datos con las propiedades físicas de este fluido se halla su densidad, como:

$$\rho = \frac{m}{V_T} \quad (40)$$

al despejar queda:

$$V_T = \frac{m}{\rho} \quad (41)$$

Siendo: ρ : densidad de líquido

m : masa de líquido

V_T : volumen total del tramo de prueba



Figura 31. Balanza marca OHAUS, apreciación: $\pm 0,001$ kg. Ubicada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química UCV.

- El parámetro restante para hallar la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento es la longitud de prueba, esta dimensión es necesaria para calcular el volumen de la porción de líquido retenida en cada experimento. La medición directa de este parámetro es compleja ya que los extremos de cada tramo no son visibles, estos llegan hasta el interior de cada válvula, además de

no tener una sección constante producto de la forma esférica del bulbo de regulación del flujo. Se determina de manera indirecta:

$$V_T = A_{STL} \cdot L_{Aparente} \longrightarrow \quad (42)$$

$$\longrightarrow L_{Aparente} = \frac{V_T}{A_{STL}} \quad (43)$$

Siendo A_{STL} : el área de sección transversal de la tubería conocida

V_T : Volumen Total del tramo de prueba

$L_{Aparente}$: Longitud de tubería empleado en el cálculo de la fracción volumétrica de líquido.

- Finalmente se calcula la fracción volumétrica de líquido H_L , como sigue:

$$H_L = \frac{A_{STL} \cdot L_{Aparente}}{V_T} \quad (44)$$

Los valores de las variables definidas anteriormente se presentan a continuación en la tabla 3.

Tabla 3. Tabla de valores para el Cálculo del volumen total de la zona de Visualización.

Propiedad	Valor
T_{amb}	24° C
ρ	997,605 kg/m ³
m	5,965 kg
V_T	0,005979 m ³
$L_{Aparente}$	5,244 m

4.3. PROTOCOLO EXPERIMENTAL PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE LÍQUIDO EN FLUJO BIFÁSICO GAS-LÍQUIDO

Las pruebas experimentales de flujo bifásico se deben llevar a cabo a partir de la instalación de los diferentes equipos de medición tales como: medidor de flujo volumétrico de gas (VORTEX) tanto para la tubería de suministro de aire de 0.0254 m (1 pulg.) como para la de 0.0508 m (2 pulg.) de diámetro, el medidor de presión diferencial de líquido de 2.5-250 KPa para la determinación del flujo de líquido, los medidores de presión locales y medidor diferencial en la zona de prueba, la instalación de los manómetros a la entrada y la salida del circuito de flujo, el equipo de medición de temperatura y la cámara para registro de imágenes y video.

Para llevar a cabo estos experimentos es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Verificar que los equipos antes mencionados se encuentren instalados y conectados a la fuente de alimentación.
2. Inspeccionar que se encuentren en funcionamiento los compresores ubicados, uno en el cuarto de calderas y el otro ubicado en el galpón de máquinas térmicas de la escuela de Ingeniería Mecánica. Adicionalmente, llevar a cabo diariamente la purga de dichos compresores para así evitar la formación de condensados en las líneas de aire.
3. Verificar que el tanque principal del banco de ensayo contenga al menos un 70% de su capacidad total a fin de evitar la succión de aire hacia la bomba producto de un bajo nivel de líquido en dicho tanque, así como también que se encuentre abierta la llave de cierre rápido ubicada en la succión de la bomba.

4. Instalar la placa orificio requerida por el experimento para la determinación del flujo volumétrico de agua.
5. Abrir la válvula de suministro de aire hacia las válvulas de cierre de rápido y comprobar que éstas mantengan una presión aproximada a los 275,79 kPa (40 lb/pulg²), a fin de garantizar su correcta apertura y cierre cuando la demanda de aire sea elevada. En este sentido, es necesario garantizar que las válvulas 1 y 2 estén abiertas cuando la válvula de desvío de flujo esté cerrada y viceversa.
6. Activar el interruptor de alimentación de corriente hacia la bomba y el del sistema de levantamiento, el cual suministra de energía a todos los equipos de medición del banco, dichos interruptores están ubicados dentro del laboratorio de Tránsito de Calor.
7. Proceder al encendido de la bomba asegurándose que la válvula de suministro y la válvula de desvío estén cerradas y que la válvula de descarga del banco este totalmente abierta.
8. Realizar la purga del medidor de presión diferencial para la determinación del flujo volumétrico de líquido.
9. Variar los caudales tanto de aire como de agua para un determinado experimento de tal manera que se logre recorrer la matriz experimental mediante líneas horizontales de iguales velocidades superficiales de líquido y aumentando progresivamente la velocidad superficial de aire, garantizando que se establezca la condición de flujo a lo largo de todo el tiempo de duración de dicha prueba.

10. Registrar y tabular los valores experimentales asociados al flujo volumétrico de agua y flujo volumétrico de aire; determinar las velocidades superficiales de cada fase y comenzando paralelamente la filmación del patrón de flujo.
11. Colocar los valores en la placa acrílica de identificación de cada experimento, filmar el patrón por un tiempo entre 30 y 45 seg. aproximadamente. Ejecutar la activación de desvío de flujo en el panel de control del banco e inmediatamente cerrar la válvula de suministro de aire al circuito, se espera la segregación de las fases y la estabilización de la interfaz por un tiempo recomendado de 2 minutos para llevar a cabo la captura de las imágenes necesarias para la posterior determinación la altura del líquido.
12. Tomar la fotografía.
13. Comprobar la presión de los tanques de almacenaje de los compresores reciprocantes, verificando que estos lleguen a su máxima carga.
14. Activar el sistema de apertura y cierre de válvulas en el panel de control de flujo del banco para retornar el circuito a flujo de operación, a fin de dar inicio a un siguiente experimento.
15. Si la presión estática retenida en el tramo de prueba supera los 137,9 kPa (20 psi), antes de activar el sistema de apertura, se debe abrir la válvula de suministro de gas con el fin de igualar las presiones y minimizar el impacto sufrido a los accesorios de desvío y mezcla.
16. Repetir los pasos del 9 al 15 tantas veces como experimentos sean llevados a cabo.
17. Realizar la medición de la altura de líquido como se explica en el punto 4.2 y finalmente determinar la Fracción Volumétrica de Líquido para cada experimento.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. BASE DE DATOS EXPERIMENTALES DE LA FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE LÍQUIDO.

Las pruebas fueron realizadas en banco experimental de flujo bifásico ubicado en el galpón de máquinas térmicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica, en la sección de flujo ascendente y en posición horizontal.

Para la clasificación de los patrones de flujo obtenidos en este trabajo, se utiliza la descripción de patrones de flujo propuesta por Barnea *et al.* (1980), la cual es una de las más aceptadas y reconocida por la mayoría de los investigadores. Los patrones de flujo se dividen en cuatro categorías principales, Flujo Estratificado, Flujo Intermitente, Flujo Anular y Flujo Burbuja Dispersa, entre los cuales se desarrollan zonas de transiciones. (Haoulo, 2007). Se realizaron un conjunto de ensayos para desarrollar una base de datos de 213 experimentos los cuales tienen una distribución por patrón como se muestra en la Tabla 4:

Tabla 4. Datos experimentales por patrón de flujo.

Patrón	AN	BD	SL	SL-AN	SL-BD	SW	SW-AN	SW-SL	Total
Puntos	55	4	39	62	29	9	3	12	213

Se observa que los patrones más recurrentes fueron los flujos intermitente como el tapón, tapón – anular o tapón – burbuja dispersa. No se realizaron experimentos de patrón burbuja alargada y sólo se lograron medir 4 puntos de burbuja dispersa por limitaciones de operación del banco.

Con los 213 experimentos desarrollados, tomando en cuenta los patrones de flujo y las velocidades superficiales de las fases, en la Figura 32 se presenta el mapa de patrones de flujo para tuberías horizontales:

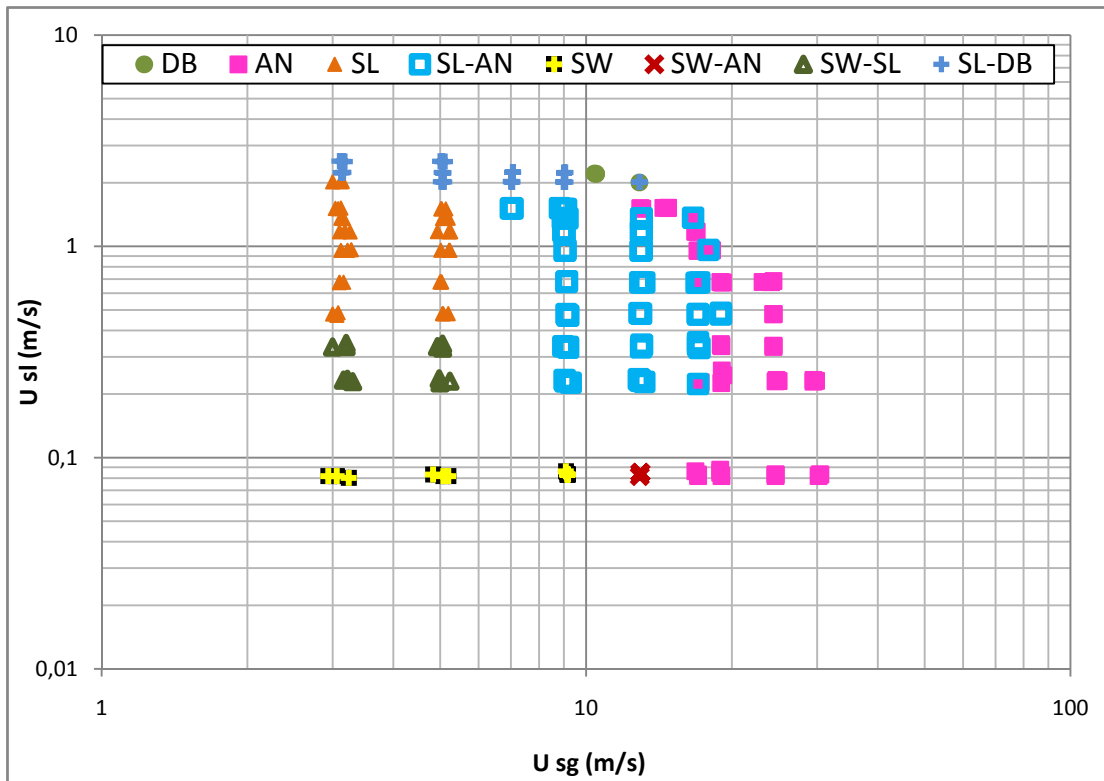


Figura 32. Mapa de patrones de flujo.

En la tabla 5 se lista un resumen de los 213 puntos experimentales de acuerdo a la fracción volumétrica de líquido y a las velocidades superficiales de líquido y gas.

Tabla 5. Rango de valores obtenidos en los experimentos de flujo bifásico

Variable	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Mediana	Máximo
H_L	0.2793	0.14472	0.0367	0.2528	0.6154
U_{sg} [m/s]	11.336	7.091	2.936	9.150	30,456
U_{sl} [m/s]	0.940	0.719	0.080	0.679	2.532

De las Figuras 33 a la 44 se presentan los 213 experimentos de la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento H_L y sin deslizamiento λ_L versus la velocidad superficial de gas U_{SG} para diferentes velocidades superficiales de líquido U_{SL} . Para efectos de la discusión de resultados se utilizarán los acrónimos de las variables anteriormente mencionadas.

En la Figura 33, para un intervalo de U_{SG} de 2,937 a 30,456 m/s manteniendo un intervalo prácticamente constante de U_{SL} de 0,080 a 0,088 m/s se observa un decremento en H_L de 0,3238 a 0,0367 y de λ_L de 0,0271 a 0,0027. En otras palabras, ocurrió una disminución entre el valor máximo de H_L y λ_L de 8,8 y 10 veces con respecto al valor mínimo respectivo de cada uno. Un incremento de U_{SL} entre 0,223 y 0,259 m/s provoca un cambio en el patrón de flujo; ocurre específicamente en el intervalo de U_{SG} que va desde 3,157 hasta 17,242 m/s y pasa de SW y SW – AN a la transición SW – SL y SL – AN, respectivamente, como se muestra en la Figura 34. Adicionalmente, en esta figura se observa una variación de H_L de 0,3398 a 0,0910 y de λ_L de 0,0686 a 0,0077. El patrón de flujo con mayor diferencia entre H_L y λ_L para las mismas condiciones de operación, es el anular con un promedio de 94%, y el de menor diferencia es el estratificado-tapón con un 72%.

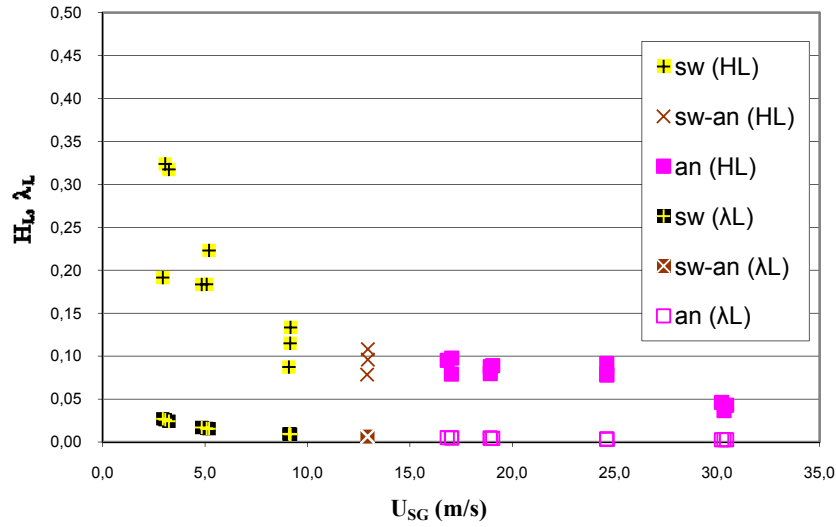


Figura 33. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 0,080-0,088m/s.

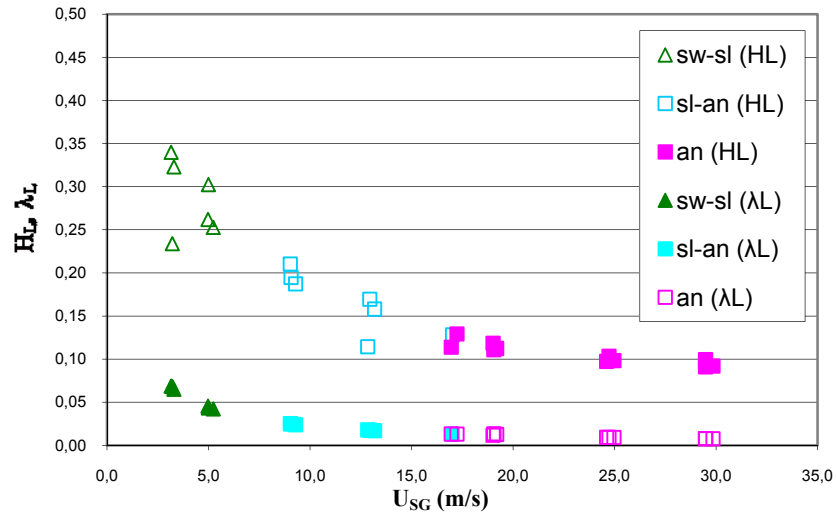


Figura 34. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 0,223-0,259m/s.

En la Figura 35, para un valor aproximado de U_{SL} de 0,341 m/s existe una disminución de H_L y λ_L de 0,3042 a 0,1043 y 0,1002 a 0,0135, respectivamente. Con este aumento de un 41% en la U_{SL} no se aprecia ningún cambio en los patrones de flujo con respecto a la gráfica anterior (Figura 34), pero, al aumentar U_{SL} a un intervalo entre 0,470 y 0,485 m/s ocurre un cambio en el patrón de flujo (Figura 36), esto se aprecia en los puntos pertenecientes al intervalo de U_{SG} y de 2,997 a 5,195 m/s

y varía de la transición de Estratificado Ondulado – Tapón a Tapón, manteniéndose para el resto del intervalo de U_{SG} el mismo comportamiento en la configuración espacial de las fases, es decir, que no hay cambios de patrón de flujo entre estos valores de U_{SL} . Adicionalmente en la Figura 36, se aprecia una reducción entre los valores máximos y mínimos, para H_L de 0,4081 a 0,1186 y para λ_L de 0,1376 y 0,0192. La diferencia entre la H_L y λ_L para las mismas condiciones de operación, es para tapón-anular 82%, anular 86%, mientras que en flujo tapón 67%.

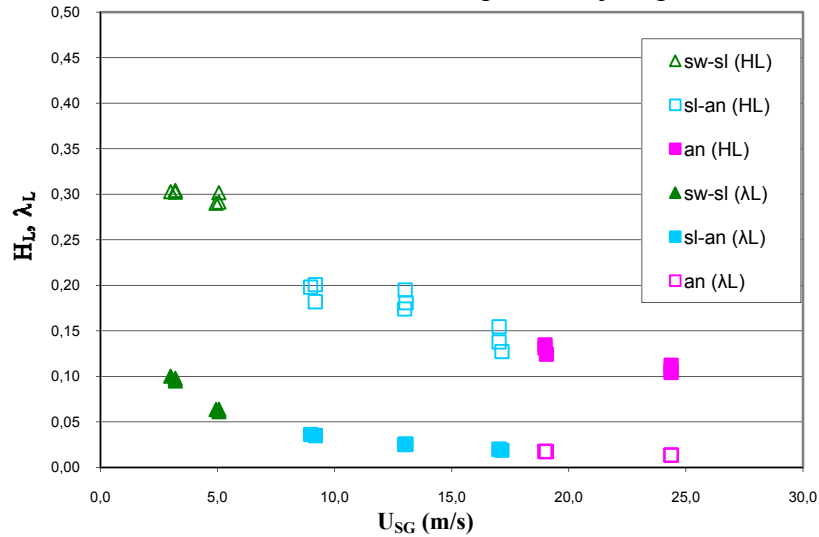


Figura 35. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 0,330-0,352m/s.

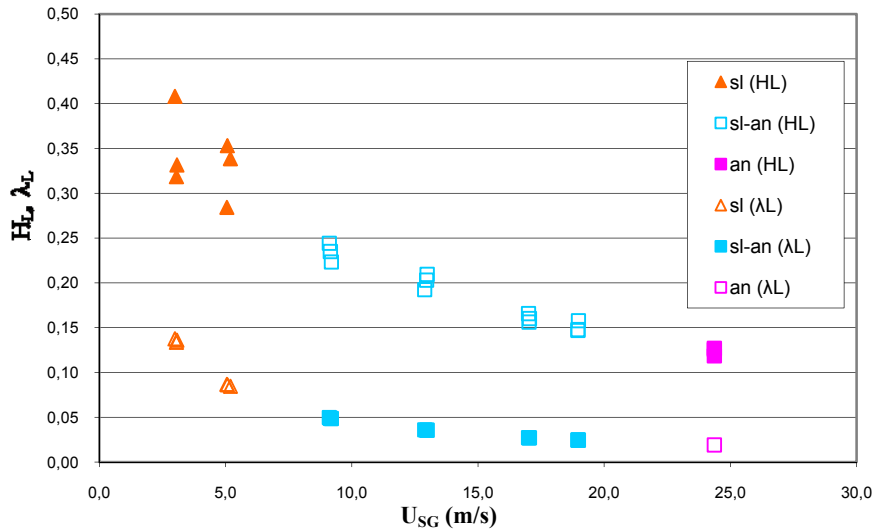


Figura 36. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 0,470-0,485m/s.

Para los intervalos de velocidades superficiales de líquido que van desde 0,673 hasta 1,522 m/s, (Figuras 37 - 41) no se originan cambios en el tipo de patrón de flujo y se presenta el mismo comportamiento de gráficas anteriores; a medida que aumenta U_{SG} hay un decremento de H_L y λ_L . Para el intervalo de operación de U_{SL} de 0,673 y 0,685 m/s, en la Figura 37, la disminución de H_L fue de 0,4978 – 0,1413 y para λ_L varió de 0,1794 a 0,0273. La diferencia entre H_L y λ_L para las mismas condiciones de operación para cada patrón es tapón-anular 75%, anular 78%, mientras que en flujo tapón 62%. Al incrementar U_{SL} a un valor promedio de 0,958 m/s para un intervalo de U_{SG} de 3,117 a 18, 201 m/s (Figura 38), H_L aumentó en un 1% con respecto al valor máximo anterior (Figura 37) y dentro del intervalo de U_{SG} de 3,117 a 18,201 m/s, la fracción volumétrica de líquido (H_L) se redujo de 0,5015 a 0,1805, así mismo ocurre para λ_L que varía de 0,2350 a 0,0499.

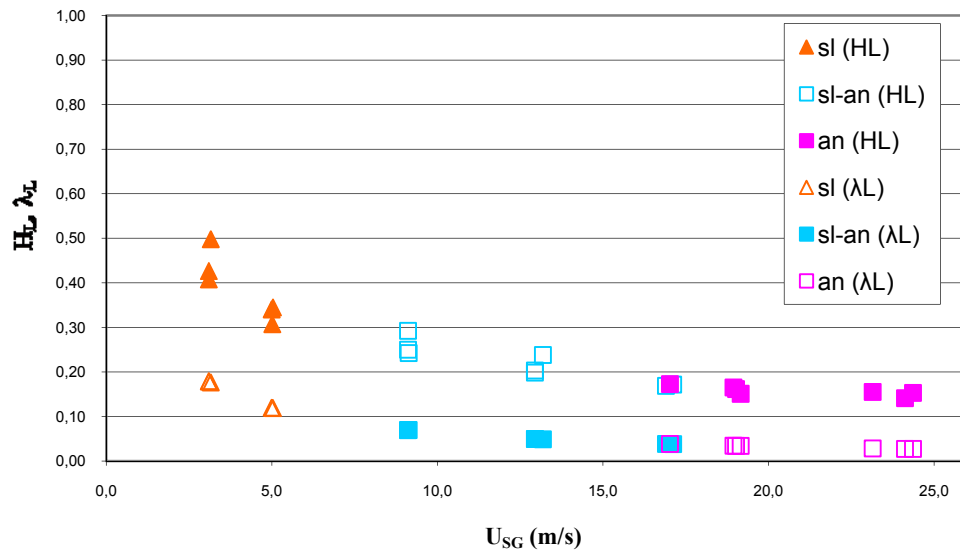


Figura 37. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 0,673-0,685m/s.

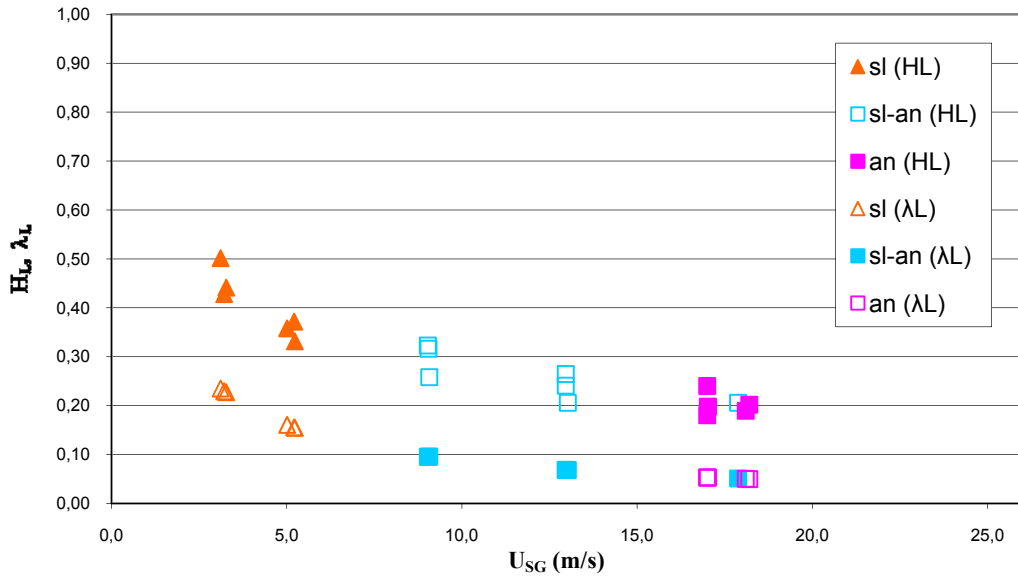


Figura 38. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 0,953-0,965m/s.

Al aumentar el intervalo de U_{SL} a 1,170 y 1,180 m/s se observa un decremento de H_L de 0,5413 a 0,1907 (Figura 39). Para un incremento del 15% en el intervalo de U_{SL} (en promedio 1,360 m/s, Figura 40) se obtienen valores de H_L que varían de 0,5336 a 0,1931 y de λ_L de 0,3039 a 0,0756. En la Figura 41, correspondiente al intervalo de U_{SL} de 1,502 a 1,522 m/s, el máximo valor de H_L aumenta con respecto al valor anterior (Figura 40) en el orden de un 10,2% con la variación de 0,5883 – 0,2395 y λ_L disminuyó de 0,3325 a 0,0932.

Al comparar H_L y λ_L se observa que el de mayor diferencia es el patrón anular con un porcentaje promedio de 62%, tapón-anular de un 58% y el de menor porcentaje es tapón con un promedio de 47%.

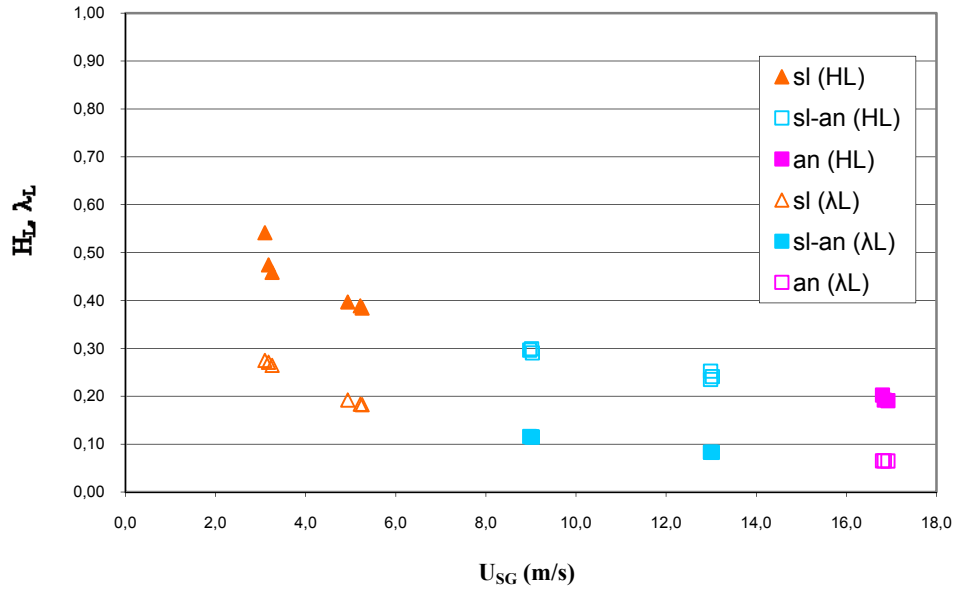


Figura 39. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 1,170-1,180m/s.

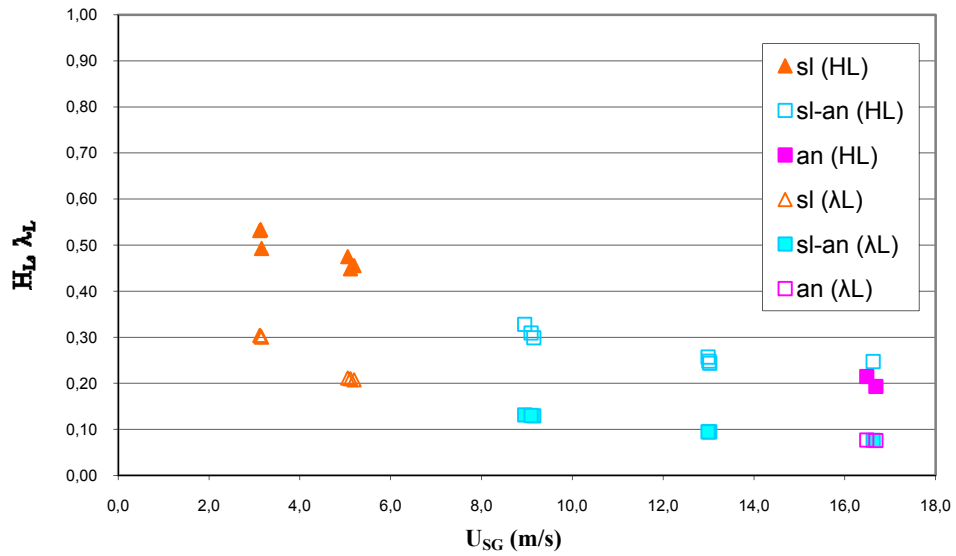


Figura 40. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 1,353-1,366m/s.

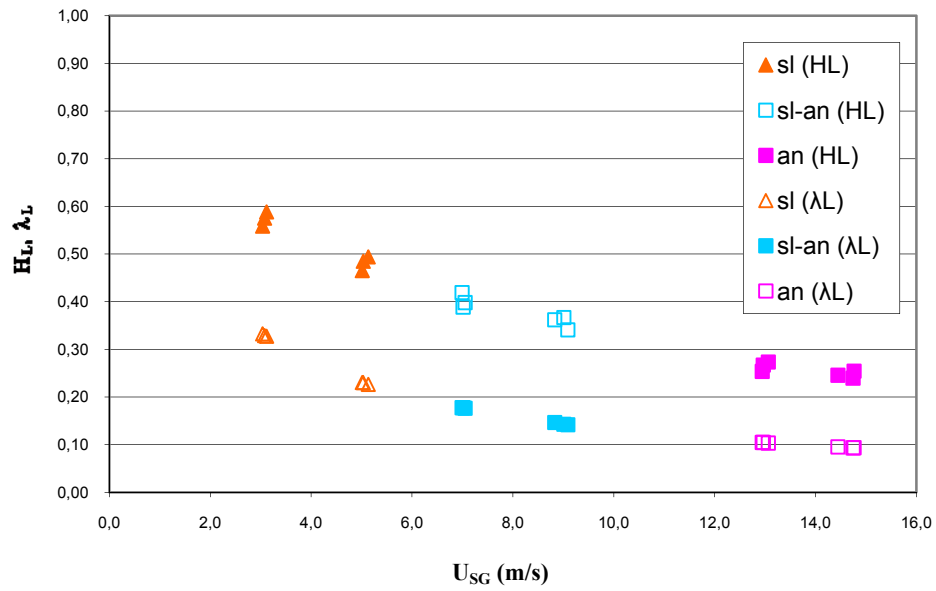


Figura 41. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un intervalo de U_{SL} de 1,502-1,522m/s.

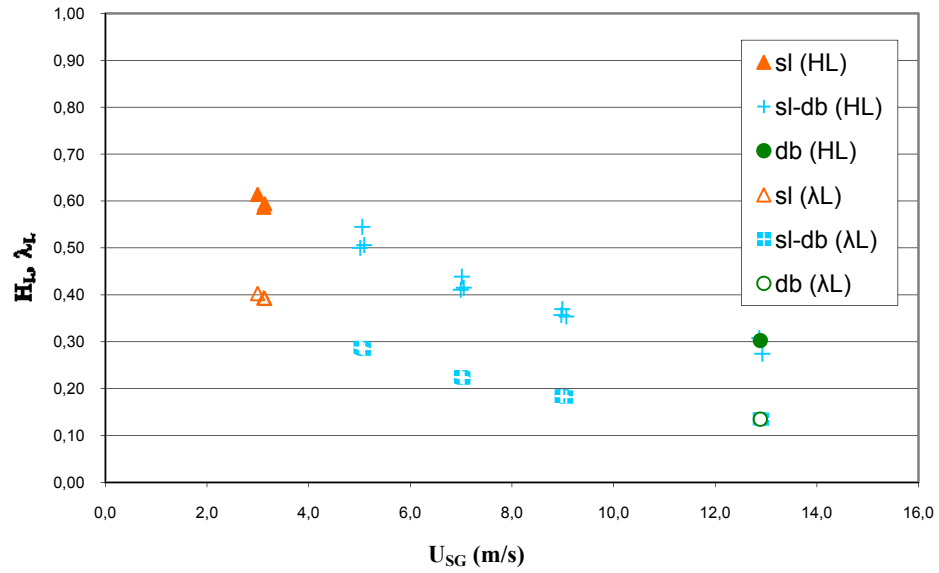


Figura 42. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un rango de U_{SL} de 2,006-2,028m/s.

En la figura 42, correspondiente al intervalo de U_{SL} de 2,006 – 2,028 m/s se observa un cambio en el patrón de flujo para los valores de U_{SG} de 5,015 a 9,070 m/s, con respecto a la Figura 41 estos pasan de Tapón – Anular a Tapón Burbuja Dispersa. Se tiene una disminución de H_L de 0,6140 a 0,2742 y de λ_L 0,4027 a 0,1347.

Para el intervalo de U_{SL} comprendido entre 2,199 y 2,532 m/s (Figuras 43 y 44), el patrón predominante es tapón – Burbuja Dispersa con un decrecimiento de H_L que va de 0,6154 hasta 0,3095 y de λ_L entre 0,4498 y 0,1733.

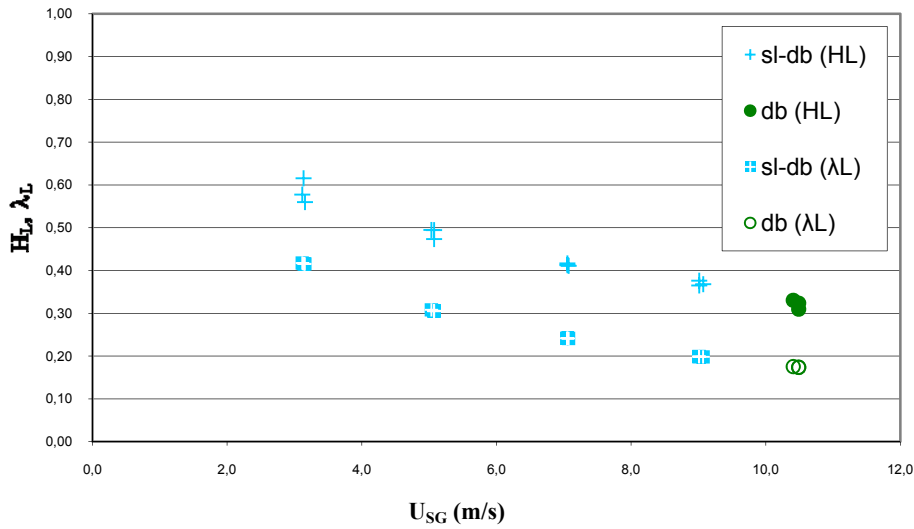


Figura 43. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un rango de U_{SL} de 2,199-2,245m/s.

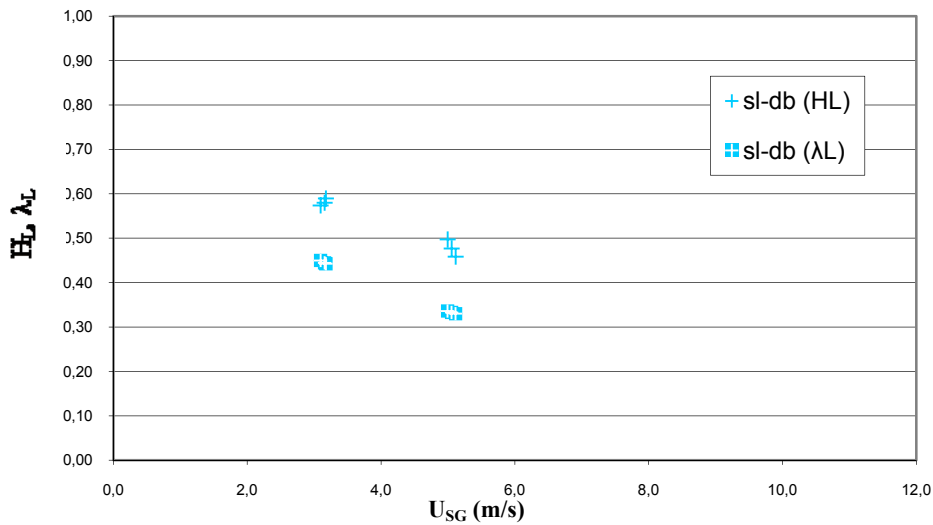
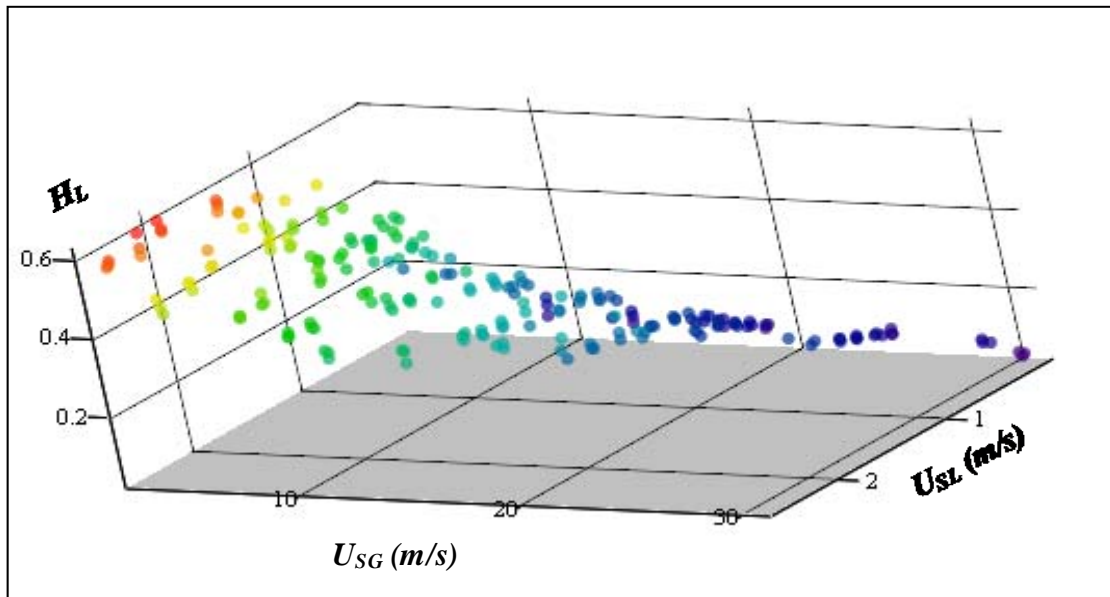


Figura 44. Fracción volumétrica de líquido con y sin deslizamiento vs. U_{SG} para un rango de U_{SL} de 2,518-2,532m/s.

En la figura 45 se presenta una gráfica en 3 dimensiones del comportamiento de la fracción volumétrica de líquido versus las velocidades superficiales de líquido y gas.



(U_{sl}, U_{sg}, H_l)

Figura 45. Datos experimentales de fracción volumétrica de líquido con deslizamiento vs. Velocidades superficiales de gas y líquido.

En la gráfica, se observa que en general la fracción volumétrica de líquido, decrece al aumentar la velocidad superficial del gas, manteniendo la velocidad superficial del líquido constante. Por otra parte, al aumentar la velocidad de líquido, manteniendo constante la de gas, la fracción volumétrica de líquido aumenta pero en mayor proporción que en el caso anterior. En general los patrones con mayor diferencia entre la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento y le fracción de líquido sin deslizamiento son el estratificado ondulado, anular y estratificado-anular con valores superiores al 90%. Mientras que el de menor diferencia es la transición de tapón-burbuja dispersa la cual mostró un porcentaje promedio de 26%.

En la figura 46 se muestra una relación entre la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento H_L y la fracción volumétrica de líquido sin deslizamiento λ_L para los diferentes patrones de flujo obtenidos en los ensayos experimentales.

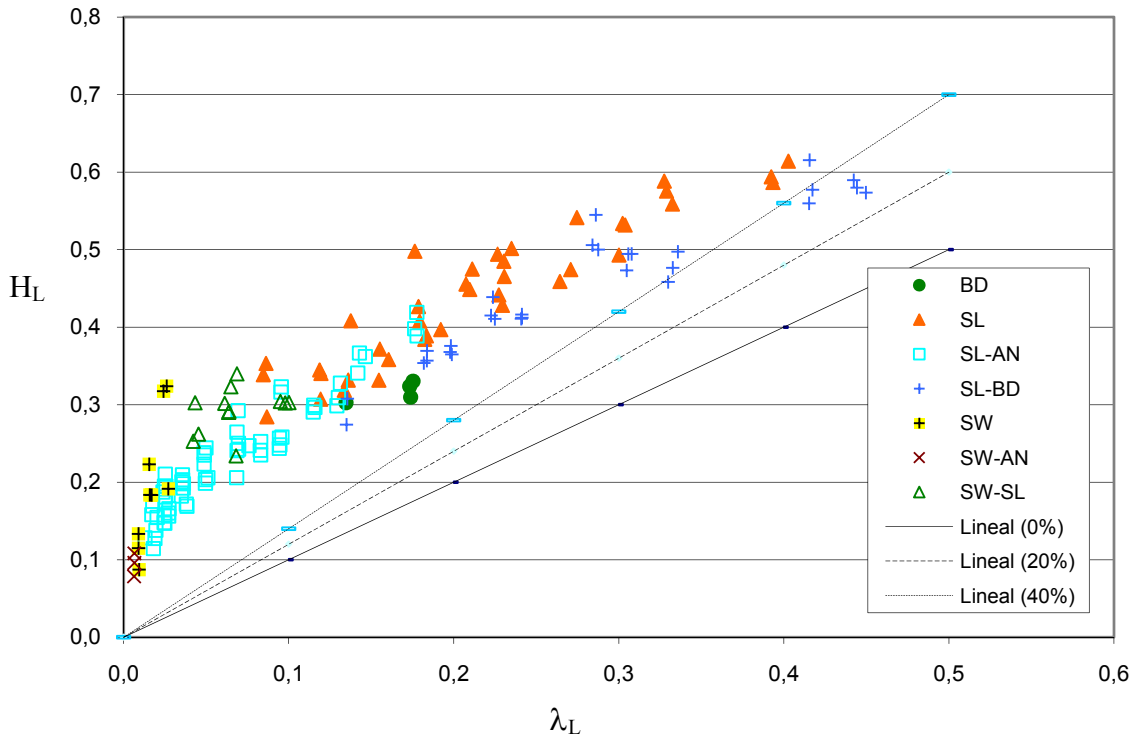


Figura 46. Diagrama de paridad entre los valores de fracción volumétrica de líquido con deslizamiento H_L y sin deslizamiento λ_L

La diferencia porcentual promedio de H_L con respecto a λ_L para cada patrón de flujo fue, anular 82.25%, burbuja dispersa 48.16%, tapón 52.67%, tapón anular 74.41%, tapón-burbuja dispersa 39.65%, estratificado ondulado 91.11%, estratificado ondulado-anular 80.04% y estratificado ondulado-tapón 76.78%.

5.2. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LOS MODELOS SELECCIONADOS.

Los 213 puntos experimentales obtenidos fueron utilizados, para evaluar la precisión de un conjunto de modelos y/o correlaciones: 10 correlaciones, 2 modelos mecanicistas y la definición del modelo homogéneo. En la Tabla 6, se muestran los modelos y/o correlaciones seleccionados:

Tabla 6. Acrónimos de los modelos y correlaciones seleccionadas.

Modelos y Correlaciones	Acrónimo
Modelo homogéneo	<i>HME</i>
Lockhart y Martinelli (1949)	<i>LMC</i>
Nishino y Yamazaki (1963)	<i>NYC</i>
Beggs y Brill (1973)	<i>BBC</i>
Correlación transformada de Thom, Butterworth (1975)	<i>THOC</i>
Correlación transformada de Baroczy, Butterworth (1975)	<i>BARC</i>
Chen y Spedding (1981)	<i>CSC</i>
Abdul-Majeed (1996)	<i>ABDC</i>
Xiao et al. (1990)	<i>XMM</i>
Gómez et al. (2000)	<i>GMM</i>
Correlación universal compuesta de H_L , por García (2004)	<i>UCHC</i>
Correlación clasificadas por patrón de flujo de H_L , por García (2004)	<i>FPHC</i>
Correlación del modelo teórico de H_L , por García (2004)	<i>TMC</i>

En la Tabla 7 se muestran los parámetros estadísticos E_1 , E_2 , E_3 y E_4 para cada uno de los modelos y/o correlaciones evaluadas frente a los datos experimentales, siendo E_1 el error porcentual promedio, E_2 error porcentual absoluto promedio, E_3 la desviación estándar del error porcentual promedio y E_4 la desviación estándar del

valor calculado menos el valor experimental dividido entre el valor experimental. La ponderación viene dada por el error porcentual absoluto promedio E_2 .

Tabla 7. Evaluación de la precisión de los modelos y/o correlaciones seleccionados contra la data experimental de 213 puntos obtenida en el banco de ensayos.

Modelo	Parámetros Estadísticos			
	E1 [%]	E2 [%]	E3 [%]	E4 [%]
NYC	3.67	13.59	16.47	16.88
LMC	5.65	13.72	15.81	16.80
BARC	8.23	20.83	23.17	24.60
XMM	-21.70	24.75	23.80	32.24
TMC	-28.03	28.03	12.64	30.80
THOC	-15.35	31.94	35.89	39.04
BBC	-35.85	35.85	15.13	38.99
ABDC	-35.58	36.40	14.28	38.41
UCHC	-36.56	36.60	10.37	38.08
FPHC	-37.61	37.74	14.18	40.27
CSC	39.12	56.41	75.97	85.49
HME	-68.33	68.33	19.07	71.10
GMM	82.59	101.13	124.16	149.23

La correlación de Nishino y Yamazaki (1963) fue la que obtuvo el mejor desempeño con un error absoluto promedio de un 13.59 %, seguido por Lockhart y Martinelli (1949) con 13.72 %, luego de tercero se ubica la correlación transformada de Baroczy, Butterworth (1975) la cual tiene un error absoluto promedio de 20.83%. El modelo de Gómez et al. (2000) obtuvo el mayor error absoluto promedio con 101.13%. Los modelos y/o correlaciones de Chen y Spedding (1981), homogéneo y Gómez et al. (2000) obtuvieron errores absolutos promedios mayores al 50 %. En la Figura 47 se representa gráficamente la precisión de los modelos y/o correlaciones comparados con los datos experimentales:

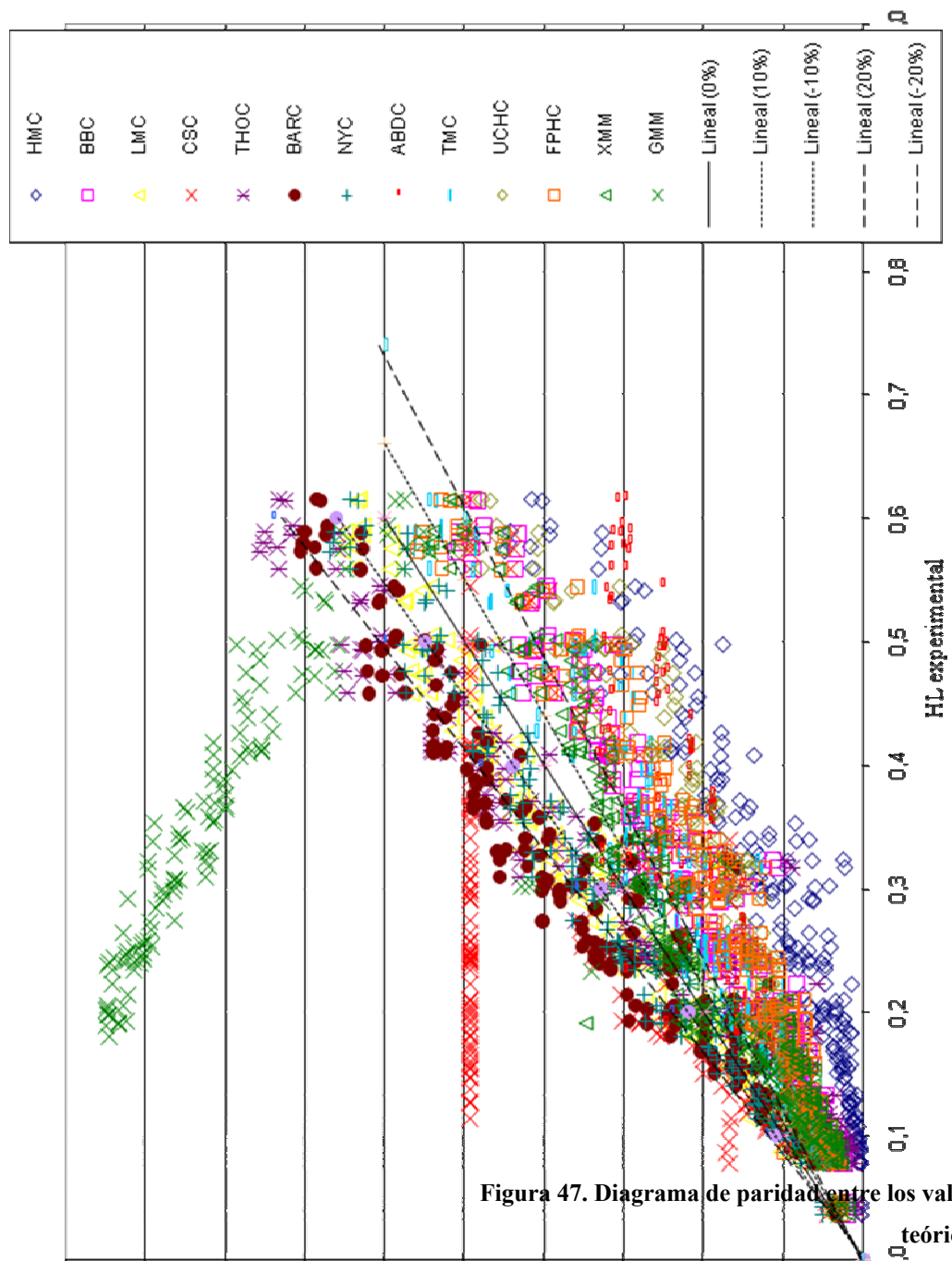


Figura 47. Diagrama de paridad entre los valores de H_L experimental y los valores de H_L teóricos.

Los modelos y/o correlaciones que presentan una tendencia más aproximada entre los valores teóricos y los experimentales fueron, Nishino y Yamazaki (1963) y Lockhart y Martinelli (1949). Se observa un comportamiento particular para los modelos de Chen y Spedding (1981) y de Gómez et al. (2000). El primer modelo mantiene un valor constante de la fracción volumétrica de líquido cuando el correspondiente dato experimental tiene por patrón de flujo alguna transición, por otro lado el modelo mecanicista de Gómez et al (2000), a patrones de flujo intermitente, bien sea flujo tapón o cualquier transición acompañada de flujo tapón, sobrepredice los valores de la fracción volumétrica aproximándolos a la unidad, asumiendo que el tipo de patrón correspondiente es flujo tapón. Mientras que el modelo homogéneo subpredice H_L , es decir, arroja valores teóricos muy pequeños para cada valor experimental.

SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

Entre los cambios estructurales realizados al banco experimental de flujo bifásico, se tiene la instalación de una sección de desvío de flujo. Para esto fue necesario el diseño y construcción de un accesorio tipo “Tee” y la colocación y puesta a punto de tres válvulas de cierre rápido con apertura y cierre simultáneo, con los cuales se ejecuta la retención del flujo y posterior visualización de la altura de la película de líquido. Estas modificaciones permiten por primera vez realizar pruebas para el cálculo y estudio de la fracción volumétrica de líquido en la Escuela de Ingeniería mecánica de la Universidad Central de Venezuela.

Las modificaciones efectuadas a la coloración del agua y a la iluminación, así como la adquisición de un equipo de video de alta definición, constituyen una mejora significativa en cuanto a la visualización de patrones de flujo y a captura de imágenes de alta calidad en comparación con trabajos realizados anteriormente sobre el estudio de flujo bifásico (Haoulo, 2007; Suarez y Toro, 2007). La coloración del agua realza el contraste entre las fases al capturar la fotografía por lo que facilita el post-procesamiento imágenes para el posterior cálculo de la fracción volumétrica de líquido.

El diseño y aplicación de un protocolo experimental permitió optimizar la realización de los ensayos.

Se desarrolló una base de datos experimental de 213 pruebas de la fracción volumétrica de líquido en flujo bifásico de aire – agua, cuyos resultados presentan que H_L decrece al aumentar la velocidad superficial de gas pero aumenta al incrementar la velocidad superficial de líquido. Se puede concluir entonces, que pequeñas variaciones en la velocidad superficial de líquido afecta en mayor medida el cambio en la fracción volumétrica de líquido que lo que afectaría un cambio relativamente mayor de velocidad superficial de gas.

En general los patrones con mayor variación entre la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento H_L y la fracción volumétrica de líquido sin deslizamiento λ_L fueron: Estratificado Ondulado (SW), Anular (AN) y Estratificado Ondulado – Anular (SW – AN) con una diferencia mayor al 90%. Mientras que la transición de Tapón – Burbuja Dispersa (SL – DB) presentó una variación de 26%, esto a que la diferencia entre las velocidades superficiales es significativamente menor, con lo cual se demuestra la invalidez de la definición del modelo homogéneo

Al evaluar la precisión de los valores obtenidos experimentalmente con los modelos y/o correlaciones seleccionados, aquellas que presentaron el mejor desempeño son: la correlación de Nishino y Yamazaki (1963) y la correlación de Lockhart y Martinelli (1949) con errores absolutos promedio E_2 menores al 15 % mientras que el peor desempeño lo tiene el modelo mecanicista de Gómez *et al.* (2000) con un error absoluto promedio superior al 100%. Este último toma en cuenta los patrones de flujo y sobrepredice los valores de fracción volumétrica de líquido en flujo tapón y sus transiciones aproximándolos a la unidad. Algo particular ocurre con la correlación de Chen y Spedding (1981), el cual mantiene constante un valor de fracción volumétrica de líquido para patrones en transición.

RECOMENDACIONES

En este trabajo se obtuvieron 213 puntos experimentales. Se recomienda afinar la matriz experimental para lograr una mayor cantidad de datos y así mejorar el mapa de patrones de flujo.

Se recomienda la adquisición de equipos que permitan cuantificar menores caudales de gas para poder reportar patrones que requieran bajas velocidades superficiales de gas, como por ejemplo el patrón Burbuja Alargada.

Cambiar el material con el cual se realizó el accesorio “T”, acrílico, debido a que se presentaron fallas en la unión de las piezas.

Es recomendable la adquisición de equipos de suministro de líquido y gas de mayor capacidad, para así ampliar el intervalo de operación del banco de ensayo.

Cerrar el perímetro que ocupa el banco experimental, para dejar los equipos de medición permanentemente instalados, sin que corran peligro de ser dañados.

Seguir el estudio de este trabajo para tuberías inclinadas y verticales en flujo ascendente y descendente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul-Majeed G. H. 1996. Liquid holdup in horizontal two-phase gas-liquid flow. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, August 1996, 15, 271 – 280.
- Armand, A., 1946. The resistance during the movement of a two-phase system in horizontal pipes. *Izv. V.T.I.* 1, 16-23 *AERE TRANS.* 828.
- ASME b16.5 a, 1998. Pipe Flanges and Flanged Fittings NPS ½ Through NPS 24.
- Bankoff, S., 1960. Variable density single fluid model for two-phase flow with particular reference to steam-water flow. *Trans. ASME* 82, 265.
- Baroczy, C., 1963. Correlation of liquid fraction in two-phase flow with application to liquid metals. *NAA-SR-8171*.
- Beggs, H., Brill, J., 1973. A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes. *J. Pet. Tech.* 25 (5), 607-617.
- Butterworth, D., 1975. A comparison of some void-fraction relationships for concurrent gas-liquid flow. *Int. J. Multiphase Flow* 1, 845-850.
- Cela, D., Fuentes, J., 2008. Estudio experimental de caída de presión de flujo bifásico aire-agua en tuberías horizontales, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Venezuela.
- Chen, J., Spedding, P. 1981. An Extension of the Lockhart-Martinelli Theory of Two Phase Pressure Drop and Holdup. *Int. J. Multiphase Flow* 7 (6), 659-675.
- Chen, J., Spedding, P. L. 1983. An Analysis of Holdup in Horizontal Two-Phase Gas-Liquid Flow. *Int. J. Multiphase Flow* 9 (2) 147-159.

- Cravino, A., Pérez, Al., 2007. Evaluación de Modelos Homogéneos de Correlación y Mecanicistas en la Predicción de la Caída de Presión de Flujo Bifásico de Gas y de Líquido en Tuberías Verticales. Tesis Ing. Mecánico, Tutor: García, F., UCV, Caracas.
- Eaton, B., Andrews, D., Knowles, C., Silberberg, I., Brown, K., 1967. The prediction of flow patterns, liquid holdup and pressure losses occurring during continuous two-phase flow in horizontal pipe lines. *Trans. AIME*, 815.
- Fenyés, H., Angol, M., Juzga, J., Walker, V. 1990. Laboratorio Introductorio de Física. Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.
- Flanigan, O., 1958. Effect of uphill flow on pressure drop in design of two-phase gathering systems. *Oil and Gas Journal* 56, 132.
- García, F., 2004. Factor de Fricción para Flujo Bifásico de Gas y Líquido en Tuberías Horizontales para Régimen Laminar y Turbulento. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Venezuela.
- García, F., García, R., Joseph, D., 2005. Composite power law holdup correlations in horizontal pipes, *International Journal of Multiphase Flow* 31(12), 1276-1303.
- Giordano, P., Pagnone, E., 2002. Determinación de la Caída de Presión y la Retención para Flujo Líquido-Gas en régimen Slug en tuberías horizontales, Miniproyecto de Ingeniería Química, Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia, Universidad Simón Bolívar.

- Gómez, L., Shohan, O., Schmidt, Z., Chokshi, R., Northug, T., 2000, Unified Mechanistic Model for Steady-State Two-Phase Flow: Horizontal to Vertical Upward Flow, *SPE 65705, SPE J 5* (3), 339-350.
- Haoulo, M, 2007. Estudio Experimental de Patrones de Flujo Bifásico Gas-Líquido en Tuberías Horizontales y ligeramente Inclinas. Trabajo de Grado, M. Sc. Ing. Mecánica, Tutor: García, F., Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UCV.
- Hoogendoorn, C. J., 1959. Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes. *Chemical Engineering Science* 9, 205-217.
- Hughmark, G. A. 1962. Holdup in Gas-Liquid Flow. *Chemical Engineering Prog.* 58, 62-65.
- Lockhart, R., Martinelli, R., 1949. Proposed correlation of data for isothermal two-phase two component flow in pipes. *Chem. Eng. Prog.* 45(1), 39-48.
- Ma, Yin-Pang; Chung, Nien-Mien; Pei, Bau-Shei. 1991. Two simplified methods to determine void fractions for two-phase flow. *Nuclear Technology* 94, 124-33.
- Nguyen, V., Spedding, P. 1977a. Holdup in Two-Phase, Gas-Liquid Flow-I: Theoretical Aspects. *Chemical Engineering Science* 32, 1003-1014.
- Nguyen, V., Spedding, P. 1977b. Holdup in Two-Phase, Gas-Liquid Flow-II: Experimental Results. *Chemical Engineering Science* 32, 1015-1021.
- Shoham. O., 2000. *Two- Phase Flow Modeling*. The University of Tulsa. Department of Petroleum Engineering, Junio 2000.

- Spedding, P. L., Chen, J. J. 1984. Hold up in Two-Phase Flow. *Int. J. Multiphase Flow* 10 (3), 307-339.
- Taitel, Y., Dukler, A., 1976. A model for prediction of flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE J.* 22(1), 47-55.
- Toro, T. y Suárez, L., 2007. Estudio Experimental de Patrones de Flujo Bifásico Aire – Agua en Tuberías Horizontales e Inclinadas, Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.
- Tovar, Karine e Ibarra, Roberto, 2006. Rediseño y construcción de un banco de ensayos para el estudio de flujo de gas y/o de líquido en tuberías. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Venezuela.
- Xiao, J., Shoham, O., Brill, J., 1990, A Comprehensive Mechanistic Model for Two-Phase Flow in Pipelines. The 65th SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA. Paper *SPE 20631*. 167-180. September. 23-26.

APÉNDICE

DETERMINACIÓN DE LOS ERRORES E INCERTIDUMBRES DE LAS MEDICIONES DE FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DE LÍQUIDO

El cálculo de la incertidumbre asociada a la fracción volumétrica de líquido representa un factor importante ya que brinda información de que tan acertado es el método empleado en la determinación del parámetro de estudio. Esta incertidumbre requiere de la determinación de mediciones directas e indirectas para el cálculo de la fracción volumétrica de líquido.

Mediciones Directas:

Una vez determinadas las variables de medición directa, como lo son: el diámetro interno de la tubería y la masa total del tramo de retención de líquido, es necesario indicar la incertidumbre asociada a dichos valores, el cual está relacionado con la dispersión de las diferentes medidas alrededor del valor medio calculado.

Existen diversas maneras para representar las incertidumbres de una serie de mediciones directas, entre las cuales está el error máximo, la desviación del promedio y la desviación normal del promedio (Fenyés, 1990)

El error máximo corresponde a la semiamplitud de la distribución, y se calcula como el promedio de la diferencia entre el mayor y el menor valor obtenido. Este tipo de error se utilizó para estimar la incertidumbre asociada a la repetitividad de cada conjunto de puntos obtenidos en la medición de la altura de líquido.

$$\Delta X_{Max} = \frac{\Delta X_{Max} - \Delta X_{Min}}{2} \quad (45)$$

La desviación promedio es el promedio de las diferencias de cada una de las mediciones con respecto al valor medio obtenido. Esta indicación de la incertidumbre se puede utilizar cuando el número de mediciones no es muy grande, ya que al haber relativamente pocas mediciones el error calculado por métodos estadísticos no es confiable.

$$\overline{\Delta X} = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{X} - X_i|}{n} \quad (46)$$

Posterior al cálculo de la desviación del promedio $\overline{\Delta X}$, se compara con el error de apreciación con el que se hicieron las mediciones Δx_{apr} , y el resultado de la medición se indica como el valor promedio \bar{X} , más o menos el mayor de estos dos errores:

$$X = \bar{x} \pm \overline{\Delta x} \quad \text{cuando} \quad \overline{\Delta x} > \Delta x_{apr} \quad (47)$$

$$X = \bar{x} \pm \Delta x_{apr} \quad \text{cuando} \quad \overline{\Delta x} < \Delta x_{apr} \quad (48)$$

La desviación normal del promedio se obtiene al hacer un análisis matemático de tipo estadístico de la curva de Gauss y se define de la forma siguiente:

$$e_{\bar{\sigma}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (49)$$

Donde:

$\bar{x} - x_1 =$ desviación de una medida del valor medio

$n =$ número de mediciones realizadas.

El error estándar del promedio es la indicación más generalmente aceptada de la incertidumbre de una serie de mediciones, siempre que el valor de n sea al menos 10 medidas como mínimo, aunque para que los resultados estadísticos se puedan aplicar con mayor confianza, el número de medidas debe ser del orden de $n=100$. Así, el resultado final de la medición se indica como el valor promedio, más o menos el error estándar:

$$X = \bar{x} \pm \bar{e}_\sigma \quad (50)$$

Mediciones indirectas:

La estimación de cómo afectan las incertidumbres de las mediciones directas, las cuales se combinan mediante relaciones matemáticas para generar los resultados indirectos, se presentan en dos casos. El primero que corresponde a la medición indirecta que depende de una sola magnitud medida experimentalmente y el segundo que representa un resultado indirecto que es función de varias magnitudes, cada una determinada con cierta incertidumbre.

En este sentido, el error absoluto de una medición indirecta que depende de una sola magnitud medida experimentalmente, se obtiene multiplicando el error absoluto de la medición directa por la derivada de la función que relaciona las dos magnitudes como se muestra a continuación:

$$\Delta Y = \frac{d f(x)}{dx} \Delta X \quad (51)$$

Donde:

$\Delta Y =$ *Incertidumbre de la medición indirecta*

$\Delta X =$ *Incertidumbre de la medición directa*

El error absoluto de las mediciones indirectas que son función de varias magnitudes, donde cada una es determinada con cierta incertidumbre se determina a partir de la siguiente ecuación general:

$$\Delta Z = \left| \frac{d f(x)}{dx} \right| |\Delta X| + \left| \frac{d f(y)}{dy} \right| |\Delta Y| + \left| \frac{d f(z)}{dz} \right| |\Delta Z| \quad (52)$$

$\Delta Z =$ *Incertidumbre de la medición indirecta*

De lo anteriormente expuesto, se muestra en la tabla los valores de la incertidumbre en la medición de la fracción volumétrica de líquido:

Tabla 8. Valores en la incertidumbre de medición de la fracción volumétrica de líquido.

<i>MEDICIONES DIRECTAS</i>	
Parámetro a medir	Valor promedio y Error asociado
<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro interno de la Tubería 	$0,0381 \pm 0,00005 \text{ m}$
<ul style="list-style-type: none"> • Masa Total del líquido retenido en el tramo de visualización 	$5,98 \pm 0,001 \text{ kg}$
<ul style="list-style-type: none"> • Altura de líquido 	$0,012 \pm 0,00016 \text{ m}$
<i>MEDICIONES INDIRECTAS</i>	
Parámetro a medir	Valor promedio y Error asociado
<ul style="list-style-type: none"> • Volumen Total de tubería del tramo de visualización 	$0,0060 \pm 3,24 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
<ul style="list-style-type: none"> • Longitud Aparente de Tubería 	$5,24 \pm 0,015 \text{ m}$
<ul style="list-style-type: none"> • Área de la fracción de líquido 	$0,00032 \pm 0,000098 \text{ m}^2$
<ul style="list-style-type: none"> • Volumen de la fracción de líquido 	$0,0017 \pm 2,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
<ul style="list-style-type: none"> • Fracción Volumétrica de Líquido 	$0,28 \pm 0,00041$

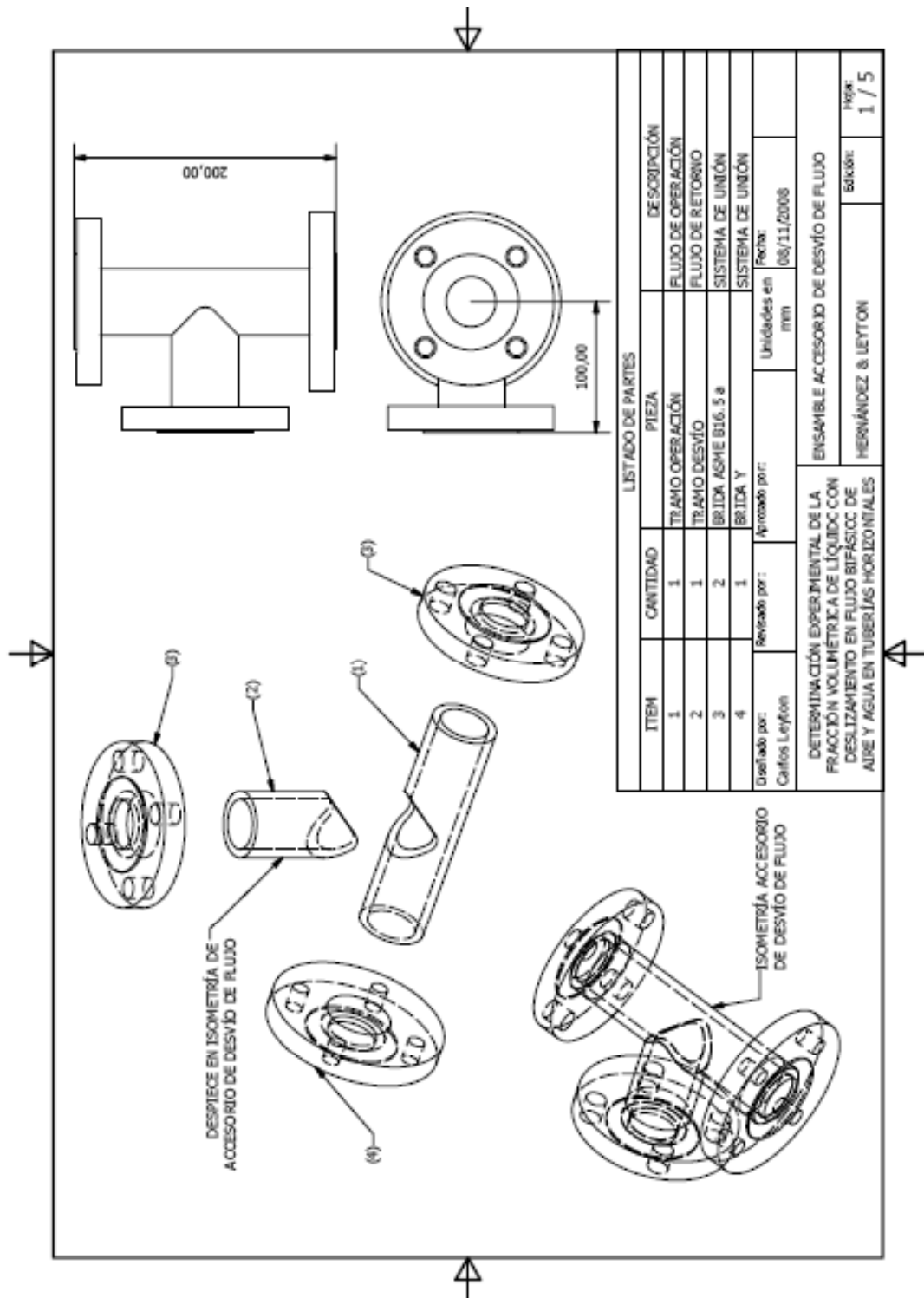


Figura A.1. Planos constructivos de la Sección de desvío de flujo (1/5).

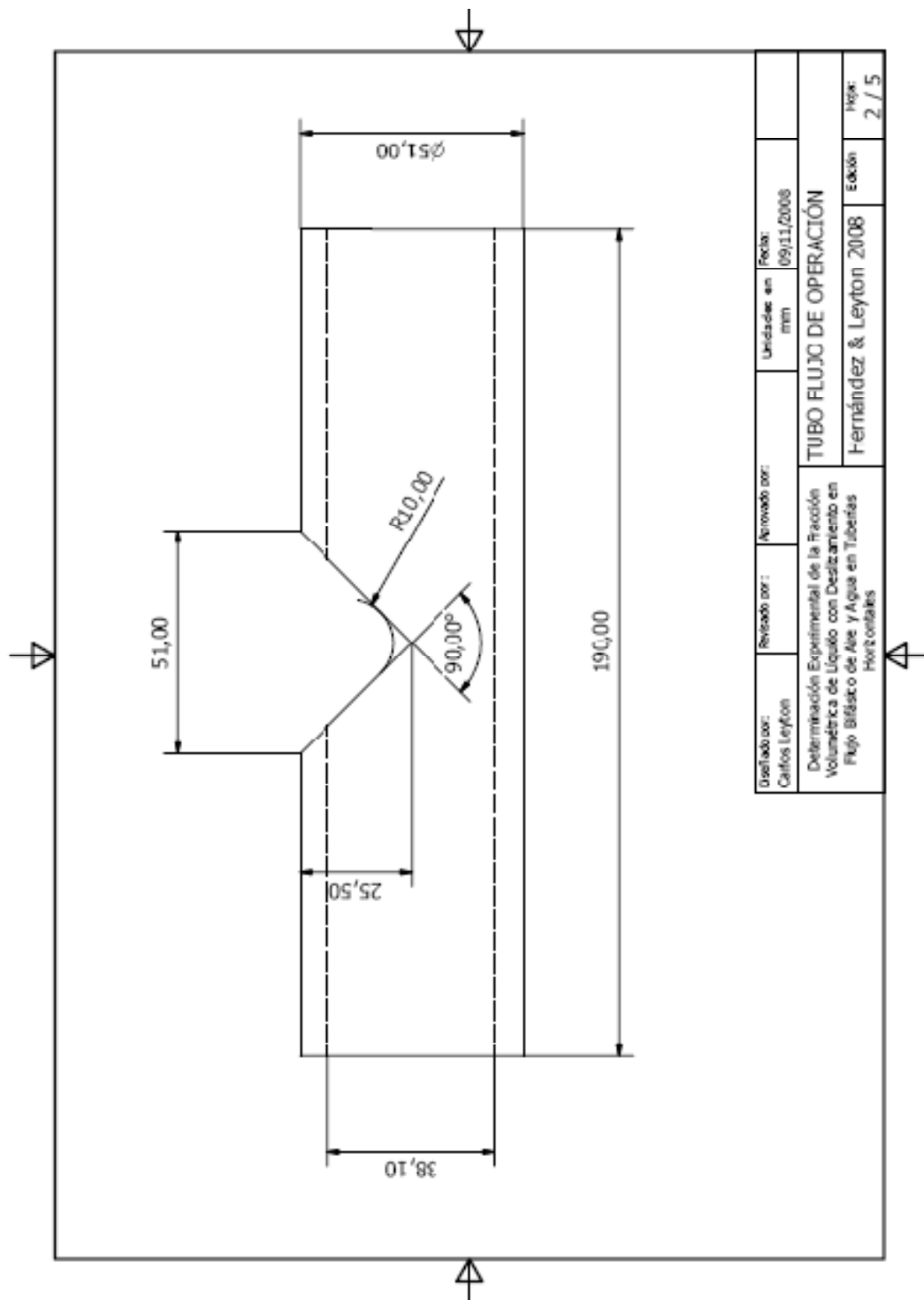


Figura A.2. Planos constructivos de la Sección de desvío de flujo (2/5).

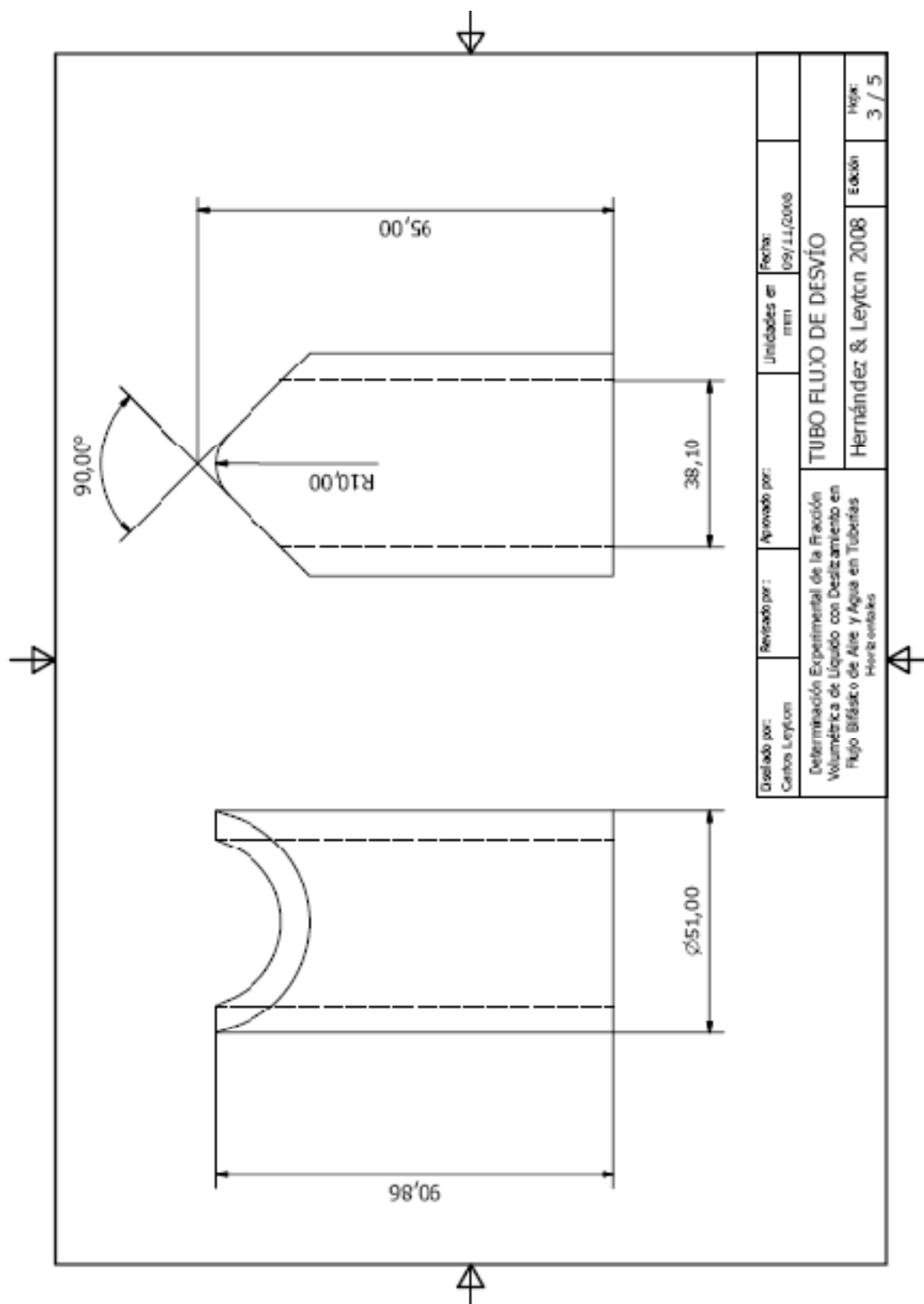


Figura A.3. Planos constructivos de la Sección de desvío de flujo (3/5).

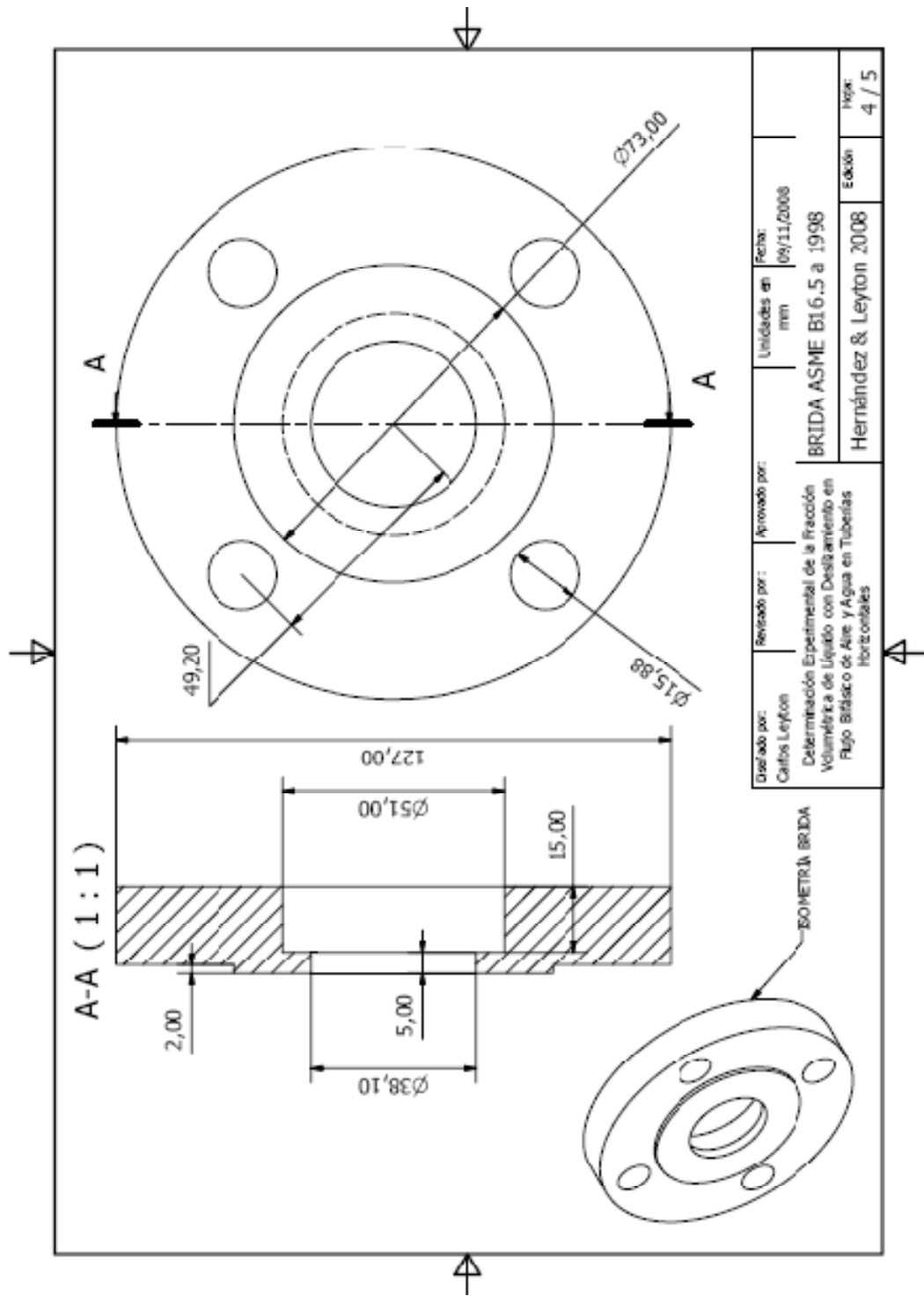


Figura A.4. Planos constructivos de la Sección de desvío de flujo (4/5).

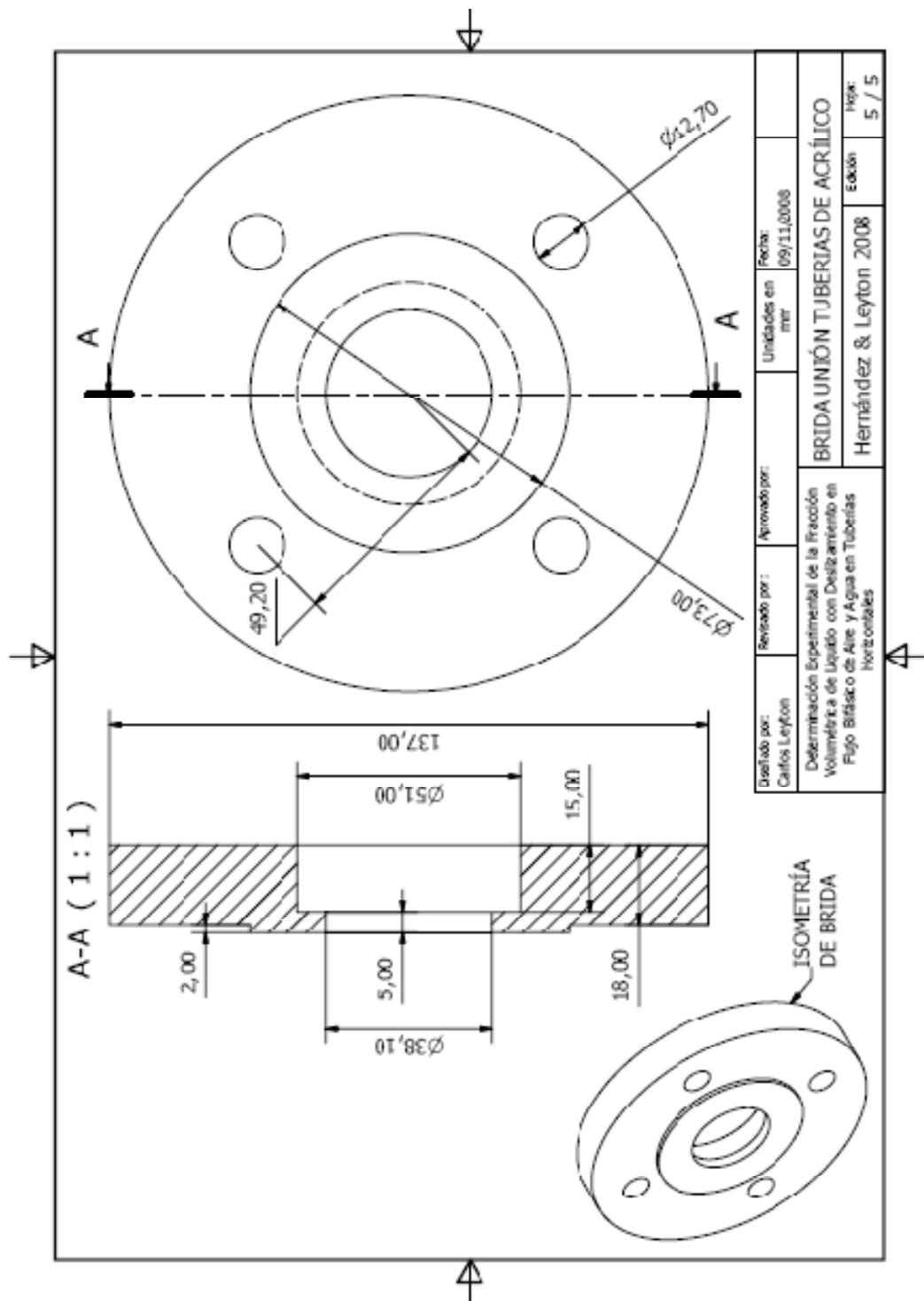


Figura A.5. Planos constructivos de la Sección de desvío de flujo (5/5).

PNEUMATIC TECHNICAL DATA SHEET

RCI 400 Series Actuators



The Remote Control RCI 400 Series offers a lower cost alternative to our highly successful scotch yoke design. The addition of this product broadens Remote Control's ability to satisfy all rotary, pneumatic actuation and fills a positive position within our family of actuators. The rack and pinion design provides constant torque in the double acting version, as required in some valve types, and a linear characteristic in the spring return version. The 400 series Actuators have adjustable travel stops in both directions ± 5 degrees. The use of high quality materials, high standards of manufacturing and attention to detail, make this actuator an excellent choice for most actuation applications.

SPECIFICATIONS

Pressure Range (Working)	30 to 142 PSI
Temperature Range	-4° F to +175° F
Stroke	90° \pm 5°
Media	Dry or lubricating air, non corrosive gas water or light hydraulic oil
Lubrication	None required, all moving parts are factory lubricated for the cycle life of the actuator
Construction	Suitable for indoor or outdoor installation
Mounting Dimensions	ISO standard

FEATURES

- Eleven sizes
- Rack and pinion, double acting, spring return
- Large piston guides and rings minimize cylinder wear for optimum contact between rack and pinion
- Five different break and end torque combinations with adjustable preloaded spring cartridges
- NAMUR solenoid interface
- High interface position for easy installation of both air and electric connections
- Anodized cylinders, epoxy coated end caps fastened with stainless steel for corrosion resistance

TECHNICAL DATA

MATERIALS OF CONSTRUCTION

DESCRIPTION	STANDARD MATERIAL	FINISH
Actuator Body	Extruded aluminum alloy	Anodized
End Cap	Die cast aluminum alloy	Black epoxy coated
Pinion	Carbon steel	ENP
Piston	Die cast aluminum alloy	Natural
Guide	Acetal resin	Natural
"O" Rings	Nitrile	---
Springs	Spring steel	Epoxy coated
Screws & Nuts	Stainless steel	Natural



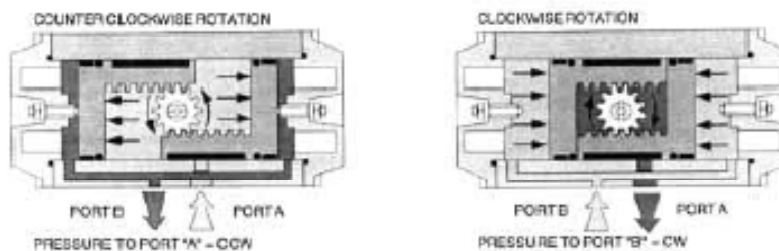
Remote Control Inc. • P.O. Box 255 • North Kingstown, RI 02852
 Phone 401-294-1400 • Fax 401-294-3388 • Email sales@rciactuators.com • Website www.rciactuators.com

Figura A.6. Manual del actuador neumático de las válvulas de cierre rápido (1/6).

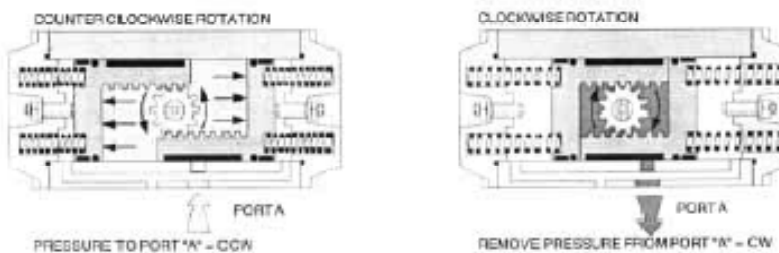
RCI 400 Series TECHNICAL DATA SHEET

OPERATION

DOUBLE ACTING



SINGLE ACTING



SPECIFICATIONS

WEIGHTS

Model (DA)	RCI400	RCI410	RCI420	RCI430	RCI435	RCI440	RCI445	RCI450	RCI455	RCI460	RCI480
LBS.	1.05	1.87	3.57	6.44	9.22	12.92	19.0	24.85	30.1	46.75	94.82
Model (SR)	RCI400	RCI410	RCI420	RCI430	RCI435	RCI440	RCI445	RCI450	RCI455	RCI460	RCI480
LBS.	---	2.38	3.84	6.97	10.28	13.98	21.6	28.9	38.0	54.2	120.2

DISPLACEMENT/STROKE (IN³)

Model (DA/SR)	RCI400	RCI410	RCI420	RCI430	RCI435	RCI440	RCI445	RCI450	RCI455	RCI460	RCI480
Counter Clockwise	2.5	5.2	6.9	13.8	29.4	41.5	61.0	84.7	97.6	190.08	311.04
Clockwise (DA Only)	3.1	6.0	8.6	25.9	34.6	58.8	97.6	131.3	156.2	241.92	518.4

OPENING / CLOSING TIME (SECONDS) AT 80 PSI

Model	RCI400	RCI410	RCI420	RCI430	RCI435	RCI440	RCI445	RCI450	RCI455	RCI460	RCI480
Double Acting	0.5	1	1	1	1	1	1	1.25	1.5	1.5 - 2	3 - 4
Spring Return	---	1	1	1	1.5	1.5	1	1.5	2	2 - 3	4 - 6

Figura A.7. Manual del actuador neumático de las válvulas de cierre rápido (2/6).

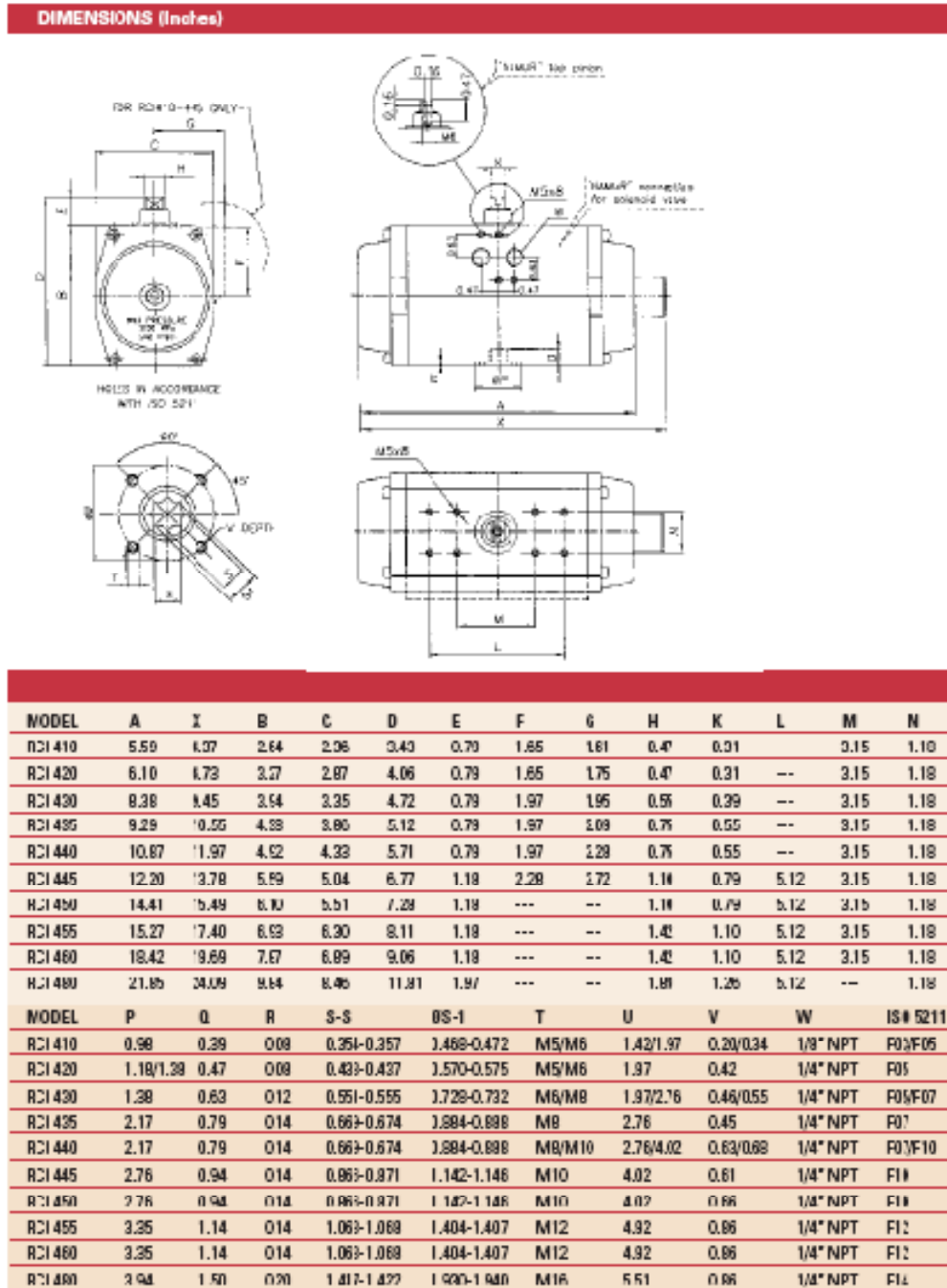
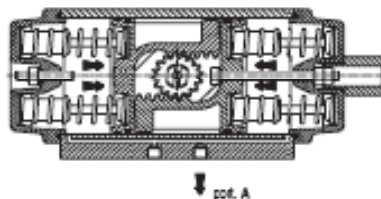


Figura A.8. Manual del actuador neumático de las válvulas de cierre rápido (3/6).

When the air supply is discontinued the springs immediately extend pushing the pistons inward and exhausting the air present in the central chamber via "port A". In this stroke the pinion rotates clockwise permitting the valve to close. "Port B" serves as an exhaust and a breather to atmosphere. It is recommended to use a filter/muffler in order to reduce air noise as well as to prevent dirt or other foreign matter from entering the cylinder.



MOUNTING THE ACTUATORS ON THE VALVE:

Carefully read the following instructions prior to mounting actuator to valve.

Verify that the mounting hole pattern of the actuator matches that of the valve mounting flange or the mounting bracket.

Verify that the dimensions and the position of the actuator female drive match those of the valve stem adaptation (coupling).

Verify that the valve is either open or closed (as required) in order to guarantee alignment between the threaded holes of the actuator and those of the valve.

If the valve is already mounted in the pipeline, make sure that there is no pressure in the line so that the disc will not accidentally be opened or closed.

If the valve is not mounted in the pipeline, after mounting the actuator, check to be sure there is no interference between the actuator and the valve disc during operation.

The 400 series actuator has been designed to be mounted on valves parallel to pipeline as illustrated. The actuators may also be mounted perpendicular to pipeline if space is an issue.

Mounting of the actuator to the valve, may be accomplished directly if the valve is designed for such (see figures 1A and 1B), or by utilizing a bracket and a coupling (see figures 2A and 2B).

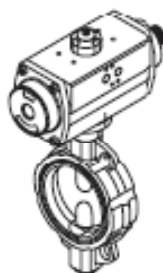


Fig. 1A

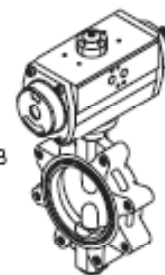


Fig. 1B

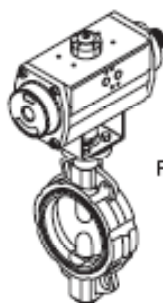


Fig. 2A

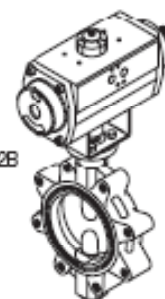


Fig. 2B

Figura A.9. Manual del actuador neumático de las válvulas de cierre rápido (4/6).

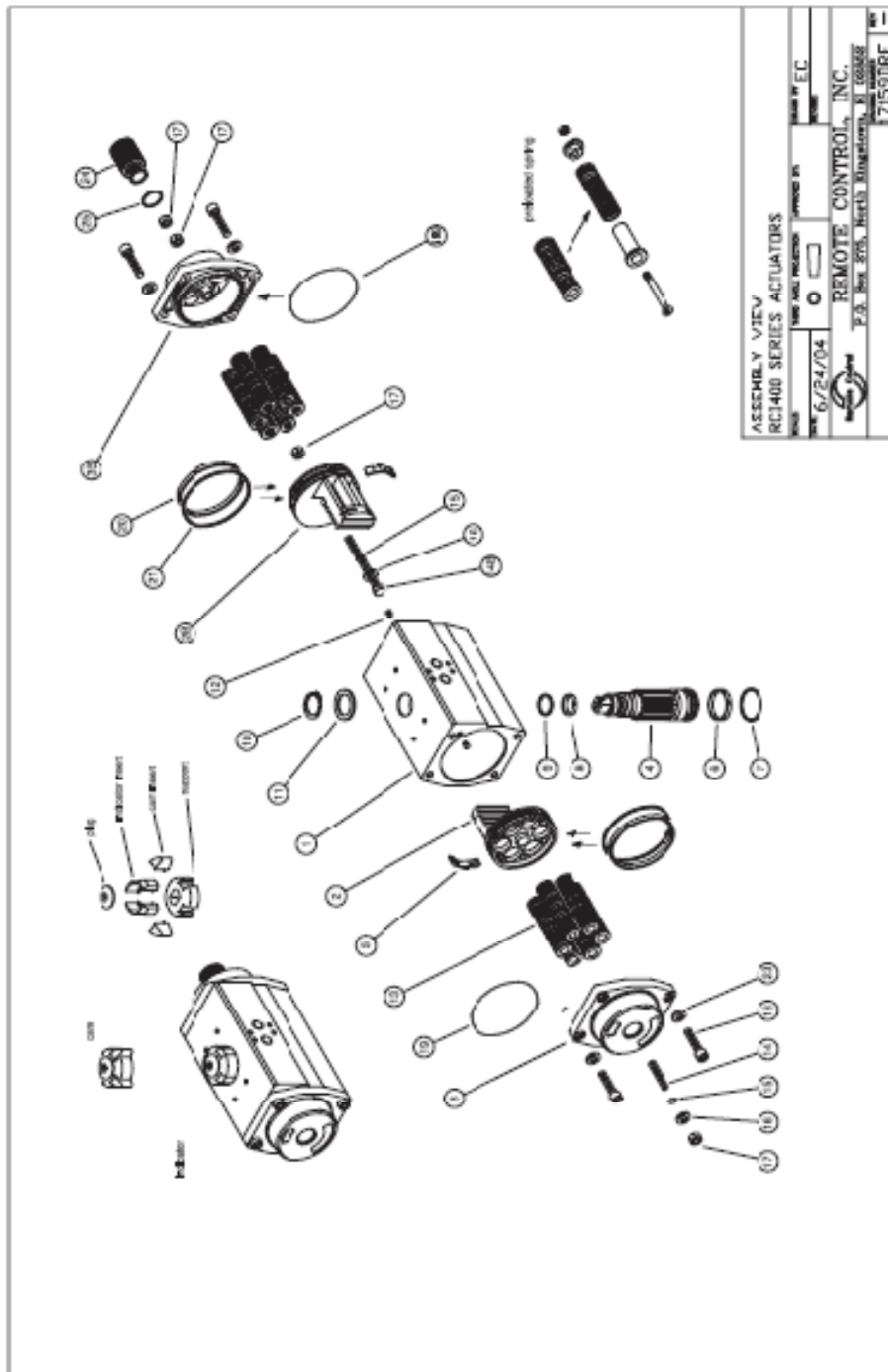


Figura A.10. Manual del actuador neumático de las válvulas de cierre rápido (5/6).

Components List (Standard) Pneumatic Actuator Series APM

Item	Description	Materials	Finished	Qty
1	Actuator Body	Aluminum Alloy	Gold Or Hard Anodized	1
2-2B	Diecast Piston	Aluminum Alloy	Natural	1+1
3-3B	Diecast End Cap	Aluminum Alloy	Black Epoxy Coated	1+1
4	Pinion	Carbon Steel	E.N.P.	1
* 5	Piston Guide	Nylon Pom	N/A	2
* 6	Pinion Guide Ring	Delrin	N/A	1
* 7	O-Ring	Nitrile Rubber BUNA-N	N/A	1
* 8	Pinion Guide Ring	Delrin	N/A	1
* 9	O-Ring	Nitrile Rubber BUNA-N	N/A	1
10	Ret. Rings For Shaft	Stainless Steel	N/A	1
11	Spacer Ring	Nylon	N/A	1
* 12	Plug	Nitrile Rubber BUNA-N	N/A	2
13	Springs	Carbon Steel	Cataphoresis Painting	4-12
14	Regulation Screw	Stainless Steel	N/A	1
14B	Regulation Screw	Stainless Steel	N/A	1
* 15	O-Ring	Nitrile Rubber BUNA-N	N/A	2
16	Washer	Stainless Steel	N/A	2
17	Nut	Stainless Steel	N/A	1+2
18	Screw End Cap	Stainless Steel	N/A	4+4
* 19	O-Ring	Nitrile Rubber BUNA-N	N/A	2
*19B	O-Ring	Nitrile Rubber BUNA-N	N/A	2
* 20	Piston Guide Ring	Delrin	N/A	2
* 21	O-Ring	Nitrile Rubber BUNA-N	N/A	2
23	Washer	Stainless Steel	N/A	4+4
24	Threaded Plug	Aluminum	Anodized	1
* 25	O-Ring	Nitrile Rubber BUNA-N	N/A	1

*Suggested Spare Part List For Maintenance is within Actuator Seal Kits

Figura A.11. Manual del actuador neumático de las válvulas de cierre rápido (6/6).

DIRECT MOUNT ACTUATOR VALVES



ALUMINUM CONSTRUCTION

SERIES C5 NAMUR

3-Way/4 Way Field Convertible Solenoid Valves

General Description

The Versa C5 NAMUR mount control valve is a high flow, 5-port, solenoid/pilot valve. It is designed to mount directly to any NAMUR actuator, thus reducing actuator response time and cost of tubing, fittings, brackets, and labor. Many adaptor kits are available for non-NAMUR actuators. Consult factory for kit availability.



The 5-port design allows the C5 NAMUR to be ordered as either 4-way (for double acting actuators) or 3-way (for spring return or fail-safe actuators). The function of this valve is field convertible utilizing no special tools, gaskets, or sealants. Relocation of a port plug converts a 3-way to a 4-way, or a 4-way to a 3-way. When the 4-way valve is converted to 3-way function, the unused exhaust port becomes an actuator vent into which a filter/muffler can be installed to prevent contaminants from entering either the valve or the actuator.

Single solenoid models (for 2-position control), or double solenoid models (for 2 or 3-position control) are available. Actuator positioning is possible with the use of 3-position valves since all Versa C5 NAMUR valves are leakfree/bubbletight. A complete selection of electrical connections, area classifications, and power requirements makes the most exacting and demanding

specifications or applications easy to satisfy. Manual overrides (guarded-push to operate) are standard on all C5 NAMUR valves. Consult factory for other manual overrides available as an option.

Materials

Valve body and plunger: anodized aluminum (for stainless steel direct mount valve, consult factory)
 Actuating Caps: solenoid—aluminum
 spring cap—synthetic resin
 Valve seals: plunger and body—FKM (fluorocarbon)
 pilot piston—NBR (nitrile)
 valve/actuator mounting O rings— NBR (nitrile)
 Pilot Piston: synthetic resin
 Screws: stainless steel (except valve to actuator = carbon steel)
 Port plug: brass
 Solenoid parts: sleeve, plunger & spring— 304 & 430F stainless steel

coils—epoxy encapsulated with 3 spade terminals (std) or 2 or 3 wire lead (opt)
 coil cover— (When applicable) option—C50 = carbon steel, painted;
 —LB—XN, —LB—XX, —PC, —PC—XN,
 —PC—XX, —XN, —XX= carbon steel,
 zinc chromate plated

Operating Pressures and Weights

Valve Type	Operating Pressure Range ^{††} Pneumatic	Approximate Weights	
		Ordinary Service	Hazardous Service
Single Solenoid/spring return (2-position)	15-115 psi (1-8 bar)	0.8 lbs. (363 gms.)	1.1 lbs. (500 gms.)
Double Solenoid/detented (2-position)	10-115 psi (0.7-8 bar)	1.2 lbs. (545 gms.)	1.8 lbs. (816 gms.)
Double Solenoid/spring centered (3-position)	15-115 psi (1-8 bar)	1.2 lbs. (545 gms.)	1.8 lbs. (816 gms.)

†† Pressure ratings may change based on solenoid option. See page 4.
 MPa = bar
 †††

For higher pressure applications, consult factory.

Porting Size

Inlet and exhaust — 1/4 NPT or G1/4
 Cylinder ports — O ring seal per NAMUR standard (For non-NAMUR actuators, consult factory)

Flow Rates

Cv = 0.75 (Kv = 11) average for all ports (48 SCFM at 100 psi; 82 Nm³/h at 7 bar).
 For actuator speed rates see page 4.

Installation, Filtration and Lubrication

Valves have no limitations on mounting orientation.
 40 to 50 micron filtration and general purpose lubricating oil ISO, ASTM viscosity grade 32 recommended.
 Ambient temperature range 5°F (-15°C) to 125°F (50°C).

Options Suffix

Manual Override: none Standard on basic valves,
 guarded-push to operate.
 All other options see page 4.

C5 NAMUR Valve Product Number Selector

		Basic Valve Number*			
FUNCTION ^{†††}	PORT SIZE	Cv (KV)	SINGLE SOLENOID/SPRING RETURN, 2 POSITION	DOUBLE SOLENOID/ DETENT, 2 POSITION	DOUBLE SOLENOID/SPRING CENTERED, 3 POSITION
					Blocked Center Exhaust Ports Open
4-way	1/4 NPT G1/4	.75 (11)	CGS-4232-NB1-J- (coil code)	CGG-4232-NB1-J- (coil code)	CXX-4232-NB1-J- (coil code)
		.75 (11)	CGS-4230-NB1-J- (coil code)	CGG-4230-NB1-J- (coil code)	CXX-4230-NB1-J- (coil code)
3-way ^{†††}	1/4 NPT G1/4	.75 (11)	CGS-3232-NB1-J- (coil code)	CGG-3232-NB1-J- (coil code)	CXX-3232-NB1-J- (coil code)
		.75 (11)	CGS-3230-NB1-J- (coil code)	CGG-3230-NB1-J- (coil code)	CXX-3230-NB1-J- (coil code)

* All valves include O ring interface seals and #10-24 mounting screws.
 For #10-32 screws change NB1 to NB2. For M5 screws change NB1 to NB3.
 ††† 3-way is the same valve as 4-way, but is provided with a relocated cylinder port plug. See note on page 4.

For coil code see page 4.
 † Add suffix option here, if required.

Figura A.12. Manual de la válvula solenoide de las válvulas de cierre rápido (1/2).

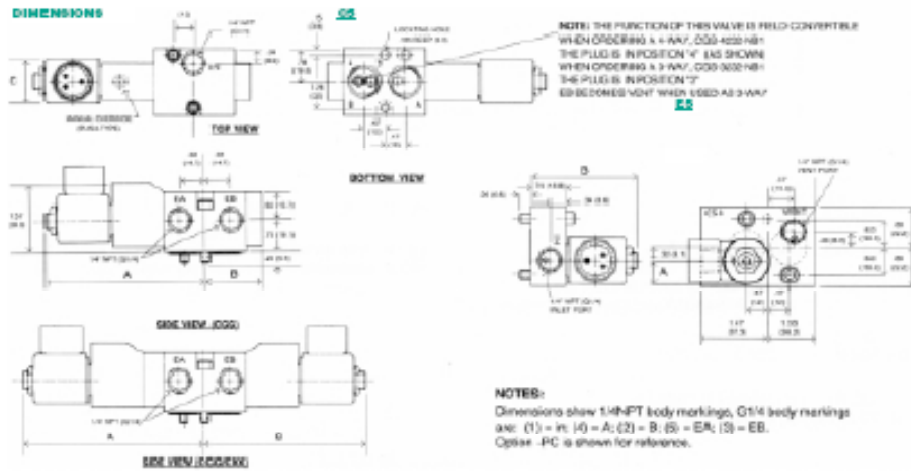
Versa exercises diligence to assure that information contained in this catalog is correct, but does not accept responsibility for any errors or omissions. Versa also reserves the right to change or delete data or products at any time without prior notification. To be sure the data you require is correct, consult factory.



SERIES C5 NAMUR & SERIES E5 NAMUR

VALVE TYPE	DESCRIPTION	SPRING OPTION	VOLTAGE & COIL CODES**		FORMAL COIL POWER
			VALVE TYPE		
			CS	SE	
NOMINAL	Spade Terminal (standard)	None			AC/5.0 W DC/10.5 W
	Spade Terminal NAMUR type connector, coil per PSB	+NC			
SPECIALTY	1/2 NPT conduit, NAMUR type connector	+CC	12VDC (2012)	24VDC (2024)	AC/5.0 W DC/10.5 W
	1/2 NPT conduit, NAMUR type connector	-CC	12VDC (2012)	24VDC (2024)	
SPECIALTY	1/2 NPT conduit, general purpose, NEMA 1 & 2	+CS	12VDC (2012)	24VDC (2024)	AC/5.0 W DC/10.5 W
	1/2 NPT conduit, NAMUR, NEMA 4 & 6C	-CS	12VDC (2012)	24VDC (2024)	
SPECIALTY	Flangeless Location, 1/2 NPT conduit, NEMA 1 & 2, UL listed, CSA approved	-CC	12VDC (2012)	24VDC (2024)	AC/5.0 W DC/10.5 W
	Flangeless Location, 1/2 NPT conduit, NEMA 4, 7 & 8, UL listed, CSA approved	+CC	12VDC (2012)	24VDC (2024)	
SPECIALTY	Flangeless Location, 1/2 NPT conduit, Zone 1 & 2 ATEX, IECEx	-CC	12VDC (2012)	24VDC (2024)	AC/5.0 W DC/10.5 W
	Flangeless Location, 1/2 NPT conduit, Zone 1 & 2 ATEX, IECEx	+CC	12VDC (2012)	24VDC (2024)	
SPECIALTY	Flangeless Location, 1/2 NPT conduit, NEMA 1 & 2, UL listed, CSA approved	-CC	12VDC (2012)	24VDC (2024)	AC/5.0 W DC/10.5 W
	Flangeless Location, 1/2 NPT conduit, NEMA 4, 7 & 8, UL listed, CSA approved	+CC	12VDC (2012)	24VDC (2024)	
SPECIALTY	Flangeless Location, 1/2 NPT conduit, Zone 1 & 2 ATEX, IECEx	-CC	12VDC (2012)	24VDC (2024)	AC/5.0 W DC/10.5 W
	Flangeless Location, 1/2 NPT conduit, Zone 1 & 2 ATEX, IECEx	+CC	12VDC (2012)	24VDC (2024)	
SPECIALTY	Flangeless Location, 1/2 NPT conduit, NEMA 1 & 2, UL listed, CSA approved	-CC	12VDC (2012)	24VDC (2024)	AC/5.0 W DC/10.5 W
	Flangeless Location, 1/2 NPT conduit, NEMA 4, 7 & 8, UL listed, CSA approved	+CC	12VDC (2012)	24VDC (2024)	

* Add option number to basic valve number as suffix.
 ** Add coil codes to end of valve number.
 For other options, voltages, or Versa's Direct Mount NAMUR Subplate for 1/4" Brass V Series, please consult factory.



NAMUR DIMENSIONS: INCHES (mm)											
Valve Type	Standard Coil			Standard Option						JSP	
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B
CS	3.31 (84.2)	3.75 (95.3)	3.90 (99.1)	3.45 (87.6)	3.91 (99.3)	4.21 (107.0)	4.71 (119.7)	5.21 (132.4)	5.71 (145.1)	6.21 (157.8)	6.71 (170.5)
CS-CC	4.21 (107.0)	4.71 (119.7)	5.21 (132.4)	5.71 (145.1)	6.21 (157.8)	6.71 (170.5)	7.21 (183.2)	7.71 (195.9)	8.21 (208.6)	8.71 (221.3)	9.21 (234.0)


ACTUATOR TYPE	ACTUATOR VOLUME (in³ (cm³))									
	CS	CS-CC	CS-CC-PC	CS-CC-PC-PC	CS-CC-PC-PC-PC	CS-CC-PC-PC-PC-PC	CS-CC-PC-PC-PC-PC-PC	CS-CC-PC-PC-PC-PC-PC-PC	CS-CC-PC-PC-PC-PC-PC-PC-PC	CS-CC-PC-PC-PC-PC-PC-PC-PC-PC
5	13	25	38	51	64	77	90	103	116	129
10	26	51	77	103	129	155	181	207	233	259
15	39	77	116	155	194	233	272	311	350	389
20	52	103	155	207	260	312	364	416	468	520
25	65	129	194	260	325	390	455	520	585	650
30	78	155	233	312	391	470	549	628	707	786
35	91	181	272	364	455	546	637	728	819	910
40	104	207	312	413	514	615	716	817	918	1019
45	117	233	350	461	572	683	794	905	1016	1127
50	130	260	390	514	635	756	877	998	1119	1240

For double-acting actuators (open & close), use volumes from selected actuator specifications and the chart for unretarded speed. The times indicated are per shift. For spring return actuators, use open volume to obtain time from chart. Actuator spring loading may affect shift time.
 Slower speeds (adjustable) can always be accomplished by using Versa Bleed Control Valves in the control valve exhaust port.

The above chart represents approximate actuator operation times under average load conditions at 80 psi (5.5 bar). Due to differing designs of quarter-turn actuators, breakaway friction, loading, internal airflow, inlet piping, fittings and exhaust port openings, the values shown are intended as an estimate. Faster or slower times may actually be achieved.



Figura A.13. Manual de la válvula solenoide de las válvulas de cierre rápido (2/2).



Division of
SOLDO
COLLECTORS

SOLDO USA LLC
9470 Mettlen Way
West Chester - Ohio 45066
phone (513) 882 5465
fax (513) 882 5464
e-mail soldo@solldo.net
www.solldo.net

**CR Series
LIMIT SWITCH**
Installation & Operation Manual

Page 1 of 1
Rev. Rev. 03/07/06

WARNING

1. Only suitably trained personnel shall carry out installation in accordance with applicable code of practice.
2. To avoid serious or fatal personal injury or major property damage, read and follow all the instructions in this manual.
3. Hazardous voltage, disconnect all power before servicing equipment.
4. Do not exceed the electrical rating stated on label.
5. Save this instruction.

INSTALLATION

1. CR box is supplied with kit for actuators in accordance to VDI/VDE 845 (130x30 o 80x30). Brackets (1) fits actuators with shaft 20, 30, 40 and 50 mm high.
2. Remove the two brackets (1) from the body of the box. Fit brackets (1) on actuator according to drawing A or B, using screws provided (2). Four screws M5 and four 10-24 x 1/2" screws are provided use the one you need. Place the brackets inside the slots in the body of the box.
3. Align shaft (7) to actuator shaft and engage it.
4. Fit brackets to the box with the 4 screws provided (2).

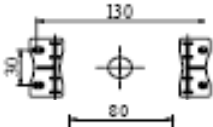
SWITCH ADJUSTMENT & INDICATOR SETTING

1. Loose 4 screws (10) and remove cover (9). Attention: do not rotate indicator (7) when engaged onto retainer.
2. Lift up indicator (7) and cam (5).
3. Turn actuator pinion counter-clockwise.
4. Turn bottom cam (6) until the switch/proximity is activated and then release.
5. Turn actuator pinion clockwise.
6. Insert top cam (5) and turn until switch/proximity is activated.
7. Set indicator (7) according to valve position and engage it smoothly onto retainer.
8. Reassemble cover (9). Warning: check seal (8) is properly fitted in slot. Tighten the 4 screw (10) to fix the cover.

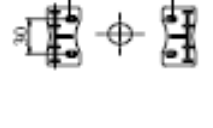
ELECTRICAL WIRING

1. Remove cover (9) according point 1 in Switch Adjustment & Indicator Setting.
2. Remove protection plug from cable entry and substitute them with a cable gland suitable for type of protection required.
3. Connect terminal strip (4) using a screwdriver max 3.5 mm according to the wiring diagram on the label outside the box.
9. Reassemble cover (9) according to point 8 in Switch Adjustment & Indicator Setting.

FOR WIRING DIAGRAM & SWITCHES ELECTRICAL RATING REFERS TO LABEL OUTSIDE THE HOUSING



DRAWING A



DRAWING B

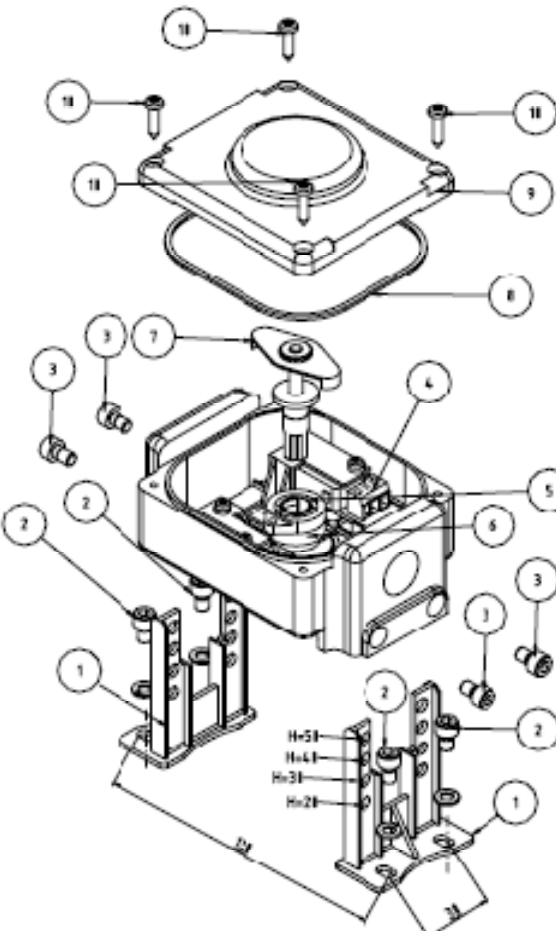


Figura A.14. Manual del interruptor posicionador de válvulas de cierre rápido.

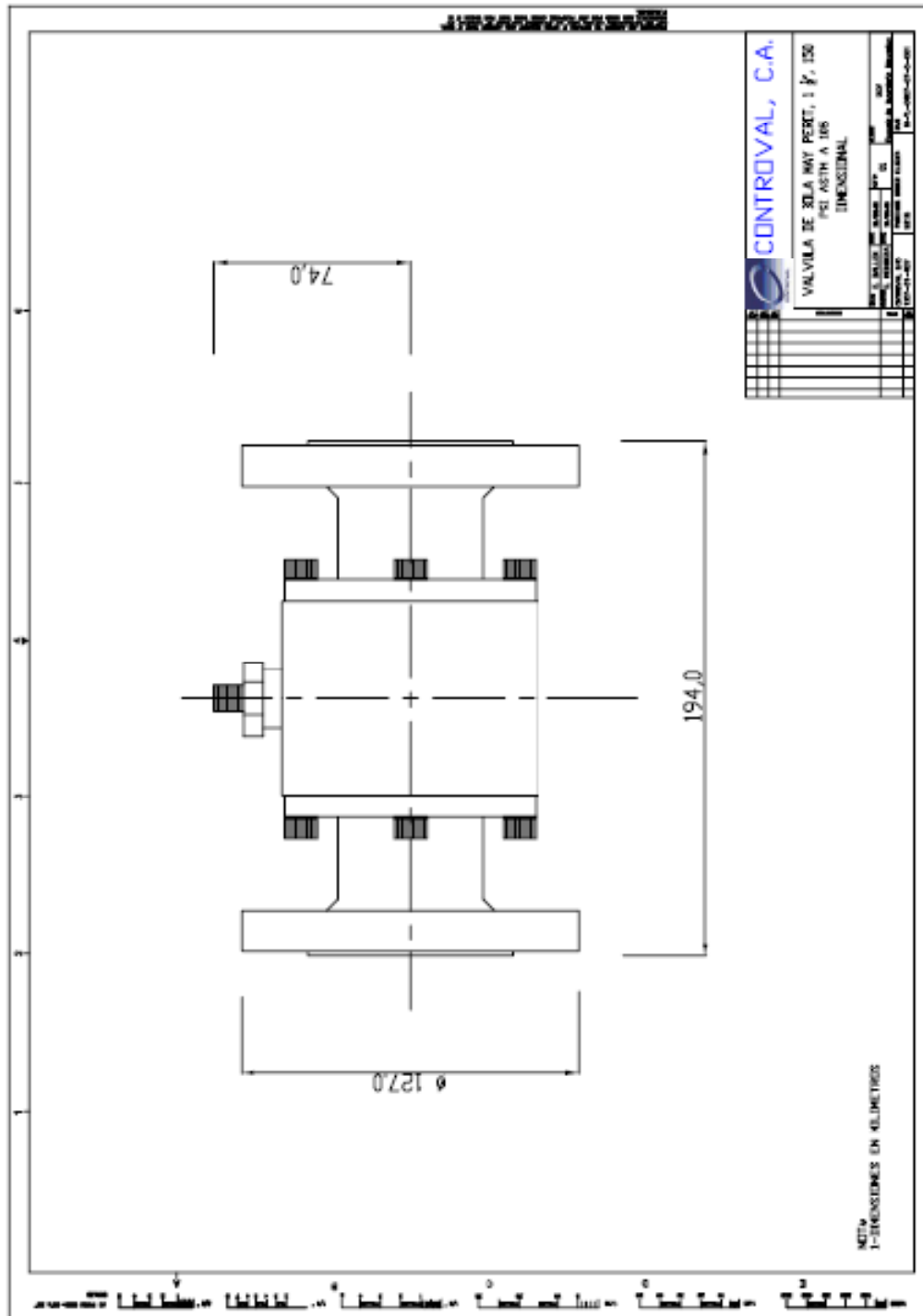


Figura A.15. Dimensiones de la válvula de bola.