

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL EN CAUDALÍMETROS DE  
PRESIÓN DIFERENCIAL PARA FLUJO AGUA-AIRE**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Bachiller.  
González F. Gerardo E.  
Para optar al título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, Noviembre 2015

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **EVALUACIÓN EXPERIMENTAL EN CAUDALÍMETROS DE PRESIÓN DIFERENCIAL PARA FLUJO AGUA-AIRE**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Julio Segura

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Leonardo Cáliz

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Bachiller.  
González F. Gerardo E.  
Para optar al título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, Noviembre 2015



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

Caracas, 05 de Noviembre de 2015

## ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller:

*Gerardo González*

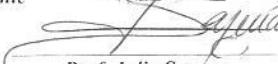
Titulado

*"Evaluación Experimental del Flujo en Caudalímetros de Presión Diferencial para Flujo Agua - Aire"*

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de: *Ingeniero Mecánica*

  
Prof. Johane Bracamonte  
Jurado



  
Prof. Julio Segura  
Tutor

  
Prof. Rodolfo Berrios  
Jurado

## DEDICATORIA

*A mi familia, especialmente a mis padres y hermanos*

*Mi madre Lizbeth Flores*

*Mi padre Efrain González*

*Mi hermano Gustavo González*

*Mi hermano Vicente González*

*Mi novia Lyanne Flores*

## AGRADECIMIENTOS

A dios principalmente por haberme dado la paciencia y fortaleza para culminar el presente Trabajo Especial de Grado.

A la Universidad Central de Venezuela, especialmente a la Escuela de Ingeniería Mecánica y todos sus profesores y compañeros, por haberme transmitido la mejor educación posible, desde el punto de vista técnico y humano para emprender con mayor desempeño una nueva etapa como vida profesional.

A mis tutores el Prof. Julio Segura y el Ing. Leonardo Cáliz, gracias a sus conocimientos, apoyo y la confianza depositada en mi persona pude culminar de manera satisfactoria este Trabajo Especial de Grado.

A mi familia mis hermanos y padre, especialmente a mi madre que siempre ha estado a mi lado. Gracias a su constante apoyo fue posible realizar este proyecto de investigación.

A Lyanne Flores, mi novia que sin duda alguna, gracias a su apoyo incondicional y su gran paciencia al soportarme y a la misma vez ayudarme, me contagio con su gran amor, su alegría, y espíritu de lucha en todo momento.

A mis mejores amigos que siempre estuvieron ahí para apoyarme y ayudarme en todo momento. Luis Quevedo, Luis Hernández, Verónica Palacios, Roberto De Sousa, En estas pocas palabras no es posible agradecer a todos aquellos que contribuyeron con su granito de arena; sin embargo a los muchos que por razones de espacio no puedo mencionar, mi mayor agradecimiento.

A todos los trabajadores de Intevep-PDVSA que sin duda alguna aportaron un granito de arena para la realización del presente TEG, en especial al muy gran amigo Ramón Cabello, por ser un excelente compañero de trabajo y una extraordinaria persona a pesar de su fuerte carácter ya que nunca me subestimó y siempre confió en mí.

**González F. Gerardo E.**

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL EN CAUDALÍMETROS DE PRESIÓN  
DIFERENCIAL PARA FLUJO AGUA-AIRE**

**Tutor Académico:** Prof. Julio Segura. Tesis. Caracas, U.C.V Facultad de Ingeniería.  
Escuela de Ingeniería Mecánica. 2015, 116 pp.

**Palabras clave:** Medidores de Flujo, Placa Orificio, V-cono, Caída de Presión, Gradiente de Presión, Flujo Multifásico, Flujo de Líquido y Gas.

**RESUMEN**

El manejo de flujo multifásico es un fenómeno ampliamente difundido en la industria petrolera, pero su medición sigue siendo un tema de desarrollo e investigación. Su estudio experimental contribuye de manera efectiva a la comprensión de este fenómeno. En este Trabajo Especial de Grado se ha adecuado un banco de ensayos para el estudio experimental de flujo monofásico y flujo bifásico líquido-gas en tubería horizontales, mediante el uso de dos medidores de flujo que trabajan bajo el principio de presión diferencial. Los medidores de flujo utilizados son: V-cono con un diámetro nominal de tubería de 37,85 mm (1,049 plg) y una relación de diámetro ( $\beta$ ) de 0,5516, Placa Orificio con un diámetro nominal de tubería de 37,85 mm (1,049 plg) y un ( $\beta$ ) de 0,7626 para un diámetro de placa ( $d$ ) igual a 20,32 mm (0,8 plg) y también un ( $\beta$ ) de 0,4766 con ( $d$ ) 12,7 mm (0,5 plg), en un rango de velocidades superficiales de líquido de 0,64 a 2,27 m/s y rango de velocidades de gas de 0,0016 a 0,0056 m/s, trabajando bajo un patrón de flujo, burbujas dispersas de gas dentro un flujo de líquido continuo. Se hizo el estudio de la caída de presión de los medidores de flujo tanto en monofásico como en bifásico líquido-gas, de manera que se pudiese observar el comportamiento de cada uno de ellos cuando existe la presencia de gas dentro de un flujo de líquido continuo. Los casos de estudios fueron los siguientes, variando la inyección de gas y manteniendo el flujo de líquido continuo: para relaciones de volumen/volumen líquido-gas de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30% respectivamente. El V-cono generó mejores resultados que con la placa orificio trabajando en flujo bifásico, debido a la poca dispersión en la medición de la caída de presión, fluctuación de esta en función del tiempo y versatilidad en la aplicabilidad del caudal.

**González F. Gerardo E.**

**EXPERIMENTAL EVALUATION IN FLOWMETERS OF DIFFERENTIAL  
PRESSURE FOR BIPHASIC FLOW WATER-GAS**

**Academic advisor:** Teacher Julio Segura. Thesis. Caracas, U.C.V Faculty of  
Engineering. School of Mechanical Engineering. 2015, 116 pp.

**Keywords:** Flowmeters, Orifice Plate, V-cone, Pressure drop, Pressure gradient,  
Multiphase Flow, Liquid and Gas Flow.

**ABSTRACT**

Multiphase flow management is a widespread phenomenon in the oil industry, but its measurement is still a subject of research and development. Its experimental study contributes effectively to the understanding of this phenomenon. In the present investigation a test bench for the experimental study of liquid-phase flow and gas phase flow in horizontal pipe has been adapted by using two flow meters that work on the principle of differential pressure. Flowmeters used are: V-cone with a nominal pipe diameter of 37.85 mm (1.049 inch) and a diameter ratio ( $\beta$ ) of 0.5516, orifice plate with a nominal diameter of pipe 37.85 mm (1.049 inch) and ( $\beta$ ) of 0.7626 for a plate diameter (d) equal to 20.32 mm (0.8 inch) and a ( $\beta$ ) of 0.4766 with (d) 12.7 mm (0.5 inch), over a range of superficial liquid velocities of from 0.64 to 2.27 m / s gas velocity range of from 0.0016 to 0.0056 m / s, working under a pattern flow, gas bubbles dispersed within a continuous flow of liquid. The study of pressure drop in the flow meters both monophasic and biphasic liquid-gas was made, so that could be observed the behavior of each of them when there is the presence of gas within a continuous liquid flow was. Case studies were as follows, by varying the gas injection and maintaining the continuous flow of liquid: to volume ratios / liquid-gas volume of 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% respectively. The V-cone generated better results than the orifice plate with biphasic flow due to poor dispersion in the measurement of the pressure drop, the fluctuation in function of time and the applicability and versatility of the flow.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	vi
ABSTRACT .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE TABLAS .....	xv
LISTA DE NOMENCLATURA, SIMBOLOS Y ABREVIATURA.....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO I</b> .....	3
1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
1.2 OBJETIVOS .....	5
1.2.1 OBJETIVO GENERAL .....	5
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
<b>CAPÍTULO II</b> .....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 ASPECTOS FUNDAMENTALES DE FLUJO MULTIFASICO.....	6
2.1.1 Flujo multifásico .....	6
2.1.2 Medición de flujo multifásico .....	7
2.2 MEDIDORES DE FLUJO .....	7
2.2.1 Placa orificio .....	7
2.2.2 V-Cono.....	11
2.3 FLUJO EN TUBERÍAS.....	13
2.3.1 Patrones de flujo.....	17
2.4 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS .....	20
2.4.1 Gravedad específica .....	21
2.4.2 Densidad.....	21
2.4.3 Viscosidad.....	22
2.5 ECUACIONES FUNDAMENTALES EN LA DINAMICA DE FLUIDO.....	25
2.5.1 Ecuación de continuidad .....	26
2.5.2 Ecuación de Bernoulli .....	27
2.6 VARIABLES COMUNMENTE UTILIZADAS EN FLUJO BIFÁSICO.....	28



2.7	TEORIA DE INSTRUMENTACION Y MEDICION.....	31
2.7.1	Error de medición ( $\delta$ ) .....	32
2.7.2	Error aleatorio ( $\varepsilon$ ) .....	32
2.7.3	Error sistemático ( $\beta^*$ ) .....	32
2.7.4	Incertidumbre .....	32
2.7.5	Incertidumbre asociada al error sistemático (B).....	33
2.7.6	Incertidumbre total (U*) .....	33
2.8	ANTECEDENTES .....	33
	<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>38</b>
3.	MARCO METODOLÓGICO.....	38
3.1	RECOPIACION BIBLIOGRAFICA .....	39
3.2	ADECUACIÓN DEL CIRCUITO EXPERIMENTAL. ....	39
3.2.1	Modificación del banco de prueba .....	39
3.2.2	Calibración de instrumentos.....	40
3.2.3	Verificación del medidor de flujo másico Micromotion.....	44
3.2.4	SISTEMA DE MONITOREO, CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	46
3.2.4.1	Consola (Front Panel) .....	47
3.2.4.2	Diagrama de bloques (Block Diagram) .....	48
3.3	ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	49
3.3.1	Selección de caso de estudio y matriz experimental.....	49
3.3.2	Procedimiento experimental.....	52
	<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>57</b>
4.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	57
4.1	MODIFICACIÓN DEL BANCO DE ENSAYOS .....	57
4.2	CALIBRACIÓN DE TRANSMISORES Y CAUDAÍMETROS .....	67
4.3	COMPARACIÓN DE LA MATRIZ TEÓRICA CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE .....	71
4.4	ESTUDIO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DEL V-CONO Y PLACA ORIFICIO .....	75
4.4.1	Caída de presión vs Flujo volumétrico.....	75
4.4.2	Caída de presión Vs tiempo de captación de muestra.....	77

4.5	DESVIACIÓN DE MEDICIÓN DE LOS MEDIDORES DE FLUJO.....	82
4.6	COMPARACIÓN DE MEDICIÓN DE FLUJO EXPERIMENTAL Y CFX DEL MEDIDOR DE FLUJO V-CONO.....	84
4.7	VALIDACIÓN DEL PATRÓN DE FLUJO CONDICIONADO PARA EL DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES PROPUESTAS.....	87
<b>CAPÍTULO V</b> .....		89
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
5.1	CONCLUSIONES.....	89
5.2	RECOMENDACIONES.....	91
BIBLIOGRAFÍA .....		92
APÉNDICE.....		95
Apéndice A: Descripción y características del Placa Orificio .....		96
Apéndice B: Descripción y características del V-cono.....		98
Apéndice C: Descripción de la bomba.....		100
Apéndice D: Minuta de mesa de trabajo. ....		101
Apéndice E: DTI del banco de ensayos. ....		105
Apéndice F: Curva de calibración de todos los instrumentos. ....		106
Apéndice G: Gráficos de Caída de presión y caudal del PO.....		113
Apéndice H: Isometría del banco de ensayos. ....		116

## LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1 Medidor de Cono.....	4
Figura N° 2 Clasificación de medidores de flujo multifásico .....	7
Figura N° 3 Medidor de flujo placa orificio.....	8
Figura N° 4 Factor de expansión Y para varios gases.....	10
Figura N° 5 Componentes básicos de un sistema de tubería.....	14
Figura N° 6 Región de entrada, flujo en desarrollo y flujo totalmente desarrollado en un sistema de tubería.....	17
Figura N° 7 Patrones de Flujo en Tuberías Horizontales .....	20
Figura N° 8 Gradiente de velocidad de un fluido en movimiento.....	24
Figura N° 9 Áreas de sección transversal que ocupa la fase líquida y la fase del gas.	30
Figura N° 10 Deslizamiento y retraso del líquido.....	31
Figura N° 11 Factor promedio de corrección del coeficiente de descarga a bajos y altos números de Reynolds. ....	35
Figura N° 12 Esquema general de la metodología utilizada .....	38
Figura N° 13 Instrumento de verificación de datos HART-375 .....	40
Figura N° 14 Encendido del HART-375 conectado a un transmisor de señal.....	41
Figura N° 15 Calibrador de procesos FLUKE-725/Multímetro FLUKE-27 .....	42
Figura N° 16 Hoja de post procesamiento que muestra la curva de verificación de un transmisor e indicador de temperatura.....	43
Figura N° 17 Conexión de un transmisor e indicador de presión diferencial con su respectivo módulo de presión.....	44
Figura N° 18 Sistema de monitoreo, control y adquisición de datos del circuito experimental.....	48
Figura N° 19 Matriz experimental de prueba .....	51

Figura N° 20 Hoja de Inicio (Post-Procesamiento).....	54
Figura N° 21 Ubicación y selección de la hoja a procesar .....	55
Figura N° 22 Esquema del circuito experimental de flujo bifásico gas-líquido. ....	63
Figura N° 23 Arquitectura general del sistema de adquisición, supervisión y control del banco de pruebas ubicado en el laboratorio de Noroeste 4. ....	67
Figura N° 24 Representación de los cálculos para verificación del error del transmisor .....	68
Figura N° 25 Curva de verificación de incertidumbre asociada al transmisor TIT-200 .....	68
Figura N° 26 Curva de verificación de medición (Caudal Vs Frecuencia).....	70
Figura N° 27 Incertidumbre asociado a la medición de caudal de del Micromotion y Tanque con respecto al teórico para caudales (6, 9, 12) .....	72
Figura N° 28 Incertidumbre asociado a la medición de caudal de del Micromotion y Tanque con respecto al teórico para caudales (15, 18, 21) .....	73
Figura N° 29 Resultados obtenidos teóricamente y experimentalmente.....	74
Figura N° 30 Representación gráfica de las matrices teóricas y experimentales (Ver Figura N°28).....	74
Figura N° 31 Representación gráfica de la caída de contra el flujo volumétrico del V-cono y Placa O. ....	75
Figura N° 32 Representación gráfica de la caída de contra el flujo volumétrico del V-cono y Placa O identificando todas las fracciones volumétricas de líquido-gas.....	76
Figura N° 33 Comparación de la fluctuación en la señal emitida por el Placa Orificio y el V-cono.....	78
Figura N° 34 Dispersión del flujo a través de la sección transversal de la tubería debido al Cono dentro de la tubería. ....	78

Figura N° 35 Comportamiento de la caída de presión con respecto al tiempo de los puntos comprendidos de (6, 12, 15, 21) gpm, de los medidores de flujo Vcono y Placa Orificio 100% liquido.....	79
Figura N° 36 Comportamiento de la caída de presión con respecto al tiempo de los puntos comprendidos de (6, 12, 15, 21) gpm, de los medidores de flujo V-cono y Placa Orificio para una Rel. v/v 10% .....	79
Figura N° 37 Comportamiento de la caída de presión con respecto al tiempo de los puntos comprendidos de (6, 12, 15, 21) gpm de los medidores de flujo V-cono y Placa Orificio para una Rel. v/v 20% .....	80
Figura N° 38 Comportamiento de la caída de presión con respecto al tiempo de los puntos comprendidos de (6, 12, 15, 21) gpm, de los medidores de flujo V-cono y Placa Orificio para una Rel. v/v 30% .....	80
Figura N° 39 Comportamiento de la caída de presión de los caudalímetros V-cono y Placa Orificio para todas las relaciones de líquido-gas estudiadas. ....	81
Figura N° 40 Comparación experimental en la medición de flujo volumétrico del V-cono y Placa Orificio.....	82
Figura N° 41 Desviación estándar de la caída de presión de todos los valores promedios de cada uno de los puntos evaluados con todas las fracciones volumétricas de líquido-gas del V-cono y placa Orificio. ....	83
Figura N° 42 Comparación del caudal obtenido experimental en función del obtenido en simulación numérica (Botana, 2015) para todas las fracciones volumétricas estudiadas. ....	84
Figura N° 43 Comparación del flujo volumétrico experimental Vs numérica (Botana, 2015) para todas las fracciones volumétricas estudiadas. ....	85
Figura N° 44 Medición de la caída de presión para un valor de caudal respectivo del caudalímetro del tipo V-cono.....	86

Figura N° 45 patrones de flujo obtenidos experimentalmente de las pruebas bifásicas.  
..... 88

Figura N° 46 Mapa de patrones de flujo teórico modelo de Taitel y Dukler (1976)  
para tuberías horizontales..... 88

## LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1 Sistema de unidades para la viscosidad Absoluta y/o dinámica. ....	23
Tabla N° 2 Sistema de unidades para la viscosidad dinámica. ....	24
Tabla N° 3 Características y rangos de transmisores en la línea de gas.....	60
Tabla N° 4 Características y rangos de transmisores en la línea de líquido.....	61
Tabla N° 5 Características y rangos de transmisores en la línea de mezcla.....	62
Tabla N° 6 Rango de operación de flujo de la placa orificio en la sección de gas.....	64
Tabla N° 7 Rango de operación de flujo de la placa orificio en la sección de líquido. .....	65
Tabla N° 8 Especificaciones del variador de frecuencia del circuito.....	66
Tabla N° 9 Especificaciones del actuador asociado a la válvula de control del circuito .....	66
Tabla N° 10 Errores producidos por cada transmisor utilizado en las pruebas.....	69
Tabla N° 11 Errores de medición del Coriolis contra el tanque superior del circuito	70
Tabla N° 12 Incertidumbre asociada a la Comparación en la medición del caudal medido por el Coriolis Vs el tanque.....	71
Tabla N° 13 Incertidumbre asociada en la comparación de los valores proporcionados por el fabricante y obtenidos experimentalmente. ....	85
Tabla N° 14 Incertidumbre asociada en la comparación de los valores proporcionados por el fabricante y los obtenidos con la ecuación característica de la curva experimental. ....	87

## LISTA DE NOMENCLATURA, SIMBOLOS Y ABREVIATURA

$\dot{m}$	Flujo másico de la mezcla
$\dot{m}_l$	Flujo másico de la fase líquida
$\dot{m}_g$	Flujo másico de la fase gaseosa
$\mu$	Viscosidad cinemática
A	Área de la sección transversal de la tubería
A*	Constante utilizado para el cálculo del coeficiente de descarga.
ACFS	Pie cubico por segundo real
AG	Área que ocupa la fase gaseosa en el ducto
AL	Área que ocupa la fase líquida en el ducto
B	Incertidumbre asociada al sistema
Cd	Coficiente de descarga
CFD/CFX	Dinámica de fluido computacional
CIT	Centro de información técnica
CONF	Configuración
COVENIN	Comisión Venezolana de normas Industriales
d	Diámetro del orificio de la placa o diámetro del V-cono
D	Diámetro de la tubería
dP/Dp	Diferencial de presión
DTI	Diagrama de instrumentación y tuberías
Fa	Factor de expansión térmica del material



g	Fuerza gravitacional
Ge	Gravedad específica
gpm	Galones por minuto
h(1-2)	Altura sobre algún nivel de referencia
HART	Transductor direccionable remoto
HG	Fracción de vacío con deslizamiento entre las fases
HL	Fracción volumétrica de líquido con deslizamiento entre las fases
INF	Información
INT	Informe Técnico
INTEVEP	Instituto de Tecnología Venezolana para el Petróleo
K1	Constante de flujo
le/D	Perfil de velocidad en la tubería
m	Masa
MON	Monitoreo
Na	No aplica
P	Presión
PDVSA	Petróleos de Venezuela S.A
PO	Placa Orificio
PRIM	Producción de Infraestructura y Mejoramiento
QG	Flujo volumétrico de la fase líquida
QL	Flujo volumétrico de la fase líquida
Qm	Flujo másico
QM	Flujo volumétrico de la mezcla

$Q_v$	Flujo volumétrico
$Q_{V-Micromotion}$	Flujo volumétrico del coriolis
$Q_{v-tanque}$	Flujo volumétrico acumulado en el tanque de almacenamiento de líquido
R	Constante universal de los gases
$Re$	Numero de Reynold
RIPPET	Red de Información Petrolera y Petroquímica
RMSD	Error cuadrático medio
SAD	Sistema de adquisición de datos.
SMCAD	Sistema de Monitoreo, Control y Adquisición de Datos
T	Temperatura
t	Tiempo
TEG	Trabajo Especial de Grado
$U^*$	Incertidumbre total
UG	Velocidad de la fase gaseosa
UL	Velocidad de la fase líquida
v	Velocidad del fluido
V	Volumen
VI	Instrumento virtual
Y	Factor de expiación (Relación de calores específicos)
$\alpha$	Expansión térmica del material
$\beta$	Relación de diámetro
$\beta^*$	Error sistemático

$\gamma$	Peso específico
$\gamma_G$	Fracción de vacío sin deslizamiento entre las fases
$\gamma_L$	Fracción volumétrica de líquido sin deslizamiento entre las fases
$\delta$	Error de medición
$\Delta h$	Diferencial de presión del tanque
$\Delta v$	Unidad de velocidad
$\Delta y$	Unidad de distancia entre capaz
$\varepsilon$	Error aleatorio
$\eta$	Viscosidad dinámica
$\rho$	Densidad del fluido
$\tau$	Esfuerzo cortante

## INTRODUCCIÓN

El estudio de flujo bifásico gas y líquido a través de un conducto, es una de las combinaciones de flujo más complejas que existen. Esto se debe principalmente a la gran variedad de configuraciones relacionadas con la distribución espacial de ambas fases dentro de la tubería y a que la fase gaseosa es compresible. Estas configuraciones espaciales tienen como nombre patrones de flujo.

De este modo, el trabajo planteado contribuye en primer lugar al estudio de dos medidores de flujo monofásico operando con flujo bifásico líquido-gas (V-cono y Placa Orificio). La placa orificio es uno de los medidores de flujo tradicionales más usados en la industria, debido a su alta precisión y versatilidad a la hora de medir caudales, además de su bajo costo. Pero hoy en día existe un medidor de flujo el cual consta de un cono ubicado centralmente dentro de la tubería, el cual interactúa con el fluido y a la misma vez modifica el perfil de velocidad, trabajando bajo el mismo principio de presión diferencial que los medidores de flujo tradicionales. Los medidores de flujo por presión diferencial ofrecen una solución tecnológica debido a su alta eficiencia y versatilidad al momento de medir caudales, además de tener como ventaja el poco espacio requerido para su instalación, en especial el medidor de flujo V-cono ya que no requiere de tramos rectos largos aguas arriba y aguas abajo del elemento primario para el desarrollo del flujo. Óptimas para ser desarrolladas en plataformas costeras donde el espacio es muy limitado.

Para cumplir con los objetivos planteados en este trabajo se presenta una estructura organizada por capítulos. En el primer capítulo se trata sobre los fundamentos de investigación, el cual está conformado por el planteamiento del problema, los antecedentes pertinentes y los objetivos generales y específicos planteados. El segundo capítulo está compuesto por el marco teórico donde se aclaran y se definen todos los conceptos y fundamentos relacionados al trabajo de investigación. El tercer capítulo contiene el marco metodológico donde se explica de forma detallada y concisa cada uno de los pasos a seguir para llevar a cabo de forma satisfactoria los objetivos planteados. El cuarto capítulo contiene los resultados de cada uno de los

estudios realizados con su discusión respectiva. El quinto capítulo contiene las conclusiones y recomendaciones pertinentes basadas en los resultados obtenidos. Finalmente se listan las referencias bibliográficas utilizadas y se anexan algunos cálculos tipos de interés.

## CAPÍTULO I

### 1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La explotación de un yacimiento de petróleo está conformado por la perforación de numerosos pozos entrelazados entre sí, a través de un múltiple de producción o macolla. La mezcla de los fluidos de producción es llevada hacia una estación de flujo o centro operativo con esquemas de procesos convencionales en tierra o costa afuera. En la industria petrolera el flujo multifásico a lo largo del sistema de producción puede ser cualquier combinación de una fase de gas natural, una fase líquida de hidrocarburo y una fase de agua, con características únicas que crean complicaciones que no se encuentran en otras industrias (Alarcón, 1998).

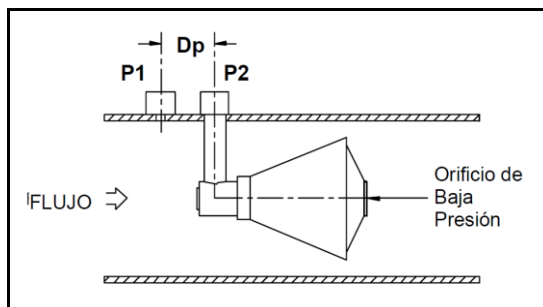
Las estaciones de flujo convencionales disponen de un tren de medición de pozos, que permiten alinear la producción de un pozo en particular, hacia un separador de prueba instrumentado, de manera que se pueda determinar la fracción volumétrica de cada fase de las corrientes de producción (Thorn, Johansen, & Hammer, 1997).

Sin embargo los separadores de prueba son muy costosos, ocupan un gran espacio, que en instalaciones costa fuera puede ser muy valioso, y además exigen largos tiempos de medición para cada pozo debido a que requieren condiciones de flujo estable en el sistema. (Thorn, Johansen, & Hammer, 1997).

Una solución alternativa es proponer el uso de medidores de flujo multifásico, de manera que permita registrar la producción de modo continua sin necesidad de disgregar las fases en un separador de prueba convencional. Esto significaría un ahorro en espacio y peso, especialmente en instalaciones costa afuera. A su vez, los tiempos de prueba de cada pozo pueden ser reducidos de manera significativa con el uso de esta tecnología, pasando entre 10 horas a aproximadamente a 20 minutos (Mehdizadeh y Farchy, 1995). Desde el punto de vista económico es una ventaja significativa ya que se ha demostrado que en instalaciones costa afuera, el uso de medidores multifásicos puede llegar a ser hasta un 47% más económico en

comparación con el uso de separadores de prueba convencionales (Barson, Preedy y Williams, 1993). A su vez, estudios previos han demostrado que con sistemas de medición de flujo multifásico en línea es posible determinar el caudal de cada fase con incertidumbres asociadas menores a  $\pm 5\%$ . (Zhang, Yue y Huang, 2005).

A pesar de que hoy en día, la mayoría del mercado está dominada por los medidores de flujo tradicionales de diferencia de presión como el Venturi o la Placa orificio (Creus, 1998), en el mercado existe un medidor de flujo el cual consiste en un cono ubicado centralmente en la tubería, interactuando con el fluido modificando el perfil de velocidades y, a la vez creando una región de baja presión en la zona posterior del cono donde ocurre la modificación del perfil de velocidad. El diferencial de presión se presenta entre la línea de presión estática, colocando una toma en la pared de la tubería y la línea de baja presión en la parte posterior del medidor, con una toma en el centro del mismo (Ver Figura N° 1), operando con el mismo principio físico de los medidores de flujo por reducción de área como lo son: (Placa orificio, Venturi, tobera). Los medidores de flujo de presión diferencial, ofrecen una solución tecnológica debida a su alta eficiencia y versatilidad al medir caudales, además de tener como ventaja el poco espacio requerido para su instalación, en especial el V-cono ya que se ha demostrado que para su instalación se requiere de 0 a 3 diámetro aguas arriba y de 0 a 1 diámetro aguas abajo del elemento primario, óptimas para ser desarrolladas en plataformas costa afuera donde el espacio es muy limitado (McCrometer, 2008).



Fuente: McCrometer 2008

Figura N° 1 Medidor de Cono.

Por esta razón, INTEVEP S.A. filial de PDVSA propone el desarrollo (mediante la gerencia de Producción de Infraestructura y Mejoramiento), experimental basado en el estudio de dos medidores de flujo monofásico considerando mezclas de flujo bifásico gas-líquido en un circuito experimental de flujo bajo condiciones controladas, en el cual el gas será la fase dispersa dentro de una fase de líquido continua, con el objetivo presentar resultados preliminares referentes a un estudio experimental que se realizará con un medidor de flujo V-cono y un placa orificio. Estos resultados preliminares consisten en una comparación de la medición del flujo volumétrico líquido-gas en base a un diferencial de presión, además se podrá observar que tan afectado se verá caudal cuando hay cierto porcentaje de aire dentro de un flujo continuo de agua.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo General**

Realizar las pruebas experimentales de flujo en caudalímetros de presión diferencial para flujo bifásico agua-aire.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Revisión bibliográfica exhaustiva referente a diseños de banco de ensayos, funcionamiento de caudalímetros de presión diferencial y desarrollo de estudios experimentales en banco de ensayos.
2. Determinar la matriz de prueba a desarrollar en el circuito experimental, a partir de los datos proporcionados por el fabricante y requerimientos del circuito experimental.
3. Realizar la puesta a punto del circuito experimental de flujo bifásico (líquido-gas) según la matriz experimental de pruebas a ser desarrollada.
4. Desarrollar un programa que permitirá controlar y monitorear todas las variables involucradas en el banco de ensayo.
5. Realizar las pruebas experimentales propuestas bajo condiciones de flujo controladas según la matriz experimental de pruebas.



## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ASPECTOS FUNDAMENTALES DE FLUJO MULTIFASICO

El conjunto de condiciones de flujo típicamente conocidas incluye tasas de flujo volumétrico, temperatura y presión de operación, propiedades físicas de los fluidos y diámetro, rugosidad e inclinación de la tubería. Esta información es suficiente para evaluar el comportamiento del flujo monofásico, sin embargo, para el caso del flujo multifásico se requiere adicionalmente de otros datos, como patrones de flujo, deslizamiento y velocidad relativa entre las fases (Shoham, 2005).

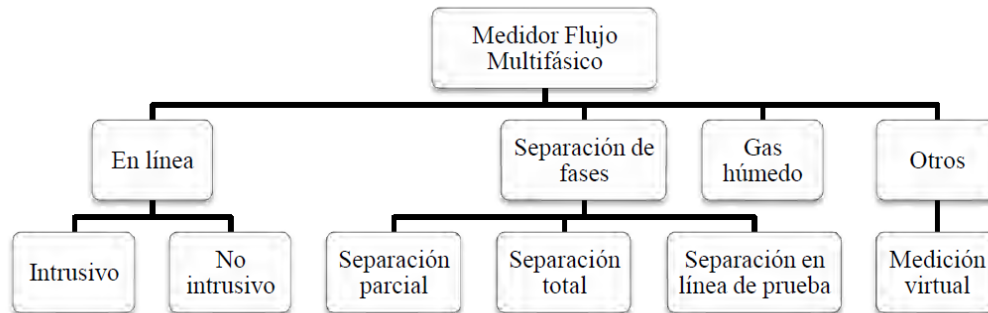
##### 2.1.1 Flujo multifásico

(Falcone et al, 2009) atribuye que el flujo multifásico lo podemos definir como el paso simultaneo a través de un sistema o tubería compuesto por dos o más fases o dos o más líquidos inmiscibles. Los flujos más comunes que podemos encontrar son:

- Flujo bifásico: se refiere al flujo simultaneo de 2 fases a través de un conducto o canal en cualquiera de las siguientes combinaciones:
  - Gas-Líquido.
  - Gas-Sólido.
  - Líquido-Sólido.
  - Líquido-Líquido (para líquidos inmiscibles).
- Flujo trifásico: este se refiere al flujo simultaneo de tres fases a través de un conducto o tubería, las combinaciones de flujo trifásico son:
  - Gas-Líquido-Sólido.
  - Gas-Líquido-Líquido.
  - Líquido-Líquido- Sólido.

### 2.1.2 Medición de flujo multifásico

Un medidor de flujo multifásico es un dispositivo capaz de determinar las tazas volumétricas de cada una de los componentes que forman una mezcla multifásica (Corneliussen *et. al*, 2007). Los medidores de flujo multifásico se pueden clasificar de la siguiente manera:



Fuente: Corneliussen *et al* 2007

Figura N° 2 Clasificación de medidores de flujo multifásico

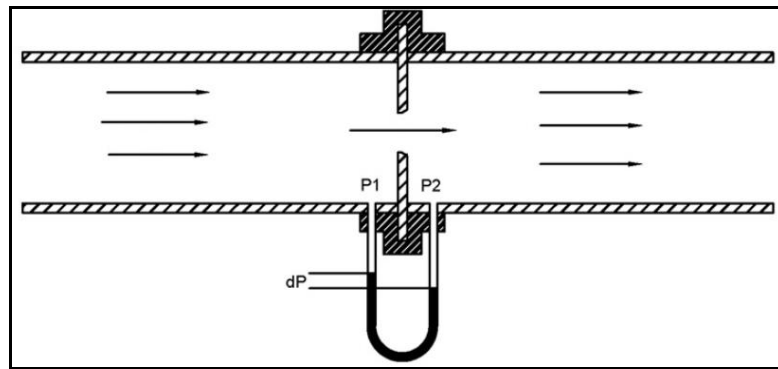
Los medidores de flujo multifásico en línea son capaces de determinar el flujo másico de cada uno de los componentes que forman una mezcla multifásica, sin necesidad de disgregar las fases y sin aplicar estrategias de muestreo en la línea. Este método se ha desarrollado fuertemente a partir de los años 80 como respuesta a la necesidad de la industria petrolera de contar con nuevas tecnologías que faciliten las operaciones costa afuera, reemplazando el uso de separadores de prueba tradicionales y evitando el uso de líneas y múltiples de prueba. Esto traería un ahorro de espacio, peso, tiempo y dinero en las plataformas de producción.

## 2.2 MEDIDORES DE FLUJO

### 2.2.1 Placa orificio

La placa orificio mostrado en la Figura N° 3, es un medidor de flujo la cual trabaja bajo el principio de presión diferencial y se caracteriza por su bajo costo de fabricación, pocas restricciones de instalación, confiabilidad y simplicidad en el diseño y de fácil manejo (Rivas, 2013). La placa de orificio es el elemento primario

para la medición de flujo, es una lámina plana circular con un orificio concéntrico, excéntrico o segmentado y se fabrica de acero inoxidable. La placa de orificio tiene una dimensión exterior igual al espacio interno que existe entre los tornillos de las bridas del montaje. El espesor del disco depende del tamaño de la tubería y la temperatura de operación. El borde del orificio se tornea a escuadra con un ángulo de 90<sup>0</sup> grados, al espesor de la placa se la hace un biselado con un chaflán de un ángulo de 45 grados por el lado de baja presión, el biselado afilado del orificio es muy importante, es prácticamente la única línea de contacto efectivo entre la placa y el flujo, cualquier rebaba, ó distorsión del orificio ocasiona un error del 2 al 10% en la medición, además, se le suelda a la placa de orificio una oreja, para marcar en ella su identificación, el lado de entrada, el número de serie, la capacidad, y la distancia a las tomas de presión alta y baja. (Mateos, 1999).



Fuente: Hollingshead *et. al*, 2011

Figura N° 3 Medidor de flujo placa orificio.

Para la determinación del caudal de flujo es necesario conocer las características de la geometría del dispositivo, la presión diferencial y la densidad del fluido.

Al combinar las dos ecuaciones fundamentales para el estudio de la dinámica de fluidos que son la ecuación de la Energía (o Teorema de Bernoulli) y la ecuación de Continuidad, obtenemos la siguiente ecuación para el cálculo del flujo volumétrico en la fase líquida. (Rivas, 2013).

$$Q_v = \frac{C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^4 \cdot \sqrt{\frac{2(dP)}{\rho}} \quad (1)$$

donde:

$Q_v$ : Flujo volumétrico (líquido)

$\beta$ : Relación de diámetro ( $\beta = d/D$ )

$d$ : Diámetro del orificio

$D$ : Diámetro de la tubería

$C_d$ : Coeficiente de descarga

$dP$ : Diferencial de presión

$\rho$ : Densidad del fluido

El coeficiente de descarga  $C_d$  es un valor de ajuste que compensa la distribución de velocidad y las pérdidas de carga menores que no fueron tomadas en cuenta al obtener la ecuación para el cálculo del flujo volumétrico, su valor depende de la forma en cómo se coloquen las tomas de presión y de un valor que relaciona la velocidad del agua con su viscosidad, este valor se conoce como el número de Reynolds. (Rivas, 2013).

Según la norma ISO-5167-2, el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$C_d = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.216\beta^8 + 0.000521 \cdot \left( \frac{10^6 \beta}{\text{Re}} \right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063 * A) \beta^{3.5 \left( \frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{0.3}} \quad (2)$$

$$A^* = (19000\beta / \text{Re})^{0.8}$$

El flujo volumétrico en placa orificio para gases se puede expresar mediante la misma ecuación usada para líquidos, excepto que debe incluirse el factor de expansión neto  $Y$ .

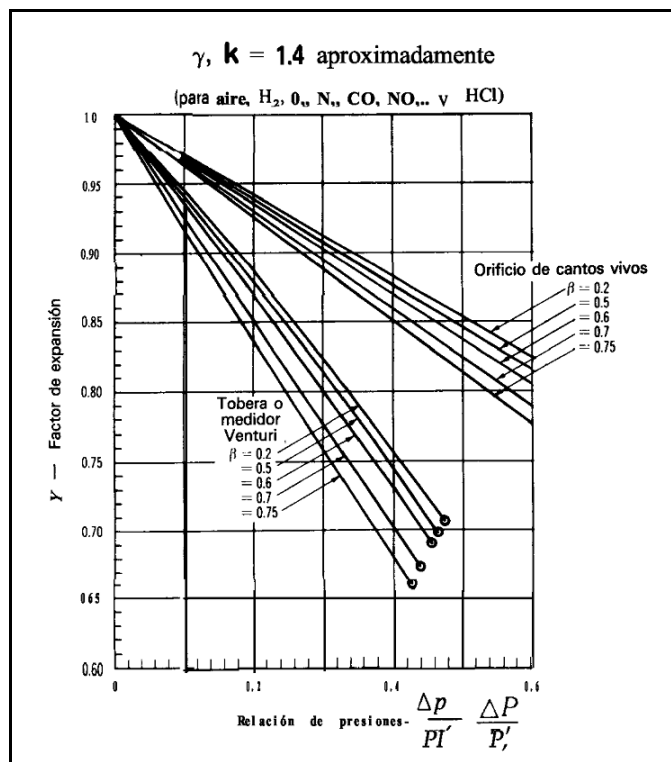
$$Q_v = \frac{Y \cdot C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^4 \cdot \sqrt{\frac{2(dP)}{\rho}} \quad (3)$$

donde:

El factor de expansión Y es función de:

- La relación de calores específicos  $Y(k)$
- La relación  $\beta$
- La relación entre las presiones absolutas de salida y entrada.

Y se puede obtener mediante la siguiente gráfica.



Fuente: Crane, 1997.

Figura N° 4 Factor de expansión Y para varios gases

El caudalímetro placa orificio requiere de tramos rectos aguas arriba y aguas abajo del elemento primario, para garantizar que el flujo este completamente desarrollado (Ver Apéndice A)

### 2.2.2 V-Cono

El V-cono, mostrado en la Figura N° 1, es un medidor de flujo la cual trabaja bajo el principio de presión diferencial y se caracteriza por ser una tecnología que mide flujo de manera precisa en amplios rangos de números de Reynolds, bajo todo tipo de condiciones y para todo tipo de fluidos. Este dispositivo posee dos tomas de presión P1 y P2, dos conos enfrentados de manera opuesta en sus bases; ambos ubicados en el centro de la tubería. La diferencia de presión se medirá, antes de que el fluido entre en contacto con el dispositivo, por una toma de presión en la pared de la tubería, obteniéndose P1 y mediante una toma de presión puesta en el centro del cono para P2. Ésta toma de presión P2 atraviesa toda la estructura del dispositivo, empezando desde la zona posterior donde entra el fluido, hasta la parte inicial del mismo (McCrometer, 2007).

- Cálculos generales.
  - Relación beta del V-Cono

$$\beta = \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{D} \quad (4)$$

donde:

$\beta$ : Relación de diámetro beta.

D: Diámetro interno.

d: Diámetro del cono.

- Constante de flujo

$$k_1 = \frac{\pi}{576} \sqrt{2G_c} \frac{D^2 \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} Cd \quad (5)$$

donde:

$k_1$ : Constante de flujo.

$G_c$ : Gravedad específica (constante).

$Cd$  : Coeficiente de medición de flujo.

- Factor de expansión térmica del material

$$F_a = 1 + 2\alpha(T - 528) \quad (6)$$

donde:

$F_a$ : Factor de expansión térmica.

$T$ : Temperatura de funcionamiento. (R)

$\alpha$  : Expansión térmica del material.  $\alpha_{cone}$  O  $\alpha_{pipe}$

- Cálculo del flujo volumétrico para líquidos.
  - Densidad.

$$\rho = \rho_{water} G_e \quad (7)$$

donde:

$\rho$  : Densidad del líquido.

$\rho_{water}$  : Densidad del agua.

$G_e$  : Gravedad específica.

- Conversión caudal.

$$\text{gpm} = 448.83 \text{ ACF} \quad (8)$$

donde:

gpm: Galones por minuto.

ACFS: Caudal (pie cúbico real por segundo).

- Caudal.

$$ACFS = F_a K_1 \sqrt{\frac{5.197 \Delta P}{\rho}} \quad (9)$$

- Requisitos de instalación.

Debido a su capacidad de aplanar el perfil de velocidad, el V-Cono se puede colocar mucho más cerca de las perturbaciones situadas aguas arriba que otros medidores de Dp. Se recomienda instalar el V-Cono dejando de cero a tres diámetros de tubería recta aguas arriba del instrumento y de cero a un diámetro aguas abajo. Esto puede ser beneficioso para los usuarios que utilizan líneas grandes y costosas, y también para aquellos que sólo disponen de tramos cortos. (McCrometer, 2007) ha realizado pruebas de rendimiento del V-Cono aguas abajo de un codo de 90° y de dos codos de 90° acoplados en diferentes planos. Las pruebas demostraron que el V-Cono se puede instalar junto a codos sencillos o junto a dos codos colocados en planos diferentes sin sacrificar su precisión.

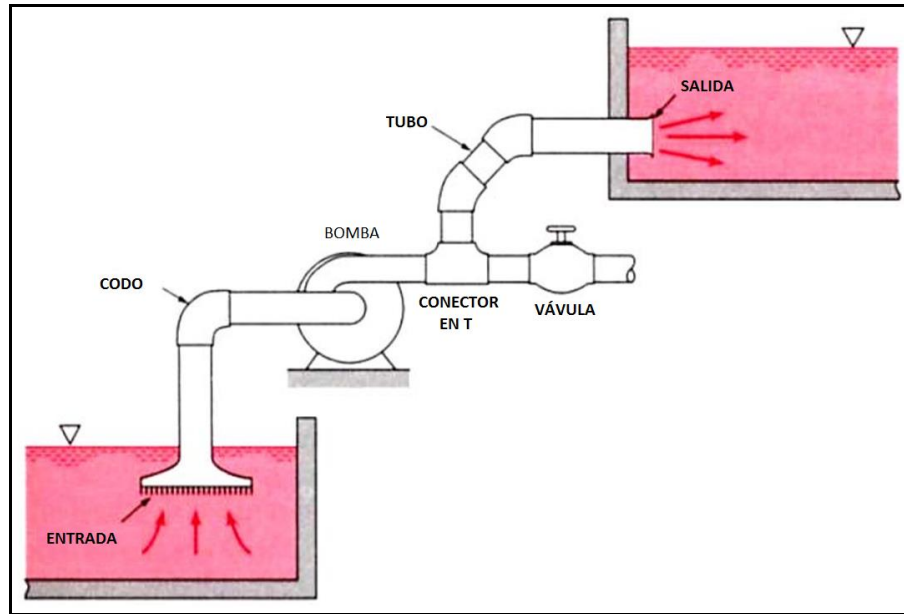
### **2.3 FLUJO EN TUBERÍAS**

El flujo de fluidos se presenta en la vida cotidiana de las personas y en un enorme porcentaje de los procesos industriales, de ahí viene la importancia de conocer el comportamiento del flujo en tuberías o ductos. El flujo se puede definir de manera concreta como el transporte o movimiento de un fluido a través de un conducto. El flujo de un fluido se debe controlar por diversas razones tales como: prolongar la vida de la tubería, estar dentro de los límites de presión de la tubería. La fuerza motriz que moviliza al fluido, es una bomba para líquidos o un compresor para gases. Los conductos varían en geometría, pero de forma general se usan los tubos de sección transversal redonda. (Campos, 2008).

En la Figura N° 5 se muestran algunos de los componentes básicos típicos de un sistema de tubos. Los componentes incluyen a los tubos mismos. Los diversos accesorios usados para conectar a los tubos individuales a fin de formar el esquema



deseado, además de los dispositivos de control de flujo (válvulas) y una bomba que le proporciona energía al fluido. (Campos, 2008).



Fuente: González, 2006

Figura N° 5 Componentes básicos de un sistema de tubería.

Para flujo en tuberías, el parámetro adimensional más importante es el número de Reynolds, el cual se define como la relación de los efectos inerciales y los efectos viscosos en el flujo y se determina mediante la ecuación (10). El número de Reynolds permite conocer el régimen del fluido.

El flujo en una tubería es laminar si  $Re \leq 2100$ , el flujo en una tubería es turbulento si  $Re \geq 4000$ . Para números de Reynolds entre estos límites, el flujo puede cambiar entre condiciones laminares o turbulentas de manera aparentemente aleatoria (Flujo de Transición), (Campos, 2008).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta} = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (10)$$

donde:

Re : Número de Reynolds.

$\rho$  : Densidad del fluido.

$v$ : Velocidad del fluido.

$\eta$ : Viscosidad dinámica.

$\nu$ : Viscosidad cinemática.

D: Diámetro interno de la tubería.

La región de flujo cerca del sitio en el que el fluido entra al tubo se denomina región de entrada. Como se muestra en la Figura N° 6. El fluido por lo general entra a la tubería con un perfil de velocidad casi uniforme en la (sección 1 de la Figura N° 6), a medida que el fluido se desplaza por la tubería, los efectos viscosos hacen que se adhiera a la pared de la tubería debido a la condición de no deslizamiento. Lo anterior se cumple sin importar que el fluido sea aire relativamente no viscoso o aceite muy viscoso. (Campos, 2008).

Así, a lo largo de la pared de la tubería se produce una capa límite en donde los efectos viscosos son importantes, de modo que el perfil de velocidad inicial cambia con la distancia a lo largo de la tubería hasta que el fluido llega al final de la longitud de entrada (sección 2 de la Figura N° 6) más allá de la cual el perfil de velocidad no varía en la dirección axial. El grosor de la capa límite ha aumentado hasta llenar por completo la tubería. Los efectos viscosos son considerablemente importantes dentro de la capa límite. Para el fluido fuera de la capa límite (dentro del núcleo no viscoso que rodea la línea central de 1 a 2 de la Figura N° 6, los efectos viscosos son insignificantes. (Campos, 2008).

La forma del perfil de velocidad en la tubería y la región de entrada  $l_e$ , dependen de si el flujo es laminar o turbulento. Así como con muchas otras propiedades del flujo en tuberías, la longitud de entrada adimensional,  $(l_e/D)$ , se correlaciona con el número de Reynolds. Las longitudes de entrada características están dadas por las Ecuaciones (11) y (12).

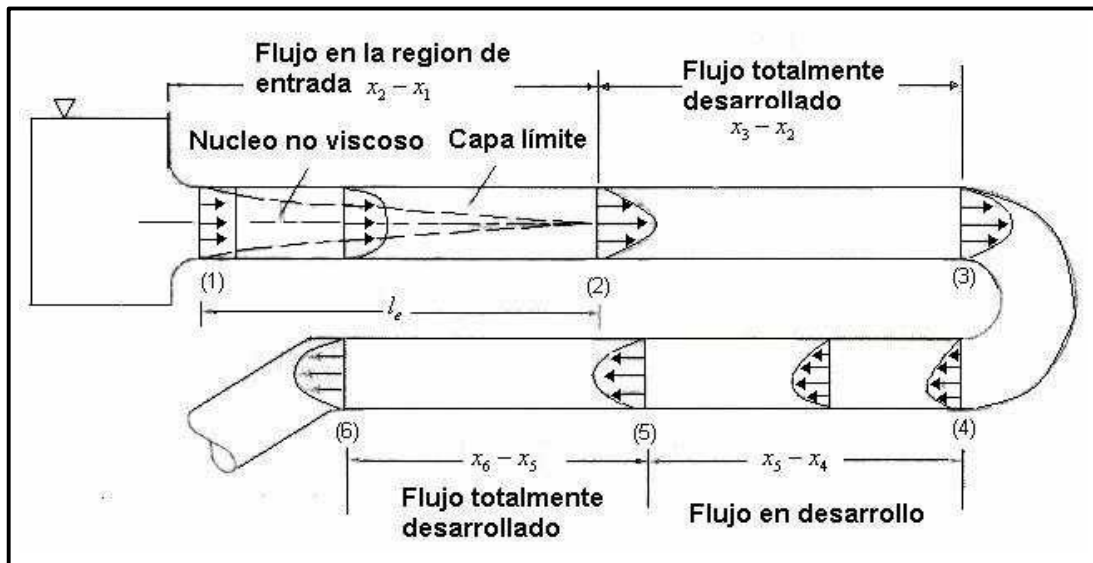
$$\frac{l_e}{D} = 0.06 \text{Re} \quad \text{Para flujo laminar} \quad (11)$$

$$\frac{l_e}{D} = 4.4(\text{Re})^{\frac{1}{6}} \quad \text{Para flujo turbulento} \quad (12)$$

Para flujos con muy bajo número de Reynolds la longitud de entrada puede ser bastante corta ( $l_e = 0.6D$ , Si  $\text{Re} = 10$ ), en tanto, para fluidos con un gran número de Reynolds puede asumir una longitud de muchos diámetros de tubería antes de llegar al final de la región de entrada ( $l_e = 120D$  Si  $\text{Re} = 2000$ ), (Campos, 2008).

El cálculo del perfil de velocidad y de la distribución de presión dentro de la región de entrada es bastante complejo, sin embargo, una vez que el fluido llega al final de la región de entrada (sección 2 de la Figura N° 6) es más fácil describir el flujo, porque la velocidad es función solo de la distancia a la línea central,  $r$ , y es independiente de  $x$ . Lo anterior es cierto hasta que la tubería cambia de alguna manera, como un cambio en el diámetro, o el fluido circula a través de un codo, válvula o algún otro componente en la sección 3 de la Figura N°6. (Campos, 2008).

El flujo entre (2) y (3) se denomina totalmente desarrollado. Más allá de la interrupción del flujo totalmente desarrollado (en la sección 4 de la Figura N° 6), el flujo comienza gradualmente a regresar a su carácter totalmente desarrollado (sección 5 de la Figura N° 6), y continúa con este perfil hasta llegar al siguiente componente del sistema de tubos (Sección 6 de la Figura N° 6). (Campos, 2008).



Fuente: González, 2006

Figura N° 6 Región de entrada, flujo en desarrollo y flujo totalmente desarrollado en un sistema de tubería.

Gran parte de los medidores de flujo, sobre todo los de presión diferencial requieren que se garantice la condición de flujo desarrollado para que la medición sea confiable. Para mayor detalle en el apéndice N°1, se muestra el cálculo de la longitud de desarrollo de los medidores de flujo placa orificio y V-cono.

### 2.3.1 Patrones de flujo

La diferencia fundamental entre el flujo monofásico y el bifásico es la distribución de las fases en la tubería, la cual puede tomar una variedad de configuraciones que dependen de la geometría de las fases de gas y líquido en el ducto. Dichas configuraciones se llaman patrones de flujos a los cuales se les asignan nombres descriptivos. Existen varias técnicas para determinar los patrones de flujo, que van desde la observación visual directa hasta el uso de rayos X, pasando por las técnicas fotográficas. La determinación del patrón de flujo existente en un sistema bifásico no es obvia y generalmente depende de una interpretación individual del observador. (Shoham, 2005).

El patrón de flujo existente en un sistema de flujo de dos fases determinada depende de las variables que se enumeran a continuación:

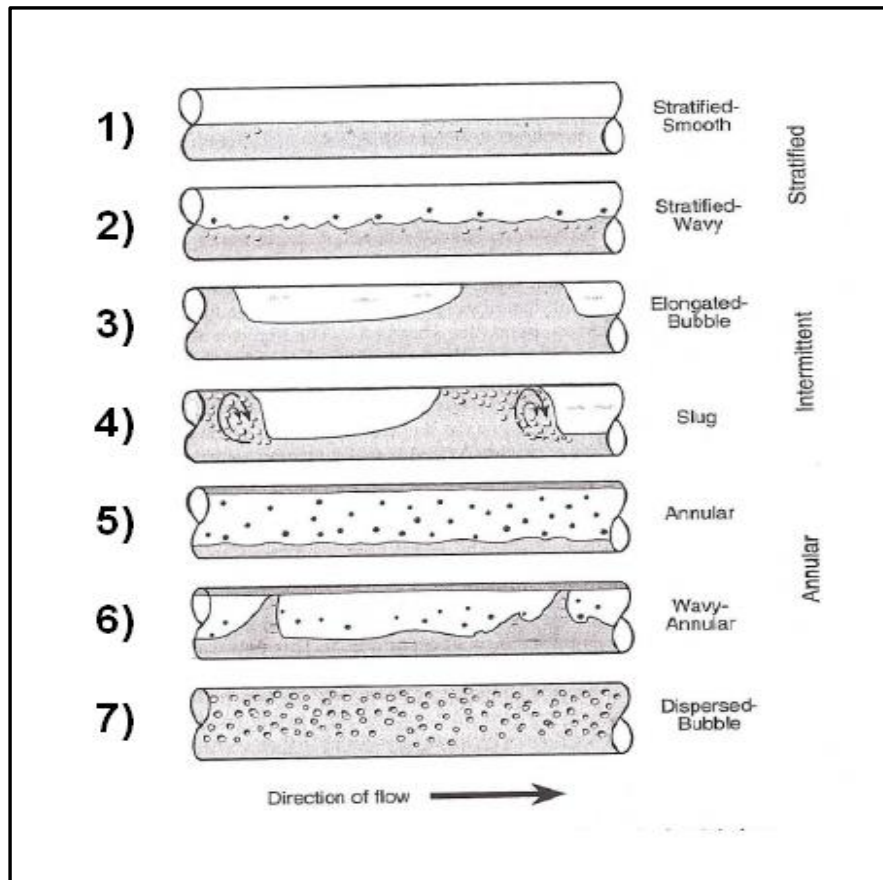
- Parámetros de funcionamiento, es decir, gas y tasas de flujo de líquido.
- Las variables geométricas, incluyendo diámetro de la tubería y el ángulo de inclinación.
- Las propiedades físicas de las dos fases (es decir, las densidades de gases y líquidos, viscosidades, y la tensión superficial).

La determinación del patrón de flujo es un problema importante para el análisis de flujos bifásicos. De hecho todas las variables que están involucradas en el manejo de flujo bifásico dependen en gran medida del patrón de flujo existente. Estas variables de diseño son el gradiente de presión, retención de líquido, los coeficientes de calor y transferencia de masa y la velocidad de reacción química. (Shoham 2005)

**Patrones de flujo en tuberías horizontales:**

- Flujo estratificado (Stratified Flow (**ST**)): Este patrón de flujo ocurre a una tasa relativamente baja de gas y líquido. Las dos fases están separadas por la gravedad, fluyendo la fase líquida por la parte baja de la tubería mientras que la fase de gas fluye por la parte superior. El patrón de flujo estratificado está subdividido en Estratificado Liso, éste se produce cuando la interface de gas-líquido es lisa, y Estratificado Ondulado, éste ocurre a altos caudales de gas, en el cual la onda estable se forma en la interface. (Ver Figura N° 7) (1-2).
- Flujo intermitente (Intermittent Flow (**I**)): 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. (Ver Figura N° 7) (3-4).

- Flujo anular (Anular Flow (**A**)): El flujo anular ocurre a grandes caudales de gas. La fase de gas fluye en el núcleo de alta velocidad, el cual puede contener gotas de líquido arrastradas. El líquido fluye como una capa delgada alrededor de la pared de la tubería. La película inferior de la tubería es usualmente más gruesa que la superior, dependiendo de la magnitud relativa de los caudales de gas y de líquido. En el más bajo caudal de gas, la mayoría del líquido fluye en la parte inferior de la tubería, mientras ondas inestables aireadas son barridos alrededor de la periferia de la tubería y mojan ocasionalmente la parte superior de la tubería. (Ver Figura N° 7) (5-6).
- Flujo de burbujas dispersas (Dispersed Bubble Flow (**DB**)): La fase gaseosa está 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 ((Ver Figura N° 7).



Fuente: Shoham, 2005

Figura N° 7 Patrones de Flujo en Tuberías Horizontales

## 2.4 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Los fluidos son sustancias que abundan en la naturaleza, su uso es común en la vida cotidiana, de ahí la importancia de conocer su comportamiento tanto en reposo como en movimiento. El manejo de los fluidos es indiscutible cuando se recuerda cómo se da el abastecimiento de agua a las grandes ciudades. Además del agua, el ser humano utiliza actualmente tanto en la industria como en el hogar otros fluidos tales como aire, gasolina, gas, petróleo, entre otros (Campos, 2008).

Los fluidos, como todos los materiales tienen propiedades físicas que permiten caracterizar y cuantificar su comportamiento así como distinguirlos entre sí. Algunas de estas propiedades son exclusivas de los fluidos y otras son típicas de todas las sustancias. Características como la viscosidad solamente se pueden definir en los

fluidos, sin embargo la densidad y el peso específico son propiedades de sólidos y fluidos. El conocimiento de las características, propiedades y la dinámica de los fluidos es necesario para diseñar adecuadamente ductos que sirvan de transporte para los mismos, bombas, compresores, aviones, automóviles, sistemas de bombeo, así como elementos de medición de flujo (Campos, 2008).

### 2.4.1 Gravedad específica

La gravedad específica es la razón de la densidad de una sustancia a la densidad del agua a 4°C, también es la razón del peso específico de una sustancia al peso específico del agua a 4 °C. En notación matemática. (Mott, 1996). Estas definiciones de gravedad específica (sg), se calculan mediante la siguiente ecuación.

$$G_e = \frac{\gamma_s}{\gamma_w \cdot @ 4^\circ C} = \frac{\rho_s}{\rho_w \cdot @ 4^\circ C} \quad (13)$$

donde:

Ge: Gravedad específica.

$\gamma$  : Peso específico.

$\rho$  : Densidad.

El subíndice “s” se refiere a la sustancia cuya gravedad específica se va a determinar, y el subíndice “w” se refiere al agua. Las propiedades del agua a 4 °C son constantes, y tienen los siguientes valores:

$$\gamma_w @ 4^\circ C = 9.81 \cdot (kN/m^3) = 62.4 \cdot (lb / pies^3)$$

$$\rho_w @ 4^\circ C = 1000 \cdot (kg/m^3) = 1.94 \cdot (slugs / pies^3)$$

### 2.4.2 Densidad

Se denomina densidad a la relación que existe entre la masa de una sustancia cualquiera y el volumen que ocupa, para el caso de un fluido no compresible, se expresa mediante la siguiente ecuación. (Soldovieri, 2009).



$$\rho = \frac{m}{V} \quad (14)$$

donde:

$\rho$ : Densidad del fluido.  $\rightarrow [m/V]$ ; (m: masa, V: Volumen.)

m: Masa de la sustancia.

V: Volumen que ocupa la sustancia.

Para el caso de un fluido compresible considerado como gas ideal, se determina mediante la siguiente ecuación. (White F. 2012)

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (15)$$

donde:

P: Presión a la que se encuentra sometido el fluido.

R: Constante universal de los gases.

T: Temperatura a la que se encuentra sometido el fluido.

### 2.4.3 Viscosidad

Viscosidad, propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza. La fuerza con la que una capa de fluido en movimiento arrastra consigo a las capas adyacentes de fluido determina su viscosidad. Es importante tomar en cuenta que esta propiedad depende de la temperatura, la composición y la presión del fluido. (Mott, 1996).

Existen dos tipos de viscosidad, los cuales se explican a continuación.

- **Viscosidad absoluta:** Representa la viscosidad dinámica del líquido y es medida por el tiempo en que tarda en fluir a través de un tubo capilar a una determinada temperatura, siendo muy utilizada para fines prácticos. Sus unidades pueden ser visualizadas en la Tabla N° 1. Y se determina mediante la siguiente ecuación. (Mott, 1996).

$$\eta = \frac{\tau}{\Delta v / \Delta y} = \tau \left( \frac{\Delta y}{\Delta v} \right) \quad (16)$$

donde:

$\eta$  : Viscosidad dinámica.

$\tau$  : Esfuerzo cortante.

$\Delta y$  : Unidad de distancia entre capas (m). Ver Figura N° 8

$\Delta v$  : Unidad de velocidad.  $\rightarrow [l/t]$ ; (l: longitud. t: Tiempo) (ver Figura N° 8)

Tabla N° 1 Sistema de unidades para la viscosidad Absoluta y/o dinámica.

Sistema de unidades	Viscosidad dinámica
Sistema Internacional (SI)	$N.s/m^2 = Pa.s$ ó $kg/(m.s)$
Sistema tradicional de USA	$lb.s/pie^2$ ó $slug/pie.s$
Sistema (cgs)	$poise = dina.s/cm^2 = g/(cm.s) = 0.1.Pa.s$ $centipoise = poise/100 = 0.001.Pa.s = 1.0.mPa.s$

- **Viscosidad cinemática:** Representa la característica propia del líquido desechando las fuerzas que genera su movimiento, obteniéndose a través del cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad del producto en cuestión. Sus unidades pueden ser visualizadas en la Tabla N° 2. Y se determina mediante la siguiente ecuación. (Mott, 1996).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (17)$$

donde:

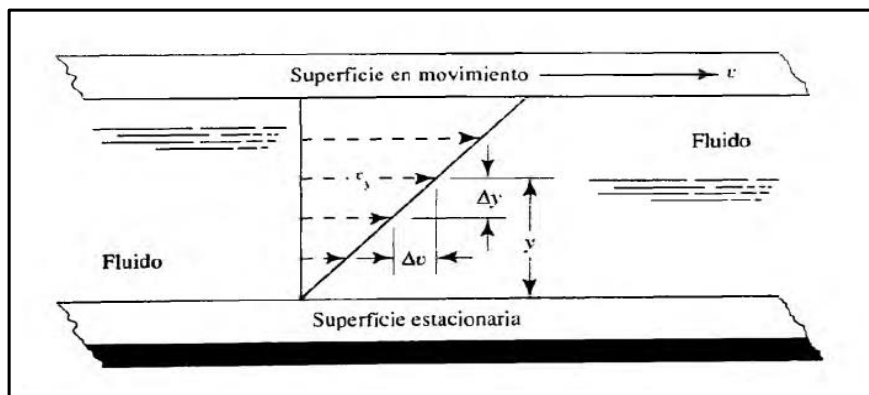
$\nu$  : Viscosidad cinemática.

$\eta$  : Viscosidad dinámica.

$\rho$  : Densidad del fluido.

Tabla N° 2 Sistema de unidades para la viscosidad dinámica.

Sistema de unidades	Viscosidad cinemática
Sistema Internacional (SI)	$m^2 / s$
Sistema tradicional de USA	$pie^2 / s$
Sistema (cgs)	$stoke = cm^2 / s = 1 \times 10^{-4} m^2 / s$ $centistoke = stoke / 100 = 1 \times 10^{-6} m^2 / s = 1 . mm^2 / s$



Fuente: Mott, 1996

Figura N° 8 Gradiente de velocidad de un fluido en movimiento.

## 2.5 ECUACIONES FUNDAMENTALES EN LA DINAMICA DE FLUIDO

La cantidad de fluido que pasa por un sistema por unidad de tiempo puede expresarse por medio de tres términos distintos:

- Flujo volumétrico: es el volumen de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.

El flujo volumétrico se determina mediante la siguiente ecuación.

$$Q_v = A \cdot v \quad (18)$$

donde:

Q: Flujo volumétrico.  $\rightarrow [l^3 / t]$ ; (l: longitud. t: Tiempo)

A: Área de la sección transversal.

v: Velocidad promedio del fluido.

- Flujo másico: es la masa de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.

El flujo másico se determina mediante la siguiente ecuación.

$$Q_m = Q_v \cdot \rho \quad (19)$$

donde:

$Q_m$ : Flujo másico.  $\rightarrow [m / t]$ ; (m: masa, t: Tiempo)

$Q_v$ : Flujo volumétrico.

$\rho$ : Densidad del fluido.

La ecuación de Continuidad y la ecuación de Bernoulli son dos ecuaciones usadas fundamentalmente para estudiar la dinámica de los fluidos. La primera trata sobre la conservación de la masa, y la segunda sobre la conservación de la energía de un fluido. Es muy importante conocer estas ecuaciones y lo que representan, para resolver problemas sobre fluidos, así también como para dimensionar los medidores de flujo por presión diferencial (Mott, 1996).

### 2.5.1 Ecuación de continuidad

Para un flujo estable, la masa de fluido que circula por un conducto en cualquier sección a través del tiempo es constante, siempre y cuando no se almacene, se agregue o retire fluido. Esto se debe a que masa de un fluido que atraviesa una sección transversal por unidad de tiempo es  $(\rho \cdot v \cdot A)$ , entonces se tiene que la ecuación de continuidad para cualquier fluido es la siguiente:

$$Q_{m1} = Q_{m2} = \rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 \quad (20)$$

donde:

$Q_{m1-2}$ : Flujo másico.

$\rho$ : Densidad del fluido.

A: Área de la sección transversal.

$v$ : Velocidad promedio del fluido.

Los subíndices 1-2 establecen cualquier sección por la que pasa el fluido en cierta cantidad de tiempo.

La densidad puede variar con el tiempo dependiendo de las condiciones de presión y temperatura del fluido, sin embargo para un fluido incompresible la ecuación de continuidad se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{v1} = Q_{v2} = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (21)$$

donde:

$Q_{v1-2}$ : Flujo volumétrico.

A: Área de la sección transversal.

$v$ : Velocidad promedio del fluido.

Los subíndices 1-2 establecen cualquier sección por la que pasa el fluido en cierta cantidad de tiempo (Mott, 1996).

La ecuación de continuidad enuncia que para un flujo estable el flujo volumétrico es el mismo en cualquier sección.

### 2.5.2 Ecuación de Bernoulli

La dinámica de los fluidos está regida por el mismo principio de la conservación de la energía para los sólidos en movimiento. Este último fue aplicado a los fluidos por el físico suizo Daniel Bernoulli (1700-1782), obteniendo como resultado una ecuación muy útil en este estudio, que se conoce con su nombre.

En la ecuación de Bernoulli, se destacan cuatro parámetros importantes; presión ( $P$ ), densidad ( $\rho$ ), velocidad ( $v$ ) y altura ( $h$ ) sobre algún nivel de referencia, ya que estos parámetros influyen en la energía contenida en el fluido. Para un flujo estable, viscoso e incompresible se tiene la siguiente ecuación.

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (22)$$

En vista a que los subíndices 1 y 2 se refieren a dos puntos arbitrarios, la (22) se puede enunciar en forma más simple mediante la siguiente ecuación:

$$P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constante} \quad (23)$$

donde:

$P$ : Se le denomina energía de presión, y representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una sección.

$\rho gh$ : Es la energía potencial del fluido tomando un nivel de referencia.

$\frac{1}{2} \rho v^2$ : Es la energía cinética del fluido.

La ecuación de Bernoulli toma en cuenta los cambios en la carga de elevación, carga de presión y carga de velocidad entre dos puntos en un sistema de flujo de fluido. Se supone que no hay pérdidas o adiciones de energía entre los dos puntos, por lo que la carga total permanece constante.

Por lo que la ecuación de Bernoulli es aplicable a bastantes problemas prácticos, también hay limitaciones que debemos conocer a fin de aplicarla con propiedad.

- Es valida solo para fluidos incompresibles, porque se supone que el peso específico del fluido es el mismo en las dos secciones de interés.
- No puede haber dispositivos mecánicos que agreguen o retiren energía del sistema entre las dos secciones de interés, debido a que la ecuación establece que la energía en el fluido es constante.
- No puede haber transferencia de calor hacia el fluido o fuera de éste.
- No puede haber pérdida de energía debido a la fricción.

En realidad ningún sistema satisface todas estas restricciones. Sin embargo, hay muchos sistemas donde se utiliza la ecuación de Bernoulli, y solo se generan errores mínimos (Mott, 1996).

## 2.6 VARIABLES COMUNMENTE UTILIZADAS EN FLUJO BIFÁSICO

Para el estudio de flujo bifásico (líquido-gas) se ha establecidos términos especiales. (Mahmoud, (2007)).

A continuación se hará referencia a las variables utilizadas en este trabajo.

### (i) Tasa de flujo másico

Es la magnitud que expresa la variación de la masa en el tiempo y se expresa mediante la siguiente ecuación (Mahmoud, (2007)):

$$\dot{m}_m = \dot{m}_L + \dot{m}_G \quad (24)$$

donde:

$\dot{m}_m$ : Flujo másico total  $\rightarrow [m/t]$ ; (m: masa, t: Tiempo)

$\dot{m}_L$ : Flujo másico de liquido

$\dot{m}_G$ : Flujo másico del gas.

**(ii) Tasa de flujo volumétrico de la mezcla**

Es el volumen de fluido que pasa por una superficie dada en un tiempo determinado y se expresa mediante la siguiente ecuación (Mahmoud, (2007)):

$$Q_M = Q_L + Q_G \quad (25)$$

donde:

$Q_M$  : Flujo volumétrico de la mezcla.  $\rightarrow [V/t]$ ; (V: Volumen. t: Tiempo)

$Q_L$  : Flujo volumétrico de la fase líquida.

$Q_G$  : Flujo volumétrico de la fase de gas.

**(iii) Velocidad de la fase líquida**

$$U_L = \frac{Q_L}{A_L} \quad (26)$$

donde:

$U_L$  : Velocidad de la fase líquida.  $\rightarrow [l/t]$ ; (l: longitud, t: Tiempo)

$A_L$  : Área que ocupa la fase líquida en el ducto.

**(iv) Velocidad de la fase gaseosa**

$$U_G = \frac{Q_G}{A_G} \quad (27)$$

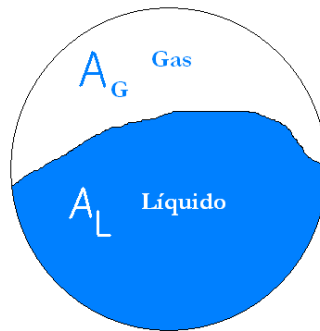
donde:

$U_G$  : Velocidad de la fase de gas.  $\rightarrow [l/t]$ ; (l: longitud, t: Tiempo)

$A_G$  : Área que ocupa la fase de gas en el ducto.

En la Figura N° 9 se puede observar con mayor claridad las áreas  $A_L$  y  $A_G$ .





Fuente: Mahmoud, (2007).

Figura N° 9 Áreas de sección transversal que ocupa la fase líquida y la fase del gas.

**(v) Fracción volumétrica de líquido**

- Con deslizamiento entre las fases

Fracción de volumen que ocupa la fase líquida de la mezcla, cuando existe deslizamiento entre las fases (Mahmoud, 2007).

$$H_L = \frac{A_L}{A} \quad (28)$$

donde:

$H_L$  : Fracción volumétrica de líquido con deslizamiento.

$A_L$  : Área que ocupa la fase líquida en la tubería.

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

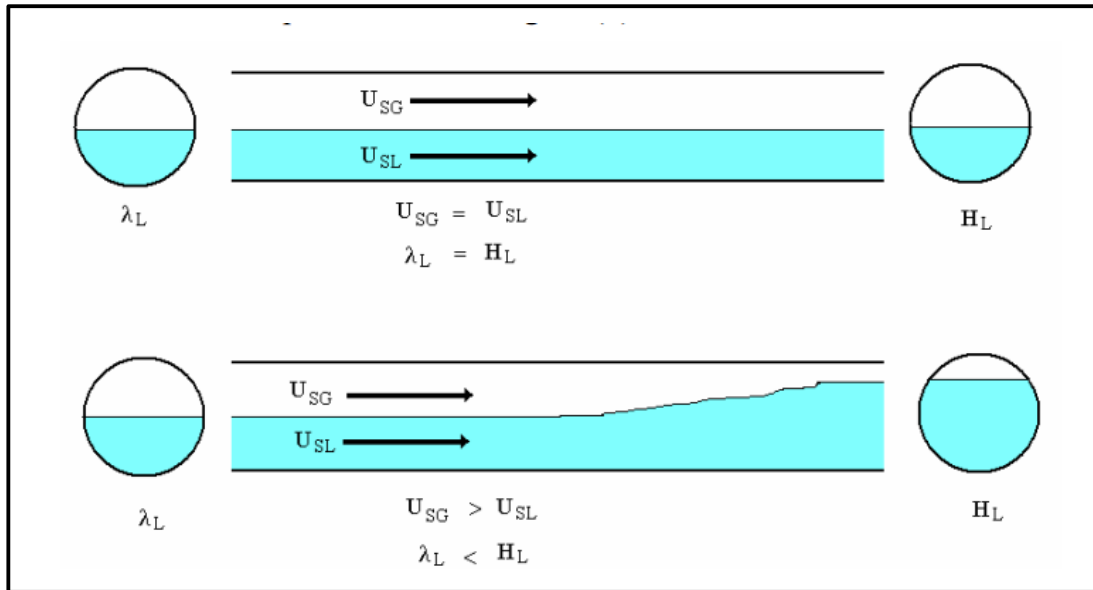
- Sin deslizamiento entre las fases.

Fracción volumétrica ocupada por la fase líquida cuando no hay deslizamiento entre las fases. Esto ocurre cuando ambas fases fluyen a la misma velocidad (Mahmoud, 2007).

Como no existe deslizamiento entre las fases, entonces  $U_G = U_L$ , y la fracción volumétrica de líquido sin deslizamiento se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda_L = \frac{A_L}{A} = \frac{U_{SL}}{(U_{SL} + U_{SG})} \quad (29)$$

Y se puede representar en forma esquemática mediante la Figura N° 10



Fuente: Mahmoud, 2007

Figura N° 10 Deslizamiento y retraso del líquido.

#### (vi) Fracción de vacío

- Con deslizamiento entre las fases [ $H_G$ ]

$$H_G = \frac{V_G}{V} = 1 - H_L \quad (30)$$

- Sin deslizamiento entre las fases [ $\lambda_G$ ]

$$\lambda_G = \frac{V_G}{V} = 1 - \lambda_L \quad (31)$$

## 2.7 TEORIA DE INSTRUMENTACION Y MEDICION

Al momento de trabajar con datos experimentales, es necesario emplear técnicas de análisis y propagación de incertidumbres. Estas técnicas se rigen bajo ciertas normas, como la ASME PTC 19.1.1998 y la norma ISO/TS21748. A continuación

definiremos algunos conceptos necesarios para la realización de este trabajo experimental.

### **2.7.1 Error de medición ( $\delta$ )**

Todo trabajo experimental presenta errores de medición que vienen asociados con una incertidumbre, que representa la desviación del valor real y el valor medido. Sabiendo que el valor real es desconocido, la magnitud de este error no puede ser calculada exactamente, sólo puede ser estimado. El error total es la combinación de dos errores conocidos como: error aleatorio y error sistemático (ASME, 1998).

### **2.7.2 Error aleatorio ( $\varepsilon$ )**

Es una fracción del error total que varía con cada medición, es decir el error total aleatorio se calcula basado en el error aleatorio individual de cada medición, y puede venir dado por condiciones ambientales, métodos de medición, ruido en las mediciones, entre otros (ASME, 1998).

### **2.7.3 Error sistemático ( $\beta^*$ )**

Es una fracción del error total que se mantiene constante en repetidas mediciones, y pueden surgir por errores de calibración del instrumento, sistema de adquisición de datos, técnicas de reducción de datos, etc. (ASME, 1998).

### **2.7.4 Incertidumbre**

Puesto que cada observación o medición es la combinación del valor real del parámetro más el error total de medición, existe una incertidumbre inherente en el uso de mediciones para representar el valor verdadero. La incertidumbre total en una medición es la combinación de incertidumbre debido a un error sistemático y la incertidumbre debido al error aleatorio (ASME, 1998).

### 2.7.5 Incertidumbre asociada al error sistemático (B)

Dado que el error sistemático no puede ser calculado exactamente, la incertidumbre asociada a éste sólo puede ser estimada. Existen diferentes técnicas para lograr esto, y son llevadas a cabo por los fabricantes de los instrumentos, entregándose esta información en las fichas técnicas de los equipos (ASME, 1998).

### 2.7.6 Incertidumbre total (U\*)

Viene dada por la combinación de la incertidumbre asociada al error aleatorio ( $\varepsilon$ ) y la incertidumbre asociada al error sistemático ( $\beta$ ). Si se supone que:

- a) El intervalo de 95% de confianza es apropiado.
- b) Si el número de mediciones es suficientemente grande (mayor a 30).
- c) La incertidumbre asociada al error sistemático proviene de una distribución de valores normalmente distribuidos.

Entonces se puede calcular un intervalo de incertidumbre para 95% de confianza usando la ecuación (32) (ASME, 1998).

$$U_{95} = 2 \sqrt{\left(\frac{B}{2}\right)^2 + \left(S_{\bar{x}}\right)^2} \quad (32)$$

## 2.8 ANTECEDENTES

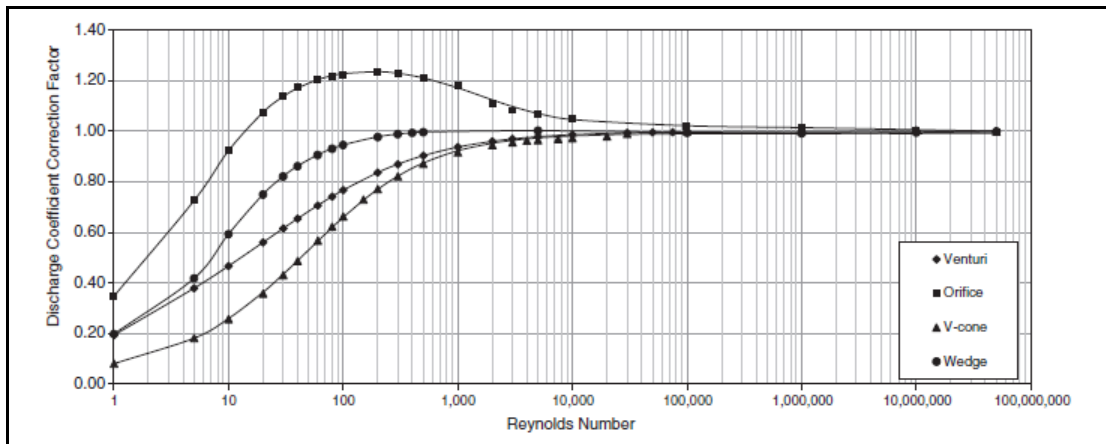
Numerosos trabajos de investigación relacionados al flujo bifásico en tuberías se han realizado con el fin de obtener datos experimentales, ya que es necesaria para el desarrollo y/o validación de modelos y correlaciones que permitan determinar la fracción volumétrica de cada fase de las corrientes de producción, es por ello, que a continuación se muestra una serie de trabajos previos que serán utilizados como base en el desarrollo del presente trabajo especial de grado:

Jean *et al.* Reportaron un estudio la cual comprende en el diseño de unos modelos de medidor de cono con cuatro geometrías diferentes las cuales fueron probadas en simulación con volúmenes finitos con el fin de evaluar algunas propiedades y

variables tales como: (diferencial de presión, Caudal, caída de presión). Y así entender con más claridad lo que ocurre con estos dispositivos, adicionalmente hicieron la construcción de uno de los modelos y fue probado experimentalmente. Los valores de las variables que obtuvieron experimentalmente, la utilizaron para validar el modelo numérico y los resultados arrojaron una alta influencia de la geometría en las características de ese instrumento.

Jean *et al.* Presentaron un trabajo que consiste en el estudio del funcionamiento de un medidor de flujo del tipo V-cono y lo comparan con el tubo Venturi. Realizaron experimentos preliminares donde observó algunas mejoras ofrecidas por el medidor de flujo del tipo V-cono en comparación con el tubo Venturi, Estos resultados se obtuvieron al hacer una comparación de la medición del flujo de agua con el medidor del tipo V-cono y con un tubo Venturi, contruidos con las mismas características de contracción del flujo y calidad de fabricación. El V-cono, ofrece mayor precisión en las mediciones, mayor estabilidad de la señal y repetitividad en las mediciones, además de la versatilidad que ofrece su instalación ya que no requiere de tramos rectos largos para su instalación.

Hollingshead *et al* (2011). Estudiaron el comportamiento del coeficiente de descarga de los medidores de flujo por presión diferencial del tipo: Venturi, placa orificio estándar, V-cono y de cuña utilizando CFD. El objetivo del estudio se realizó utilizando bajos números de Reynolds comúnmente asociados con el transporte de fluidos viscosos en tuberías. El estudio indica que, a bajos números de Reynolds para los medidores de flujo del tipo Venturi, V-cono y de cuña, tendieron a disminuir los coeficientes de descarga con respecto al medidor de flujo del tipo placa orificio la cual el coeficiente de descarga aumentaba hasta un máximo antes de caer bruscamente con números de Reynolds elevados, en la Figura N° 11 lo podrán observar con mayor detalle. De esta manera lograron demostrar la gran utilidad de la dinámica computacional de los fluidos y así predecir las tendencias de los coeficientes de descargas con bajos y levados números de Reynolds.



Fuente: Hollingshead et al (2011).

Figura N° 11 Factor promedio de corrección del coeficiente de descarga a bajos y altos números de Reynolds.

Campos *et al* (2014). Presentaron un trabajo que consiste en visualizar el comportamiento del rendimiento que puede tener un medidor de flujo del tipo placa orificio en tiempo real de un fluido multifásico compuesto por crudo, agua y gas. Los experimentos fueron realizados en dos pozos de producción ubicados en las (cuena Solimões, Amazonas, Brasil) direccionadas individualmente a un separador de prueba, donde variaban la velocidad del flujo haciendo cambios de paso en la apertura del estrangulador. Determinando un conjunto de variables de entradas que caracteriza la composición del fluido, tal como la relación gas-crudo, la relación agua-crudo y las gravedades específicas de cada fase. De esta manera pudieron observar que el caudal másico total y las tasas de flujo volumétrico para cada flujo individual en condición estándar calculado con el VMS, mostraron una excelente concordancia con los datos experimentales obtenidos, con un CV RMSD por debajo de 3,52%; estas desviaciones son menor que el error reportado en las pruebas de pozos con separadores (entre 5% y 10%, según Falcone et al).

Chao *et al* (2013). Debido a que el coeficiente de descarga del V-cono se ve afectado por distintos patrones de flujo, especialmente el del tipo disperso y estratificado, diseñaron un método que permite identificar el patrón de flujo de un fluido bifásico, con la fusión de la tecnología que ofrece el V-cono y un sensor de anillo de

conducción, determinando así la fracción volumétrica de cada fase compuesta por agua y aceite.

Pirouzpanah *et al* (2014). Realizaron un estudio experimental donde evalúan el rendimiento de una versión modificada de un medidor de flujo placa orificio y un medidor de flujo de remolino para flujos multifásico, con el fin de proporcionar un mayor desarrollo de un nuevo tipo de medidor de flujo multifásico. El medidor de flujo del tipo placa orificio proporciona una mejor homogenización del flujo durante varios diámetros de tuberías aguas abajo, proporcionando una mezcla homogénea en la entrada del medidor de flujo remolino y de esta manera trabajar con una amplia gama de fracciones volumétricas de gas (GVF) y tasas de flujo.

Deng-Hui He y Bo-Feng Bai (2014). Presentaron un estudio experimental para determinación del coeficiente de flujo másico de un flujo bifásico para corregir las lecturas producidas mediante el uso de un medidor de flujo del tipo V-Cono. Estas pruebas experimentales se realizaron con dos medidores de flujo V-Cono con relaciones de diámetro distintas, uno de 0,65 y el otro de 0,75, estos mismos fueron desarrollados bajo una condición de flujo de gas húmedo. El fluido de prueba usado era una mezcla de aire y agua de grifo. La relación de densidad de gas a líquido varió de 0,002445 a 0,006083 y el número de Froude varió desde 0,3 a 2. Además de esto, estudiaron los parámetros que influyeron en el experimento, incluyendo, el parámetro de Lockart-Martinelli, la relación de densidad de gas a líquido, el número de Froude del gas y la relación de diámetro equivalente.

Pedron (2012). Realizó un estudio fluido dinámico de una mezcla bifásica desde un enfoque experimental y numérico. Experimentalmente trabajó con una mezcla agua-aire empleando un medidor tipo Venturi de una pulgada de diámetro nominal ( $\beta = 0,5562$ ), en un rango de velocidades superficiales de líquido entre 1,03 m/s y 4,22 m/s y un rango de velocidades superficiales de gas entre 0,20 m/s y 6,21 m/s. Pedron también evaluó el desempeño de cuatro correlaciones para diferentes caudales de líquido y gas, y desarrolló un método iterativo para determinar el flujo másico de agua en función de la velocidad superficial de líquido. El estudio de dinámica de

fluidos computacional, lo realizó valiéndose con herramienta comercial ANSYS® CFX® (v. 13.0) utilizando el modelo de flujo homogéneo que reproduce la caída de presión local del instrumento con un error  $RMS = 7,19\%$ .



## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

Con el fin de cumplir con los objetivos planteados se necesitó desarrollar una metodología de trabajo, la cual consta de una serie de etapas que se logró llevar de manera efectiva. Para ello, se realizó una evaluación experimental, donde el objetivo principal se centró en el comportamiento de dos medidores de flujo monofásico bajo el principio de presión diferencial, considerando mezcla de flujo bifásico aire-líquido en un circuito experimental de flujo.

La metodología utilizada en esta investigación se puede resumir bajo el siguiente esquema.

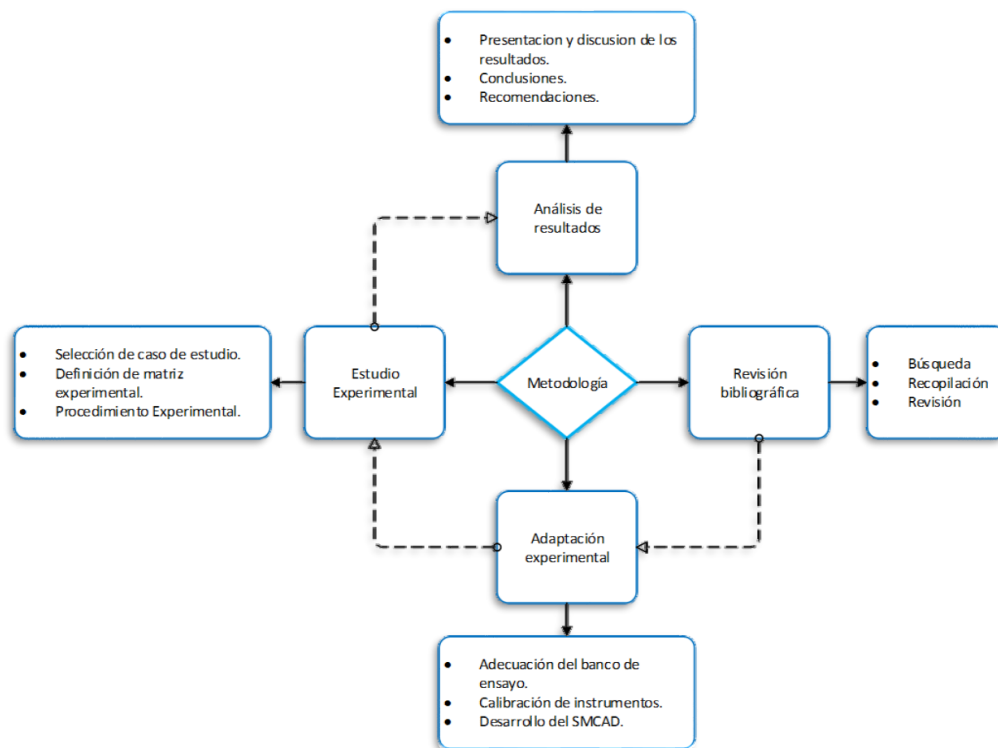


Figura N° 12 Esquema general de la metodología utilizada

### **3.1 RECOPIACION BIBLIOGRAFICA**

En esta etapa se realizó una amplia búsqueda bibliográfica donde se recopiló la información más resaltante referente al tema de estudio, posteriormente se hizo una revisión exhaustiva de toda esta información concerniente a conceptos básicos de la dinámica de fluidos y trabajos más recientes en cuanto al tema de estudios de medidores de flujos monofásicos y bifásicos, patrones de flujo y toda aquella información necesaria para el desarrollo de este estudio experimental.

Para el cumplimiento de esta etapa se contó con el apoyo del Centro de Información Técnica (CIT) de PDVSA-Intevep, en donde se obtuvieron diversas referencias bibliográficas, publicaciones científicas, así como Trabajos Especiales de Grado, informes técnicos referentes al tema objeto de la presente investigación. A su vez se consultó el portal de Red de Información Petrolera y Petroquímica (RIPPET), donde se accedió a una base de datos que contiene el registro de la información disponible en el CIT, además, éste portal permite el acceso a normas PDVSA, COVENIN, Internacionales y diversas bases de datos como Science Direct, Society of Petroleum Engineers SPE-Papers, entre otras.

### **3.2 ADECUACIÓN DEL CIRCUITO EXPERIMENTAL.**

#### **3.2.1 Modificación del banco de prueba**

Para la etapa de adaptación experimental se partió del circuito de prueba existente en el laboratorio de Noreste 4 de PDVSA-INTEVEP, realizando una evaluación exhaustiva de todos los equipos e instrumentos instalados. Este circuito experimental estaba diseñado anteriormente con el fin de estudiar la medición de campo de velocidades en un flujo confinado (Aranguren, 2010). Para el presente Trabajo Especial de Grado (TEG) se necesitó realizar modificaciones en cuanto al posicionamiento de tuberías en todo el circuito, el cual consta de 3 secciones, (líquida, gas y bifásico líquido-gas), determinando nuevas longitudes de desarrollo para los caudalímetros a estudiar y a su vez se efectuó la reubicación de distintos elementos e instrumentos, para ello se realizó una mesa de trabajo la cual asistieron

miembros de la gerencia de Producción de Infraestructura y Mejoramiento (PRIM), generando así una tormenta de ideas con las posibles modificaciones y problemas existentes en el circuito experimental. Luego de la modificación del banco de prueba se realizó la calibración de todos los instrumentos a utilizar con el propósito de tener resultados más precisos y confiables.

### 3.2.2 Calibración de instrumentos

Para la realización de las pruebas experimentales se requirió hacer la calibración de todos los instrumentos existentes en el banco de ensayos, para ello, se determinó una curva de verificación para cada uno de los mismos, con ayuda de un dispositivo que lleva por nombre HART (Ver Figura N° 13). A continuación se mostrará una serie de pasos a seguir para la obtención de la curva de calibración.



Figura N° 13 Instrumento de verificación de datos HART-375

- 1) Conectar el HART-375 (Highway Addressable Remote Transduce. [Transductor direccionable remoto]), al instrumento a ser calibrado.
- 2) Se enciende el HART-375 y se accede al icono que tiene como nombre “hart” para poder conectarse con el instrumento (Ver Figura N° 14), previamente se

tuvo que hacer la conexión pertinente del cableado, ya que, éste varía dependiendo del instrumento que se vaya a verificar.



Figura N° 14 Encendido del HART-375 conectado a un transmisor de señal.

- 3) Aparecerá un comunicado donde se seleccionara “yes”
- 4) Seleccionar la “opción 1”, del comunicado donde nos muestra un cuadro con una serie de opciones, observando la información del instrumento, la configuración del mismo, entre otras.
- 5) La opción 1 (INF) es en la que se podrá observar la información del instrumento, ejemplo: Unidades, rangos de medición (máx, mín), TAG, entre otro.
- 6) Una vez visualizado la información del instrumento se procede a modificar los datos con los que el mismo trabajará seleccionando la “opción 2” (CONF).
- 7) Se verifica que se hayan guardado todos los cambios previamente hechos.
- 8) La “opción 3” (MON) es la opción de monitoreo del instrumento, donde se podrá visualizar dependiendo de la señal que el operador le esté simulando, el

valor de la variable a medir. La instrumentación labora en un rango de corriente de 4-20 mA, por lo tanto, con el dispositivo HART al simular 4 mA, la variable de salida debe corresponder al valor mínimo del rango, análogamente, una corriente de 20 mA corresponde al valor máximo del rango del instrumento mientras que 12 mA representa el 50% del rango evaluado respectivamente.

9) Para simular una corriente al instrumento se selecciona la “opción 5”

(MAINT) →loop test→OK→warm-loop.

La señal simulada teóricamente debería ser la misma que muestra el transmisor (en dado caso que sea indicador también), y de igual manera el valor que refleja el sistema de adquisición de datos LabView tienen que coincidir con el valor simulado con el calibrador de procesos (ver Figura N° 15). El calibrador de procesos “FLUKE-725” es un dispositivo que tiene como función comprobar y calibrar casi cualquier parámetro de proceso. Mide y genera mA, voltios, temperatura (RTD y termopares), frecuencia, ohmios y presión, utilizando un módulo de presión opcional.

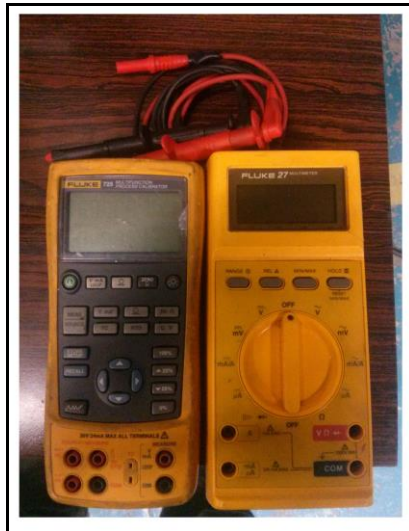


Figura N° 15 Calibrador de procesos FLUKE-725/Multímetro FLUKE-27

- 10) Repetir los pasos previamente mencionados para cada uno de los instrumentos que serán utilizados en el circuito experimental.
- 11) Para lograr obtener la curva de verificación de los instrumentos (ver Figura N° 16), la variable de salida emitida por el transmisor para cada valor simulado (0, 25, 50, 75, 100% y viceversa), es capturada y grabada empleando el programa de adquisición, monitoreo y control (LabView), permitiendo crear un archivo de salida en formato Excel donde se almacenan los datos generados en el tiempo (1 minuto) de todos los instrumentos involucrados en el sistema para cada escenario de la prueba experimental.

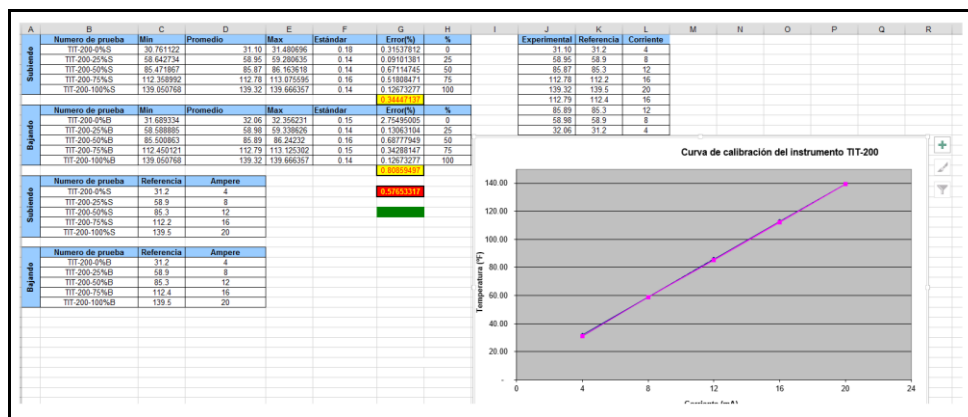


Figura N° 16 Hoja de post procesamiento que muestra la curva de verificación de un transmisor e indicador de temperatura.

### Observaciones:

- Para el caso de la calibración y verificación de los instrumentos de medición de presión y presión diferencial, la señal de entrada al transmisor creada por el simulador HART, es realizada en pasos consecutivos aumentando su rango de 0 a 100% representando así su apertura (0, 25, 50, 75, 100%), esta se va ajustando por medio de un calibrador de proceso conectado al instrumento. Este se fundamenta principalmente por una bomba que inyecta aire al sistema. Posteriormente, se disminuye la presión maniobrando una válvula y se obtienen los valores de rango máximo y mínimo deseado del instrumento (ver Figura N° 16).

- Purgar todos los instrumentos que trabajen con presión y presión diferencial, como por ejemplo: PD, PDT, LT. Para verificar que no haya ningún tipo de fluido y así poder asegurar una correcta calibración. En los diferenciales de presión en la toma de alta presión se coloca la bomba con su respectivo módulo de presión y la toma de baja presión se deja a presión atmosférica y posteriormente se verifica que no haya quedado ninguna fuga.



Figura N° 17 Conexión de un transmisor e indicador de presión diferencial con su respectivo módulo de presión.

### 3.2.3 Verificación del medidor de flujo másico Micromotion.

Para la verificación y validación del medidor de flujo másico del tipo Coriolis (Micromotion) se aplicó la siguiente metodología:

- Variación de inyección de líquido: Desde la sala de control se varía el caudal de líquido a ser estudiado mediante un variador de frecuencia donde 8,5Hz me representa el caudal mínimo de la bomba y 60Hz el caudal máximo, el mismo representa en porcentaje de (0% = 8.5Hz a 100% = 60Hz) las revoluciones por minuto de la bomba.

- Registro de datos: Se realizó un programa Mediante la herramienta computacional de programación LabView. El programa nos permite crear un archivo de formato Excel, en donde se tiene la opción de modificar la cantidad de muestras que se quiere guardar, la cantidad de muestras por segundos que se desea grabar y también tiene la opción de indicarle el tiempo que se requiere que se realice el registro de los datos proporcionados por el programa.
- Cálculos de valores: Una vez teniendo el registro totalmente guardado de cada una de las pruebas se procede a determinar los valores máximos, mínimos, promedios y estándar de los transmisores que emiten las señales de Nivel (subiendo) tanque de almacenamiento de líquido (LT-100) y flujo másico (FIT-200). Determinando el área de la sección transversal de recipiente y el diferencial de altura que proporciona el transmisor de nivel, se logra obtener el volumen del tanque, para finalizar se divide por el tiempo que tarde en generarse esa columna de agua y así obtener el flujo volumétrico medido por el tanque y compararlo con el obtenido por el medidor de flujo másico (Micromotion) que al dividirlo por la densidad del fluido se obtiene el flujo volumétrico.

$$Q_{v_{tanque}} = \frac{(A * \Delta h)}{t} \quad (33)$$

donde:

$Q_{v_{tanque}}$  : Flujo volumétrico acumulado en el tanque de almacenamiento de líquido.

A: Área de la sección transversal del tanque. [Cm<sup>2</sup>]

$\Delta h$  : Diferencial de presión. [cmh<sub>2</sub>o]

t : Tiempo en el cual se obtuvo la columna de agua [s]

$$Q_{v_{Micromotion}} = \frac{Q_m}{\rho_{H_2O}} \quad (34)$$



donde:

$Q_{v_{\text{Micromotion}}}$  : Flujo volumétrico.

$Q_m$  : Flujo másico proporcionado por el Micromotion. [Kg/h]

$\rho_{H_2O}$  : Densidad del agua a una temperatura dada. [Kg/m<sup>3</sup>]

### **3.2.4 SISTEMA DE MONITOREO, CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS**

El Sistema de monitoreo, control y adquisición de datos (SMCAD) de las variables medidas a lo largo del circuito, se realizó en un computador (PC) provista de una tarjeta de adquisición, conectada al bloque conector. El computador contaba con una licencia de la aplicación LabView 2011 instalada, con la que se implementó el instrumento virtual (VI) “medición de flujo”, el cual incluye las siguientes funciones:

- Adquisición de las señales provenientes de los transmisores.
- Visualización de las señales en la pantalla de la computadora, tanto en forma de indicadores numéricos en el DTI del circuito como en gráficas en tiempo real.
- Comando automático y manual de la bomba a través del variador de frecuencia.
- Comando automático y manual de la válvula de control de aire.
- Registro de las mediciones en un archivo con extensión (.xls).
- Alarmas para valores extremos de presión y nivel.
- Apagado automático de la bomba para valores elevados de presión o valores bajos de nivel.

El VI comprende dos ventanas de visualización. La consola (front panel) corresponde a la interfaz gráfica que será utilizada por el usuario a la hora de supervisar y controlar el sistema. Está compuesta por diagramas, indicadores, controles, botones, gráficas, etc. El diagrama de bloque (block diagram) corresponde a la programación que permite implementar las funciones del VI. A continuación se detallan las

funciones de la consola, y posteriormente se explica la reprogramación correspondiente al diagrama de bloques.

#### 3.2.4.1 Consola (Front Panel)

La consola del Sistema de Monitoreo, Control y Adquisición de Datos (SMCAD), está compuesta de cinco secciones:

- i. Diagrama del Circuito: Muestra un diagrama de la configuración lógica del circuito de tuberías y de la instrumentación, los valores medidos por los sensores en tiempo real, los botones de comando automático y manual de la bomba y la válvula reguladora de flujo. El diagrama incluye indicadores de alarma y de activación del apagado automático de la bomba en el transmisor de nivel LT-200.
- ii. Gráficas en tiempo real: A la derecha del diagrama se muestra un cuadro de operaciones, el cual incluye una pestaña de los gráficos en tiempo de real de las medidas de los transmisores. En cada gráfica puede escogerse la visualización de cualquiera de los transmisores. Dichas gráficas permiten observar la variación en el tiempo de los valores medidos, con lo que se pueden prever cambios y detectar variaciones anormales.
- iii. Configuración de los instrumentos: En el mismo cuadro de operaciones se muestra una pestaña con la configuración de los instrumentos, su etiqueta (tag), la variable a ser medida por el instrumento, la unidad asociada a la variable, y por último los valores máximos y mínimos que puede adoptar dicha variable.
- iv. Calibración Manual o Automática de los instrumentos: En el cuadro de operaciones además se encuentra una pestaña que permite realizar la configuración manual o automática de todos los instrumentos.
- v. Registro de Datos: En otra pestaña asociada al cuadro de operaciones, se puede observar un cuadro de control que permite crear y guardar un

documento .xls donde se pueda almacenar las mediciones hechas por todos los instrumentos en un tiempo o cantidad de muestras definido.

### 3.2.4.2 Diagrama de bloques (Block Diagram)

El diagrama de bloques presenta las funciones del programa que normalmente no son visibles para el usuario, programadas en el lenguaje gráfico G de LabView. Cabe destacar que el antiguo banco de prueba poseía un SMCAD, el cual fue modificado para que opere óptimamente en el circuito experimental elaborado en la presente investigación (INT-14879-2015).

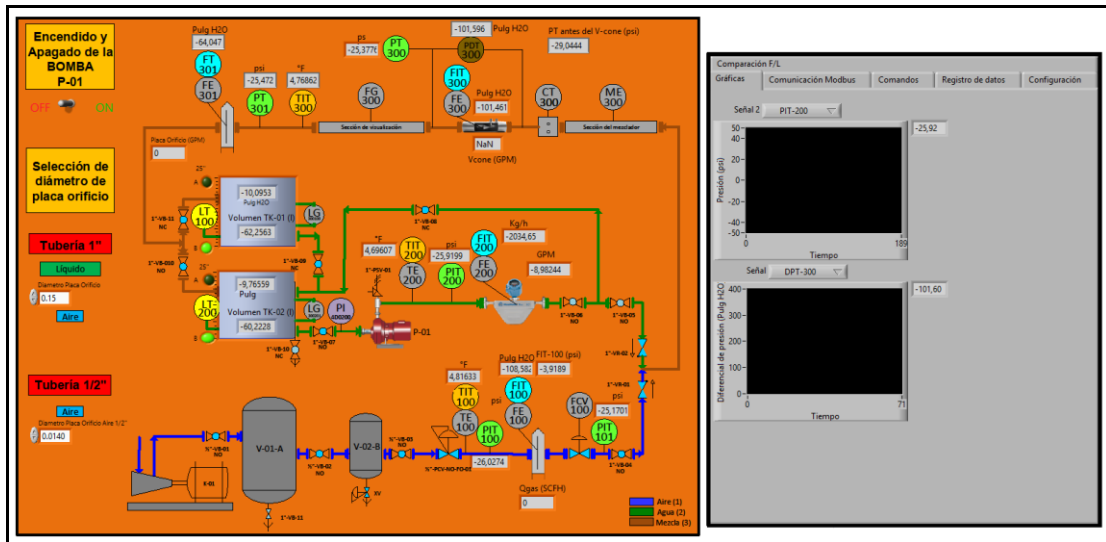


Figura N° 18 Sistema de monitoreo, control y adquisición de datos del circuito experimental.

Cabe destacar que para un mejor entendimiento, comunicación y ubicación al momento de realizar los experimentos en el banco de ensayos, los TAG de todos los instrumentos se modificaron para tales fines, quedando entonces como los que se observan en la Figura N° 18. Para el asunto del uso de las normas, el DTI bajo las normas PDVSA se puede detallar en el (Apéndice E)

### 3.3 ESTUDIO EXPERIMENTAL

#### 3.3.1 Selección de caso de estudio y matriz experimental.

Los casos de estudios seleccionados fueron hechos en base a las características del banco de pruebas y a los estudios asociados al patrón de flujo burbujas de aire dispersas en un flujo de líquido continuo. Para el caso de flujo monofásico se realizaron 6 mediciones haciendo 3 repeticiones a cada una de ellas, con el fin de comprobar el resultado obtenido en la medición, utilizando como valor final el promedio de las 3 mediciones realizadas, teniendo en total 18 pruebas. El rango máximo y mínimo de flujo volumétrico de líquido utilizado en el circuito es de 0.000379 a 0.000757 m<sup>3</sup>/s (6 a 12 gpm) respectivamente. Lo antes mencionado se realiza con la finalidad de determinar el flujo volumétrico en base a la caída de presión medida por la placa orificio y el v-cono, para así comparar estos resultados con los proporcionados por los fabricantes de cada uno de estos instrumentos de medición. Es importante destacar que en este procedimiento se efectuaron las mediciones aumentando progresivamente en 0.000189 m<sup>3</sup>/s (3 gpm) el caudal de líquido desde el valor mínimo 0.000379 m<sup>3</sup>/s (6 gpm) hasta el valor máximo 0.00132 m<sup>3</sup>/s (21 gpm).

Para el caso del estudio de flujo bifásico, se realizaron 36 mediciones haciendo de igual forma 3 repeticiones a cada una de las mismas dando un total de 108. En la Figura N° 19 se puede observar con mayor claridad cómo está compuesta la matriz experimental para el caso monofásico y bifásico.

Se puede observar también que la matriz está conformada por 7 SETS de pruebas. Cada SET de prueba representa una configuración distinta en cuanto a los caudales con los que se va a trabajar siendo éstos monofásico o bifásico.

- SET 1: Consistió en el estudio monofásico de líquido variando el caudal desde el mínimo caudal que es 0.000379 m<sup>3</sup>/s (6 gpm) hasta el máximo caudal que vendría siendo 0.00132 m<sup>3</sup>/s (21 gpm) como se observa en la Figura N° 19. Para los caudales de 0.000379 a 0.000757 m<sup>3</sup>/s (6 a 12 gpm) se usó una placa

orificio de 12.7mm (0.5 plg) de diámetro del orificio para una tubería de 25.4 mm (1 plg) ya que la misma genera un diferencial de presión dentro del rango permisible de 63.5 cm a 635 cm (25 a 250 inH<sub>2</sub>O) para tener unas mediciones óptimas (según el catalogo Rosemount: Model 1195 Integral Orifice. MAN 4686. Enero 1994, Ver Apéndice G). Para los caudales de 0.000946 a 0.00132 m<sup>3</sup>/s (15 a 21 gpm) se cambió la placa y se usó una de 20.32 mm (0.8 plg) de diámetro del orificio, por la misma razón mencionada previamente. Manteniendo esta misma configuración de placa para la sección de tubería de 25.4 mm (1 plg) para los 7 SET propuestos en la matriz experimental de prueba.

- SET 2: A partir de este set se empezaron a realizar las pruebas experimentales bifásicas con una relación V/V de líquido-gas de un 5%. Manteniendo la misma configuración de caudales de líquido del SET 1. Ejemplo: Para un caudal de 0.000379 m<sup>3</sup>/s (6 gpm) de líquido, el 5% de 0.000379 m<sup>3</sup>/s es 0.00000758 m<sup>3</sup>/s (6 gpm) es 0.3 gpm y haciendo la conversión a SCFH tendremos 1.20 SCFH. Es importante mencionar que para los caudales de gas se usan configuraciones de placa orificio distintas dependiendo del caudal con el que se vaya a trabajar. En la columna 3 de la matriz experimental (Ver Figura N° 19), se pueden observar las distintas placas orificio utilizadas según el caudal de aire de trabajo.
- SET 3: El mismo procedimiento del SET 2 con la diferencia de una relación de V/V de líquido-gas del 10%.
- SET 4: El mismo procedimiento del SET 3 con la diferencia de una relación de V/V de líquido-gas del 15%.
- SET 5: El mismo procedimiento del SET 4 con la diferencia de una relación de V/V de líquido-gas del 20%.
- SET 6: El mismo procedimiento del SET 5 con la diferencia de una relación de V/V de líquido-gas del 25%.

- SET 7: El mismo procedimiento del SET 6 con la diferencia de una relación de V/V de líquido-gas del 30%.

SET	# Prueba	Diámetro PO				Configuración						
		1" / 0,5"		Ql (GPM)	Qg (SCFH)	Monofásico	Bifásico					
		100% Agua	5%aire			10%aire	15%aire	20%aire	25%aire	30%aire		
SET 1	1	0,5 / NA	6	Na								
	2	0,5 / NA	9	Na								
	3	0,5 / NA	12	Na								
	4	0,8 / NA	15	Na								
	5	0,8 / NA	18	Na								
	6	0,8 / NA	21	Na								
SET 2	7	0,5 / 0,02	6	2,41								
	8	0,5 / 0,02	9	3,61								
	9	0,5 / 0,02	12	4,81								
	10	0,8 / 0,02	15	6,02								
	11	0,8 / 0,02	18	7,22								
	12	0,8 / 0,034	21	8,42								
SET 3	13	0,5 / 0,02	6	4,81								
	14	0,5 / 0,02	9	7,22								
	15	0,5 / 0,034	12	9,63								
	16	0,8 / 0,034	15	12,03								
	17	0,8 / 0,034	18	14,44								
	18	0,8 / 0,066	21	16,84								
SET 4	19	0,5 / 0,02	6	7,22								
	20	0,5 / 0,034	9	10,83								
	21	0,5 / 0,034	12	14,44								
	22	0,8 / 0,034	15	18,05								
	23	0,8 / 0,034	18	21,66								
	24	0,8 / 0,066	21	25,27								
SET 5	25	0,5 / 0,034	6	9,63								
	26	0,5 / 0,034	9	14,44								
	27	0,5 / 0,034	12	19,25								
	28	0,8 / 0,066	15	24,06								
	29	0,8 / 0,066	18	28,88								
	30	0,8 / 0,066	21	33,69								
SET 6	31	0,5 / 0,034	6	12,03								
	32	0,5 / 0,034	9	18,05								
	33	0,5 / 0,066	12	24,06								
	34	0,8 / 0,066	15	30,08								
	35	0,8 / 0,066	18	36,09								
	36	0,8 / 0,066	21	42,11								
SET 7	37	0,5 / 0,034	6	14,44								
	38	0,5 / 0,034	9	21,66								
	39	0,5 / 0,066	12	28,88								
	40	0,8 / 0,066	15	36,09								
	41	0,8 / 0,066	18	43,31								
	42	0,8 / 0,066	21	50,53								

Nota  
NA: No Aplica  
PO: Placa orificio

Figura N° 19 Matriz experimental de prueba

Para llevar a cabo la evaluación experimental de flujo bifásico gas-líquido, fue necesario familiarizarse con todos los equipos e instrumentos que fueron utilizados en el circuito experimental de pruebas ubicado en el laboratorio Nor-este 4 de PDVSA-Intevep, además de hacer las modificaciones pertinentes para realizar dichos ensayos. Esto con el fin de saber identificar los diferentes equipos e instrumentos, así como saber también las diversas secciones que constituyen la instalación, de manera tal que se pueda adquirir la destreza y habilidad necesaria para la correcta operación del sistema.

### **3.3.2 Procedimiento experimental.**

Con la finalidad de mantener la seguridad y el resguardo de todo el personal que opera el circuito experimental de flujo bifásico, ubicado en el laboratorio de Noreste 4 de Intevep-PDVSA, se elaboró un procedimiento para el uso adecuado y seguro del mismo, al momento de hacer experimentos en él. Para mantenerse en ésta área es de total necesidad cumplir con los siguientes requisitos: Hacer uso de los implementos de seguridad necesarios para el desarrollo de actividades en el circuito experimental de flujo bifásico: Casco, braga, botas y lentes de seguridad, etc.

A continuación se mostrará una lista de los pasos a seguir para el manejo y control seguro del circuito experimental de flujo bifásico.

#### **Procedimiento de arranque del circuito experimental:**

1. Encender las luces que iluminan el circuito experimental de flujo bifásico.
2. Encender el computador, el cual se usa para monitorear el estado y funcionamiento del circuito.
3. Ejecutar el software (LabView) utilizado para llevar el monitoreo y control de las variables del circuito experimental de flujo bifásico.
4. Verificar que todas las válvulas estén situadas de manera correcta, independientemente de cuál línea desea el usuario utilizar (Agua, aire o ambas).
5. Recorrer la línea en sentido a la dirección del flujo, desde la entrada del suministro de líquido y gas, verificar que no haya comunicación entre un sistema y otro (línea de líquido y gas).
6. Verificar que el tanque del almacenamiento de agua conectado a la succión de la bomba esté completamente lleno y que la válvula de drenaje de la misma esté totalmente cerrada.
7. Encender la fuente de alimentación de los instrumentos, incluyendo el variador de frecuencia conectado al motor de la bomba.

8. Encender el compresor o verificar que el mismo esté encendido.

Al verificar todos los pasos previos, al encender la bomba y abrir la apertura de la válvula de control de flujo ubicado en la línea de aire, se recomienda usar el modo “manual” para controlar el circuito e iniciar con los parámetros mínimos tanto de la válvula (FCV-100) como de la bomba (P-01). En este caso para la bomba la frecuencia mínima necesaria para el encendido es 8,5 Hz y el porcentaje (%) de apertura mínima de la válvula es 0%.

### **Procedimiento de operación normal del circuito.**

Una vez encendido todos los equipos y sistema de alimentación de todos los instrumentos, se procede a acondicionar todas las variables (Presión y Caudal) a las condiciones requeridas de la prueba a realizar según la matriz experimental elaborada y mencionada previamente en la sección III.4.1.

- Se acondiciona la presión en la línea de aire.

Mediante la apertura manual de la válvula reguladora de presión hasta la presión requerida, siendo esta visualizada mediante un manómetro unido a la válvula.

- Inyección de aire.

Se acondiciona el caudal de inyección de aire a través de la apertura automática de la válvula reguladora de flujo mediante la herramienta LabView. Al software se le asigna manualmente un porcentaje de apertura hasta obtener el caudal deseado que se podrá observar en la pantalla del sistema de monitoreo y adquisición de datos en tiempo real.

- Inyección de líquido

Se acondiciona el caudal de inyección de líquido al asignar el valor de este en la herramienta LabView, el cual de manera automática procederá a variar la frecuencia del variador y se detendrá al momento de alcanzar el caudal asignado. Para el caso de las pruebas monofásicas se omiten los pasos 1 y 2.



La bomba que suministra líquido al circuito está conectado a un tanque de almacenamiento de líquido. Para proteger la bomba de la cavitación se debe mantener un nivel de líquido lo suficientemente alto para asegurar que la bomba succione solo líquido, por esta razón se procede a hacer el posicionamiento de las válvulas de bola de manera tal, que se pueda generar una recirculación del flujo y de este modo, junto a un sistema de seguridad de apagado automático, programado en el sistema de monitoreo y control del circuito, se asegura que el nivel de líquido en el tanque siempre será el óptimo para la correcta operación de la bomba.

- Creación de archivo de prueba para el post procesamiento.

Luego de haber acondicionado el circuito para una prueba en específica, se procede a crear un archivo con el nombre de la prueba a realizar en SMCAD. En el archivo creado y posteriormente guardado se podrán visualizar todas las variables controladas en un tiempo determinado, siendo el mismo, el tiempo a utilizar en todas las pruebas.

### **Procedimiento para el procesamiento de los datos experimentales.**

En este punto se explica el modo a seguir para utilizar de manera efectiva la herramienta computacional empleada para procesar los datos experimentales. Para explicar este punto se realizará un ejemplo tomando en consideración la prueba PRIM\_0017\_MEDICIÓN\_BIFÁSICO5%\_07A.

Paso 1. Se accede al programa “Hoja de post procesamiento”, al abrir aparecerá la hoja de cálculo denominada “Macro para Post-Procesar Datos”, en ella se debe presionar el Botón “iniciar” para promover su ejecución (Ver Figura N° 20).



Figura N° 20 Hoja de Inicio (Post-Procesamiento)

Paso 2. Se busca la hoja que se desea procesar con el nombre de la prueba deseada. Para éste caso se tomó el archivo con el nombre de PRIM\_0017\_MEDICIÓN\_BIFÁSICO5%\_07A.

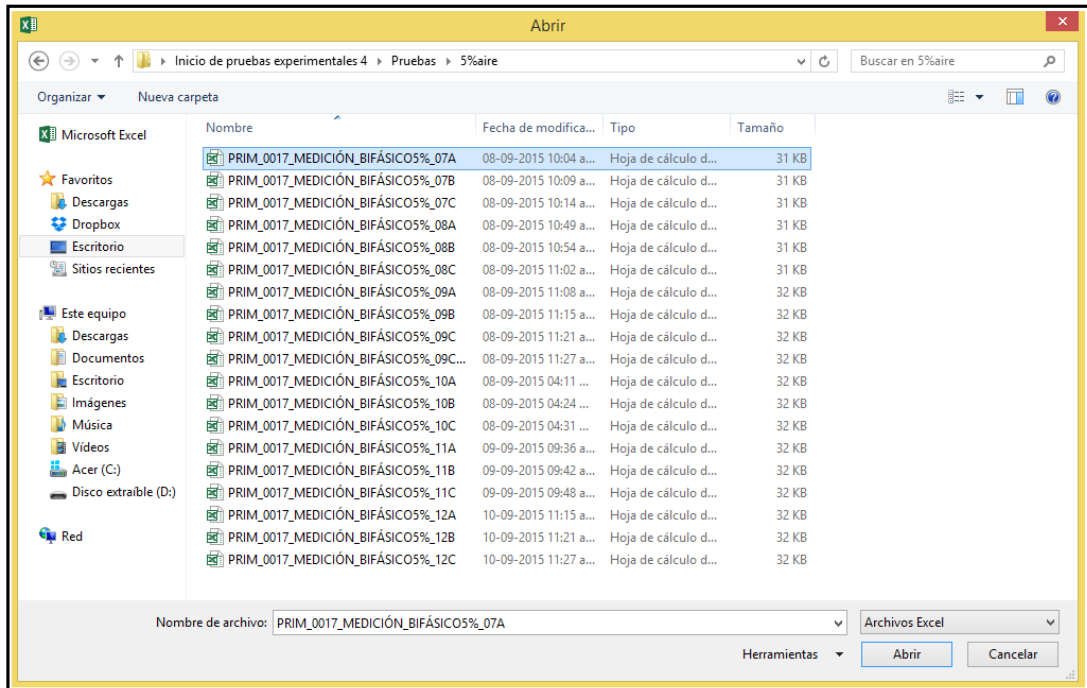


Figura N° 21 Ubicación y selección de la hoja a procesar

Paso 3. En este punto el programa muestra una ventana que se debe indicar el tiempo en el que se realizó la toma de muestra de la prueba.

Paso 4. Al suministrar la información solicitada en el paso anterior, el programa se ejecuta, permitiendo obtener los valores (promedios, máximos, mínimos y estándar) suministrados por todos los instrumentos presente en el sistema así como también, las propiedades de las fases gas y líquido y los cálculos que generan los resultados como números de Reynolds, caída de presión, velocidades entre otros.

Paso 5. Para finalizar, los resultados son almacenados y guardados en un archivo denominado “Resumen de Post-Procesamiento Nor-este 4” bajo un formato tipo Excel, donde en ella se pueden visualizar los resultados obtenidos, tanto en la línea de líquido como la de gas y la línea bifásica, así como también los datos procesados para determinar los cálculos asociados al algoritmo.

### **Procedimiento de parada normal del circuito**

1. Reducir al mínimo el Flujo de Gas, a través del Controlador Bailey, disminuyendo en modo manual, el porcentaje de salida de la válvula de control hasta llegar a cero, de igual forma reducir la velocidad de la bomba de líquido, disminuyendo en modo manual, el porcentaje de salida del variador de frecuencia.
2. Apagar bomba haciendo pasando el switch en el diagrama de flujo que aparece en la pantalla; de igual forma desactivar el variador de frecuencia manualmente pasando el interruptor ubicado en el tablero principal del laboratorio.
3. Dejar abierta la válvula de control de flujo de aire para drenar toda el agua que se encuentra situada dentro del circuito.
4. Drenar los tanques de almacenamiento de líquido.
5. Cerrar todas las válvulas manuales del circuito involucradas en el suministro de Gas, de acuerdo al instrumento y a la válvula de control que se estén utilizando.
6. Apagar el compresor siguiendo las instrucciones establecidas por el fabricante.
7. Cerrar la válvula aguas abajo del compresor que alimenta la línea de aire del circuito. (apagado del compresor)
8. Verificar presiones en el sistema de suministro de aire de instrumentos y de proceso.
9. Cerrar el programa de control, monitoreo y adquisición de datos (LabView).
10. Apagar computador.

De ser necesario apagar todas las luces que iluminan el circuito.

## **CAPÍTULO IV**

### **4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En esta sección se detallan los resultados obtenidos en función de los objetivos planteados en el presente Trabajo Especial de Grado; el cual constara de 3 secciones, empezando por la modificación y puesta a punta del banco de ensayos, posteriormente con la calibración de todos los instrumentos y modificación del Sistema de Monitoreo, Control y Adquisición de Datos (SMCAD), y por último se analizaran los resultados obtenidos.

Es importante indicar que el estudio se realizó con el fin de obtener una base de datos que permitan en otras investigaciones de la investigación evaluar diferentes geometrías y condiciones de operación para realizar los experimentos, empleando tanto simulaciones numéricas como experimental.

#### **4.1 MODIFICACIÓN DEL BANCO DE ENSAYOS**

Para iniciar con la modificación y puesta a punta del banco de ensayo, se inició con una revisión exhaustiva del mismo, evaluando posibles modificaciones y cambios. Para ello se realizó una mesa de trabajo la cual participaron: jefe de proyecto, custodio de laboratorio, personal de mecatrónica, entre otros. En dicha mesa se realizó una lista con una tormenta de ideas donde se dieron a mencionar todas las características, ventajas, desventajas, defectos y averías del circuito experimental previo, para así poder hacer las modificaciones pertinentes para la realización de las pruebas requeridas en la presente investigación.

De la mesa de trabajo se concluyó que se debía comparar la medición del caudal monofásico de todos los caudalímetros pertenecientes al banco de ensayo, también se dio a conocer todos los equipos e instrumentos dañados del circuito previo para así reemplazarlos y además colocar otros transmisores adicionales, necesarios para la adecuación correcta del circuito experimental del presente estudio, debido a la incorporación de transmisores adicionales se recomendó agregar 2 cables de señal

adicional para la instrumentación y por ende hacer una nueva canalización de tubería con un mayor diámetro. Por otro lado el compresor que suministra aire al sistema no posee un secador incorporado, por ello se recomendó colocar un secador o una alternativa para mitigar este problema de condensación en las líneas de procesos e instrumentación. Además se recomendó reemplazar la válvula de control de flujo actual por una de globo o aguja que permita realizar el proceso de control de suministro de aire proceso con mejor exactitud y a su vez, tener un mejor control. El personal de mecánica informo que la vibración que genera el motor de la bomba puede alterar las mediciones de algunos instrumentos involucrados en el sistema, es por ello que sugirieron reubicar la bomba, ya que la misma se encontraba dentro del circuito experimental, además se propuso colocar mangueras en la descarga y succión de la bomba para ayudar a amortiguar las vibraciones. Para mayor detalle de la mesa de trabajo diríjase al Apéndice D.

Una vez definido las sugerencias a implementar, se procedió a realizar la puesta a punta del circuito experimental siguiendo un orden cronológico:

- (i) Desmantelar circuito experimental previo.
- (ii) Ubicación de los caudalímetros (V-cono, placas orificios y Coriolis), respetando sus respectivas condiciones y criterios para su instalación. Para las longitudes de tramos rectos aguas arriba y aguas abajo de la placa orificio, se usó la referencia del fabricante (Buscar libro y colocar método del cálculo).
- (iii) Reubicación de la bomba de alimentación de líquido del circuito, ubicándola afuera de la jaula del banco de ensayo, ya que la misma generaba muchas vibraciones, con el fin de disminuir en mayor posibilidad los errores de medición de los instrumentos, en especial el medidor de flujo másico del tipo Coriolis ubicado en la línea de líquido.
- (iv) Sustitución de la válvula reguladora de flujo de aire.
- (v) Sustitución de la válvula reguladora de presión de aire y del segundo recipiente a presión para tener un mejor control de flujo.

- (vi) Se realizó un reemplazo de la canalización de tuberías de cables de señal de  $\frac{3}{4}$  plg a  $1 - \frac{1}{2}$  plg ya que se incorporaron 4 instrumentos nuevos.
- (vii) Reubicación de los transmisores de Presión, Temperatura, Nivel, Diferencial de presión, Flujo volumétrico, Flujo másico. En algunos casos se hicieron sustitución de instrumentos por avería y se colocaron nuevos instrumentos.
- (viii) Se procedió a realizar toda la instalación de los instrumentos del sistema, haciendo todas las conexiones pertinentes para el correcto funcionamiento de los mismos, además se realizó un nuevo recorrido en la canalización de los cables de señales dentro del sistema, ya que el mismo tenía un recorrido que obstaculizaba mucho el circuito experimental.

Una vez concluida toda la instalación y correcta verificación de los instrumentos del circuito experimental de flujo bifásico gas-liquido, se presenta a continuación de manera resumida el contenido de todo el banco de ensayo, el cual se dividió en 4 módulos.

1. Módulo de compresión, conformado principalmente por los siguientes equipos
  - Un (1) Compresor de aire de proceso (K-01); marca AtlasCopco, Modelo: GA409 y con un preostato regulable programado para una presión de encendido de 80 psi y una presión de parada de 100 psi.
  - Dos (2) recipientes a presión de aire para el sistema e instrumentos (V-01-A/V-02-B); marca AtlasCopco.
  - Una (1) válvula regula de presión de aire (PCV-01).
  - Una (1) válvula reguladora de flujo de aire (FCV-01).
  - Una (1) válvula check (VR-01), no permite contraflujo.

En la Tabla N°3 se pueden observar todos los instrumentos involucrados en el módulo de compresión.

Tabla N° 3 Características y rangos de transmisores en la línea de gas.

<b>TAG</b>	<b>Descripción</b>	<b>Marca</b>	<b>Rango de operación</b>
TIT-4E0100	Temperatura suministro de aire	SMAR	32 – 140 (°F)
PIT-4E0100	Presión suministro de aire	SMAR	0 – 100 (psi)
FIT-4E0100	Flujo volumétrico (Placa Orificio) Inyección de aire	Rosemount	0 – 250 (inH <sub>2</sub> O)
PIT-4E0101	Presión suministro de aire aguas debajo del FIT-4E0100	SMAR	0 – 100 (psi)

2. Módulo de bombeo, conformado principalmente por los siguientes equipos:

- Dos (2) tanques de almacenamiento de líquido (TK-01 / TK-02).
- Una (1) bomba de engranajes rotativos de desplazamiento positivo (P-01), marca Viking. Con capacidad máxima nominal de velocidad 30 gpm y presión máxima de operación 200 psi. (Ver Apéndice C)
- Un (1) válvula de alivio a la descarga de la bomba (P-01), graduada para una presión de activación de 90psi.
- Una (1) válvula check (VR-02), no permite contraflujo.

En la Tabla N°4 se pueden observar todos los instrumentos involucrados en el módulo de bombeo.

Tabla N° 4 Características y rangos de transmisores en la línea de líquido.

<b>TAG</b>	<b>Descripción</b>	<b>Marca</b>	<b>Rango de operación</b>
LT-300100	Sensor de nivel del tanque TK-01	SMAR	0 – 26 (inH2O)
LT-300202	Sensor de nivel del tanque TK-02	SMAR	0 – 26 (inH2O)
TIT-4D0200	Temperatura a la descarga de la bomba	SMAR	32 – 140 (°F)
PIT-4D0200	Presión a la descarga de la bomba	SMAR	0 – 100 (psi)
FIT-4D0200	Flujo másico (Coriolis)	Micromotion	0 – 8000 (kg/h)

3. Módulo de desarrollo y sección de prueba líquido-gas conformado principalmente por los siguientes instrumentos:



Tabla N° 5 Características y rangos de transmisores en la línea de mezcla.

<b>TAG</b>	<b>Descripción</b>	<b>Marca</b>	<b>Rango de operación</b>
FIT-4D0300	Flujo volumétrico (V-cono) Sección monofásica y de mezcla.	Mcrometer	0 – 400 (inH2O)
PDT-4D0300	Diferencial de presión Sección monofásica y de mezcla.	SMAR	0 – 100 (inH2O)
PIT-4D0300	Presión aguas abajo del (V-cone) FIT-4D0300 en la sección monofásica y de mezcla.	SMAR	0 – 100 (psi)
TIT-4D0300	Temperatura aguas arriba del (palca orificio) FT-4D0301 en la sección monofásica y de mezcla.	Rosemount	32 – 140 (°F)
PT-4D0300	Presión aguas arriba del (Placa orificio) FT-4D0301 en la sección monofásica y de mezcla.	Rosemount	0 – 100 (psi)
FT-4D0301	Flujo volumétrico (V-cone) Sección monofásica y de mezcla.	Rosemount	0 – 400 (inH2O)

#### 4. Módulo de monitoreo y control de las variables.

El sistema de monitoreo y control del banco de ensayo cuenta con los siguientes equipos.

- Computador PC Core(TM)2 Duo CPU E7200, 2.53 GHz, 2GB ram, con una licencia de la aplicación LabView 2011 con la que se implementó el instrumento virtual (VI).
- 2 Controladores Pixsys para el control automático del variador de frecuencia y la válvula reguladora de flujo de aire.

- Tarjeta de adquisición PCI-MIO-16XE-10 (NI 6030E).
- Bloque conector SCB-68.

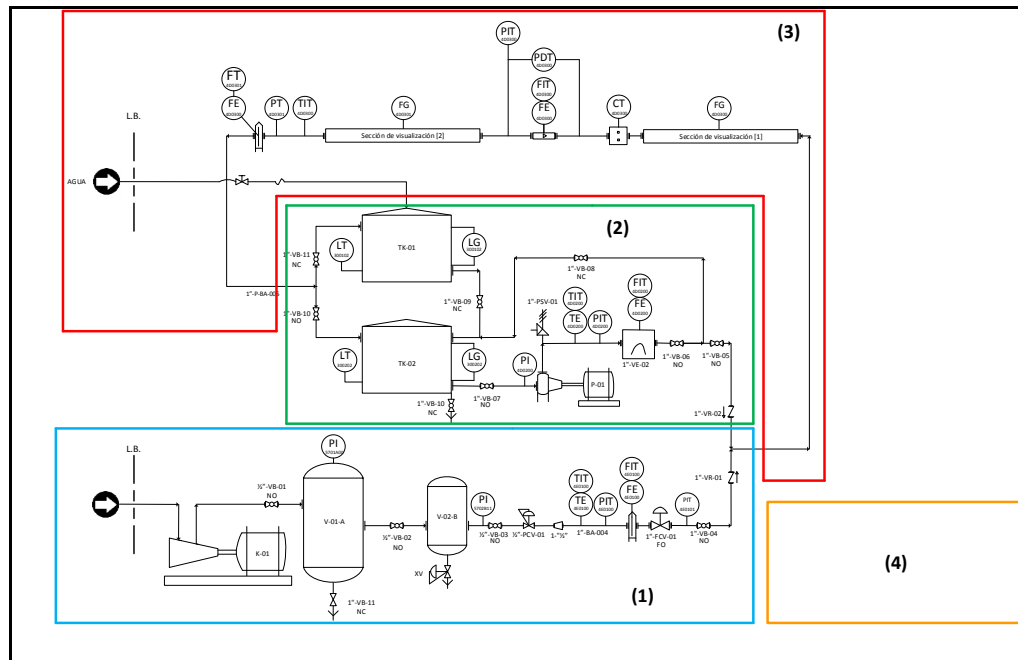


Figura N° 22 Esquema del circuito experimental de flujo bifásico gas-líquido.

En la Figura N° 22 se muestra el esquema completo del banco de ensayo, seccionado en 4 módulos cada uno con un color distinto que identifica la sección en la que se encuentra; el color azul representa el módulo 1 sección de gas, el color verde el módulo 2 siendo la sección de líquido, el color rojo constituye el módulo 3 sección de mezcla y sección de prueba, y por último el color amarillo representa el módulo 4 sección de monitoreo y control del circuito.

- Módulo de compresión

Según (Pérez, 2011) para garantizar un flujo continuo y estable de aire, el compresor de aire de proceso tiene que tener acoplado uno o dos pulmones (Recipientes de almacenamiento de gas) que amortigüen las variaciones de presión o de requerimientos de caudal, evitando así cambios bruscos en las condiciones de

operación del equipo. El banco de prueba donde se trabajó cumple con los requerimientos mencionados, ya que efectivamente cuenta con un compresor y dos pulmones. En ambos pulmones se encuentra ubicado en la parte inferior un filtro, que permite retener las partículas de agua contenidas en el aire de alimentación, eliminando así la humedad proveniente del compresor, ya que el mismo no tiene adaptado un secador, posteriormente en la parte superior del segundo pulmón se encuentra una segunda salida de aire para instrumentación. El flujo de aire es controlado mediante la apertura o cierre de una válvula de control de flujo, el cual es medido por un medidor de flujo del tipo placa orificio integral Rosemount (Ver tabla 6), para un rango de tasa de flujo de 2,41 a 50,3 SCFH. Para determinar el flujo volumétrico de aire mediante la placa orificio, se disponen de una serie de instrumentos que permiten obtener la medición de temperatura y presión de aire inyectada al sistema.

Tabla N° 6 Rango de operación de flujo de la placa orificio en la sección de gas.

<b>Diámetro de la tubería [in]</b>	<b>Diámetro del orificio [in]</b>	<b>Flujo volumétrico [SCFH]</b>
½	0,02	2 – 7.5
	0,034	7,5 – 21
	0,066	21 – 55

Información Catalogo Rosemount: Model 1195 Integral Orifice. MAN 4686. Enero 1994

- **Módulo de bombeo**

Se dispone de dos tanques de almacenamiento de líquido, con una capacidad de 170 litros, controlados por dos transmisores de nivel, uno para cada tanque. El fluido es impulsado por una bomba que succiona el líquido del tanque inferior. A la descarga de la bomba se cuenta con una serie de instrumentos que permiten obtener la medición de temperatura, presión y flujo másico de líquido inyectada al sistema. El flujo de agua es controlado mediante un lazo de control entre el medidor de flujo másico y el variador de frecuencia del motor de la bomba.

Tabla N° 7 Rango de operación de flujo de la placa orificio en la sección de líquido.

<b>Diámetro de tubería [in]</b>	<b>Diámetro del orificio [in]</b>	<b>Flujo volumétrico [gpm]</b>
1	0,5	4 – 12
	0,8	13 – 40

Información Catalogo Rosemount: Model 1195 Integral Orifice. MAN 4686. Enero 1994

- Módulo de desarrollo y sección de prueba gas-líquido.

El módulo de desarrollo está conformado por una sección de tubería plexiglás para la visualización del patrón de flujo y un conjunto de tuberías de acero al carbono, el recorrido completo en la sección de prueba, cuenta con una serie de instrumentos que permite obtener el valor de todas las variables necesarias para el correcto acondicionamiento y funcionamiento del sistema, logrando obtener la medición del flujo volumétrico del V-cono y Placa Orificio que son los objeto de estudio en este Trabajo Especial de Grado.

- Módulo de monitoreo, control y adquisición de datos de las variables.

Partiendo del informe técnico-14879-2015 se realizaron las modificaciones del SMCAD, que se describe de la siguiente manera.

- Se agregaron dos controladores Pixsys para el control automático de los actuadores existentes en el circuito experimental de flujo, El primer actuador es una bomba centrifuga, la cual está conectada a un motor eléctrico trifásico de 2 HP de potencia, marca Siemens. El motor eléctrico es comandado mediante un variador de frecuencia cuyas especificaciones son mostradas en la Tabla N° 8. El variador de frecuencia recibe dos tipos de señales una en voltaje 120V (presencia o ausencia) para el encendido y apagado del motor, y la segunda señal en corriente de 4 a 20 mA que permite controlar la frecuencia de alimentación del motor, la cual incide sobre la velocidad del motor y el flujo generado por la bomba.

Tabla N° 8 Especificaciones del variador de frecuencia del circuito

<b>Tag</b>	<b>Servicio</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Serial</b>	<b>Rango</b>
ST - 0101	Variador Frecuencia P-0101	Sew Eurodrive	Movitrac LT	2025200461	0 – 300 Hz

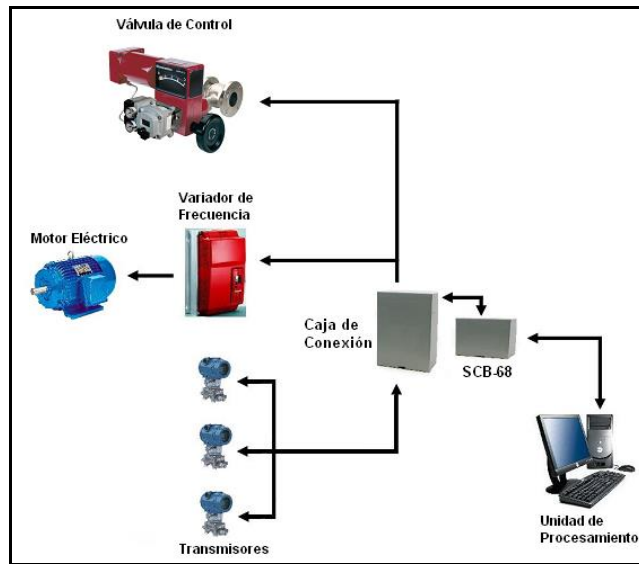
El segundo actuador es una válvula de control normalmente abierta, conectada a un convertidor I/P, este convierte proporcionalmente una señal de corriente de 4-20mA a 6-24psi para regular el cierre de la válvula neumática. El actuador es de marca Masoneilan modelo 28-28102 con una acción de falla normalmente abierta, es comandado por una señal recibida de la unidad de procesamiento y alimentado en presión de aire por medio del compresor. Sus especificaciones se muestran en la Tabla N° 9.

Tabla N° 9 Especificaciones del actuador asociado a la válvula de control del circuito

<b>Tag</b>	<b>Servicio</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Serial</b>	<b>Rango</b>
FCV - 201	Válvula de Control con actuador I/P	Masoneilan	28-28102 -4000 I/P Converter	H-12-7500	6 - 24 psi

- Se agregaron nuevos cables de señales para los nuevos instrumentos incorporados, la cual fue necesario hacer una nueva canalización de tuberías por donde irían los cables de señal de los instrumentos, remplazando una tubería de ¾ de plg por una de 1- ½ plg.
- Recableado de todo los instrumentos pertenecientes al circuito experimental de flujo y consecutivamente se agregó un nuevo cajetín el cual llegan todos los cables de señales del cajetín principal, para tener una mayor comodidad a la hora de hacer una nueva reubicación de instrumentos o agregar.
- Modificaciones referente al LabView: Se agregó la comunicación Pixsys, además se añadieron los nuevos cálculos tipos (caudal V-cono- caudal Placa orificio), reconfiguración de las señales de todos los instrumentos,

reorganización del diagrama de bloques y por último la modificación de la interfaz de usuario.



Fuente: Int-14879-2015

Figura N° 23 Arquitectura general del sistema de adquisición, supervisión y control del banco de pruebas ubicado en el laboratorio de Noroeste 4.

## 4.2 CALIBRACIÓN DE TRANSMISORES Y CAUDAÍMETROS

Para realizar la verificación de los transmisores se deben efectuar los procedimientos previos mencionados en el marco metodológico en la sección 3.2.2, en el cual la señal simulada en el transmisor por el dispositivo calibrador de proceso “FLUKE” constituye un patrón o referencia. Posteriormente se comparan los valores proporcionados por el calibrador de proceso y el valor promedio de la variable a verificar almacenado, permitiendo así obtener el error por cada medida realizada (incrementando y disminuyendo la intensidad de la corriente), para así lograr cuantificar el error total de la medición asociada a cada instrumento.

		Numero de prueba	Min	Promedio	Max	Estándar	Error(%)	%
Experimental	Subiendo	TIT-200-0% S	30,761122	31,10	31,480696	0,18	1,26475548	0
		TIT-200-25% S	58,642734	58,95	59,280635	0,14	0,77539681	25
		TIT-200-50% S	85,471867	85,87	86,163618	0,14	1,74465495	50
		TIT-200-75% S	112,358992	112,78	113,075595	0,16	0,60775294	75
		TIT-200-100% S	139,050768	139,32	139,666357	0,14	0,30468524	100
							0,93944908	
Experimental	Bajando	TIT-200-0% B	31,689334	32,06	32,356231	0,15	2,75495005	0
		TIT-200-25% B	58,588885	58,98	59,338626	0,14	0,13063104	25
		TIT-200-50% B	85,500863	85,89	86,24232	0,16	0,68777949	50
		TIT-200-75% B	112,450121	112,79	113,125302	0,15	0,34288147	75
		TIT-200-100% B	139,050768	139,32	139,666357	0,14	0,12673277	100
							0,80859497	
Referencia	Subiendo	Numero de prueba	Referencia	Ampere				
		TIT-200-0% S	31,5	4			0,87402202	
		TIT-200-25% S	58,5	8				
		TIT-200-50% S	84,4	12				
		TIT-200-75% S	112,1	16				
TIT-200-100% S	138,9	20						
Referencia	Bajando	Numero de prueba	Referencia	Ampere				
		TIT-200-0% B	31,2	4				
		TIT-200-25% B	58,9	8				
		TIT-200-50% B	85,3	12				
		TIT-200-75% B	112,4	16				
TIT-200-100% B	139,5	20						

Figura N° 24 Representación de los cálculos para verificación del error del transmisor. Adicionalmente se presenta de forma gráfica los valores de referencia con la señal de salida, consiguiendo una curva que representa el valor de la variable a medir del instrumento vs Corriente simulada por el calibrador de proceso, y de esta manera visualizar el error que existe entre ambas mediciones. En la Figura N° 25 se puede observar la curva generada de un transmisor de temperatura (TIT-200), el cual permite registrar la temperatura en la línea de líquido, representando una incertidumbre de  $\pm 0.87\%$ .

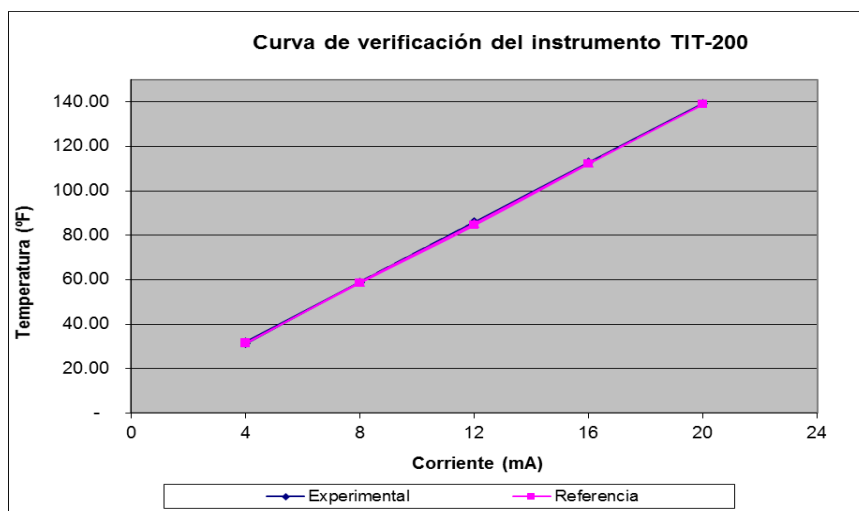


Figura N° 25 Curva de verificación de incertidumbre asociada al transmisor TIT-200. En la Tabla N°10 se muestra la incertidumbre asociada a cada transmisor utilizado para la ejecución de las pruebas experimentales. Cabe destacar que se realizó el mismo procedimiento previamente mencionado, para todos los transmisores presentes

en el circuito experimental, este estudio se muestra en el (Apéndice F) N°4 donde se encuentran las gráficas de los transmisores empleados en el circuito experimental.

Tabla N° 10 Errores producidos por cada transmisor utilizado en las pruebas

<b>Instrumento</b>	<b>Incertidumbre</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Incertidumbre</b>
TIT-200	0,87	FT-301	0,49
PIT-200	1,22	LT-100	0,64
PDT-200	0,26	LT-200	3,46
FIT-300	0,16	TIT-100	2,23
PIT-300	1,16	PIT-100	2,45
TIT-300	0,57	FIT-100	2,36
PT-301	0,35	PIT-101	0,73

La verificación de medición del medidor de flujo másico (Coriolis) se realizó aplicando la metodología mencionada previamente en el capítulo III en la sección 3.2.3, por consiguiente, al obtener las condiciones de flujo deseada a medir (ya estabilizado el sistema), se procede a comparar esta medición con el flujo volumétrico calculado con el tanque (Tanque Vacándose). El tiempo total empleado para cada punto de verificación del medidor de flujo másico fue 1 min, es decir:

- (i) Para el caso del tanque: la columna de agua que se genera en 1 min se multiplica por el área de la sección transversal del tanque y se divide por el tiempo en el que se generó la columna (1min)
- (ii) Para el caso del Coriolis: se almacena todas las mediciones. En este caso la cantidad de muestras sería: dos por cada segundo de pruebas, teniendo un total de 120 mediciones, sacando un promedio de las mismas y dividiéndolo por la densidad del líquido, se obtiene el flujo volumétrico a comparar con el determinado con el tanque inferior. En la siguiente tabla se pueden observar las mediciones realizadas y los errores obtenidos en cada una de ellas.



Tabla N° 11 Errores de medición relativos caudalímetro Coriolis contra el tanque inferior del circuito

<b>Frecuencia [Hz]</b>	<b>Micromotion [GPM]</b>	<b>Tanque [GPM]</b>	<b>Error relativo</b>
15	7,59	7,53	0,74
20	10,16	10,01	1,48
25	12,69	12,86	1,36
30	15,17	15,29	0,78
35	17,55	17,85	1,72
40	19,78	20,10	1,62
45	22,06	22,50	2,01
Total			1,39

En la Figura N° 26 se puede observar la semejanza que existe entre ambas mediciones en cada uno de los puntos, el incremento de la frecuencia es proporcional al caudal, de esta manera se concluye que el error entre ambas mediciones es mínimo, y por lo tanto el medidor de flujo másico Micromotion está calibrado.

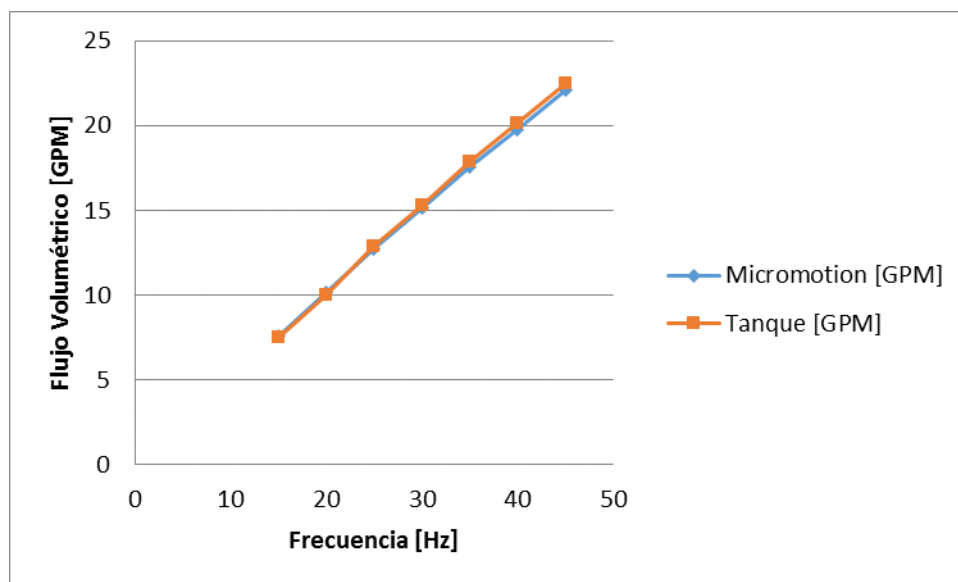


Figura N° 26 Curva de verificación de medición (Caudal Vs Frecuencia)

### 4.3 COMPARACIÓN DE LA MATRIZ TEÓRICA CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE

En este segmento se hace referencia al número total de pruebas que se lograron evaluar considerando el número de puntos determinados en la matriz teórica y la misma permitió evidenciar:

Se alcanzaron ejecutar el 100% de las pruebas mencionadas en la matriz teórica, la misma estaba constituida por 42 puntos, para caudales de gas que variaban entre 2.41 y 50.53 SCFH y caudales de líquido de 6 a 21 gpm (Ver Figura N°27 y 28). Cabe destacar que se quiso reproducir la hoja de datos del fabricante que refiere a caudales entre 3 y 30 gpm (Ver apéndice N°5), sin embargo el caudal mínimo que puede alcanzar la bomba que suministra líquido al sistema es de 5 gpm, por tal razón no se pudo trabajar con caudales menores a este. Por otra parte a caudales mayores a 21 gpm la medición del medidor de flujo másico Micromotion generaba incertidumbres mayores al 5% (Ver Tabla N°12), con respecto a la medida por el tanque, ya que el cabezal de succión de la bomba para altos caudales de líquido no correspondía con el mínimo requerido para la misma, esto se debe a que el tanque de almacenamiento de líquido era de muy baja capacidad para los caudales máximos.

Tabla N° 12 Incertidumbre asociada a la Comparación en la medición del caudal medido por el Coriolis Vs el tanque

Frecuencia [Hz]	Micromotion [GPM]	Tanque [GPM]	Error relativo
15	7,59	7,53	0,74
20	10,16	10,01	1,48
25	12,69	12,86	1,36
30	15,17	15,29	0,78
35	17,55	17,85	1,72
40	19,78	20,10	1,62
45	22,06	22,50	2,01
<b>50</b>	<b>24,58</b>	<b>25,88</b>	<b>5,25</b>
<b>60</b>	<b>26,76</b>	<b>28,12</b>	<b>5,06</b>

Además se seleccionó el medidor de flujo patrón del sistema, para poseer una base y poder comparar los caudales obtenidos por el V-Cono y placa orificio, para ello se realizó la comparación de la medición del tanque y el Coriolis (Ver Figura N° 27 y 28) donde se evidencia que, el que presenta menor error con respecto al valor teórico es el proporcionado por el medidor de flujo Coriolis (Micromotion), por ende este fue el seleccionado como medidor de flujo patrón del sistema.

Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	Micromotion		Tanque	
		Flujo [gpm]	%Error relativo	Flujo [gpm]	%Error relativo
6	100% liq.	6,03	0,46	6,08	1,34
	5% v/v	5,95	0,86	5,85	2,63
	10% v/v	5,97	0,56	5,84	2,73
	15% v/v	6,06	1,06	5,94	0,97
	20% v/v	6,02	0,29	6,30	4,79
	25% v/v	5,96	0,73	5,91	1,46
	30% v/v	6,09	1,49	6,08	1,24
			<b>0,78</b>		<b>2,16</b>

Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	Micromotion		Tanque	
		Flujo [gpm]	%Error relativo	Flujo [gpm]	%Error relativo
9	100% liq.	9,06	0,67	8,93	0,75
	5% v/v	9,07	0,81	9,22	2,37
	10% v/v	9,18	1,92	8,90	1,10
	15% v/v	9,09	0,96	8,91	1,05
	20% v/v	9,10	1,12	8,82	2,07
	25% v/v	9,11	1,23	8,94	0,62
	30% v/v	9,16	1,78	8,80	2,33
			<b>1,21</b>		<b>1,47</b>

Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	Micromotion		Tanque	
		Flujo [gpm]	%Error relativo	Flujo [gpm]	%Error relativo
12	100% liq.	12,24	1,93	12,02	0,17
	5% v/v	12,26	2,12	11,91	0,78
	10% v/v	12,08	0,69	11,77	1,95
	15% v/v	12,12	1,03	11,38	5,46
	20% v/v	12,13	1,05	11,79	1,80
	25% v/v	12,17	1,36	11,87	1,06
	30% v/v	12,10	0,80	12,41	3,28
			<b>1,28</b>		<b>2,07</b>

Figura N° 27 Incertidumbre asociado a la medición de caudal de del Micromotion y Tanque con respecto al teórico para caudales (6, 9, 12)

Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	Micromotion		Tanque	
		Flujo [gpm]	%Error relativo	Flujo [gpm]	%Error relativo
15	100% liq.	15,30	1,97	15,13	0,86
	5% v/v	15,41	2,64	15,46	2,95
	10% v/v	15,17	1,10	14,80	1,37
	15% v/v	15,09	0,63	14,78	1,49
	20% v/v	15,09	0,62	14,83	1,17
	25% v/v	15,09	0,60	14,71	1,95
	30% v/v	15,13	0,86	14,92	0,55
			<b>1,20</b>		<b>1,48</b>

Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	Micromotion		Tanque	
		Flujo [gpm]	%Error relativo	Flujo [gpm]	%Error relativo
18	100% liq.	18,16	0,88	18,20	1,10
	5% v/v	18,63	3,40	17,85	0,85
	10% v/v	18,08	0,43	17,86	0,78
	15% v/v	18,20	1,12	17,50	2,84
	20% v/v	18,07	0,40	18,11	0,59
	25% v/v	18,11	0,61	17,88	0,70
	30% v/v	18,16	0,86	17,95	0,27
			<b>1,10</b>		<b>1,02</b>

Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	Micromotion		Tanque	
		Flujo [gpm]	%Error relativo	Flujo [gpm]	%Error relativo
21	100% liq.	20,99	0,04	21,30	1,39
	5% v/v	21,02	0,11	21,06	0,28
	10% v/v	21,09	0,41	21,05	0,22
	15% v/v	21,13	0,60	21,31	1,45
	20% v/v	21,21	1,01	21,28	1,34
	25% v/v	21,17	0,81	21,27	1,28
	30% v/v	21,12	0,57	21,35	1,66
			<b>0,50</b>		<b>1,09</b>

Figura N° 28 Incertidumbre asociado a la medición de caudal de del Micromotion y Tanque con respecto al teórico para caudales (15, 18, 21)

SET	# Prueba	Diámetro PO 1" / 0.5"	Ql Teórico (GPM)	Qg Teórico(SCFH)	Ql Experimental (GPM)	Qg Experimental(SCFH)	Configuración							
							Monofásico	Bifásico						
							100% Agua	5%aire	10%aire	15%aire	20%aire	25%aire	30%aire	
S E T 1	1	0.5 / NA	6	Na	6.03	Na								
	2	0.5 / NA	9	Na	9.06	Na								
	3	0.5 / NA	12	Na	12.24	Na								
	4	0.8 / NA	15	Na	15.30	Na								
	5	0.8 / NA	18	Na	18.16	Na								
	6	0.8 / NA	21	Na	20.99	Na								
S E T 2	7	0.5 / 0.02	6	2.41	5.95	2.42								
	8	0.5 / 0.02	9	3.61	9.07	3.63								
	9	0.5 / 0.02	12	4.81	12.26	4.83								
	10	0.8 / 0.02	15	6.02	15.11	5.98								
	11	0.8 / 0.02	18	7.22	18.33	7.12								
	12	0.8 / 0.034	21	8.42	21.02	8.43								
S E T 3	13	0.5 / 0.02	6	4.81	5.97	4.85								
	14	0.5 / 0.02	9	7.22	9.18	7.16								
	15	0.5 / 0.034	12	9.63	12.08	9.55								
	16	0.8 / 0.034	15	12.03	15.17	12.04								
	17	0.8 / 0.034	18	14.44	18.08	14.50								
	18	0.8 / 0.066	21	16.84	21.09	16.84								
S E T 4	19	0.5 / 0.02	6	7.22	6.06	7.18								
	20	0.5 / 0.034	9	10.83	9.09	10.88								
	21	0.5 / 0.034	12	14.44	12.12	14.40								
	22	0.8 / 0.034	15	18.05	15.09	18.12								
	23	0.8 / 0.034	18	21.66	18.20	22.00								
	24	0.8 / 0.066	21	25.27	21.13	25.99								
S E T 5	25	0.5 / 0.034	6	9.63	6.02	9.77								
	26	0.5 / 0.034	9	14.44	9.10	14.52								
	27	0.5 / 0.034	12	19.25	12.13	19.46								
	28	0.8 / 0.066	15	24.06	15.09	24.51								
	29	0.8 / 0.066	18	28.88	18.07	28.53								
	30	0.8 / 0.066	21	33.69	21.21	33.83								
S E T 6	31	0.5 / 0.034	6	12.03	5.96	11.97								
	32	0.5 / 0.034	9	18.05	9.11	18.03								
	33	0.5 / 0.066	12	24.06	12.17	24.71								
	34	0.8 / 0.066	15	30.08	15.09	30.60								
	35	0.8 / 0.066	18	36.09	18.11	36.28								
	36	0.8 / 0.066	21	42.11	21.17	42.61								
S E T 7	37	0.5 / 0.034	6	14.44	6.09	14.46								
	38	0.5 / 0.034	9	21.66	9.16	21.46								
	39	0.5 / 0.066	12	28.88	12.10	28.68								
	40	0.8 / 0.066	15	36.09	15.13	36.61								
	41	0.8 / 0.066	18	43.31	18.16	43.38								
	42	0.8 / 0.066	21	50.53	21.12	50.47								

Nota  
NA: No Aplica  
PO: Placa orificio

Figura N° 29 Resultados obtenidos teóricamente y experimentalmente.

En la Figura N° 30, se grafica el número total de pruebas (Teóricas y Experimentales) considerando las velocidades superficiales alcanzadas en cada una de ellas, así mismo, se observa la paridad que existió entre ambas matrices en la totalidad de los puntos evaluados.

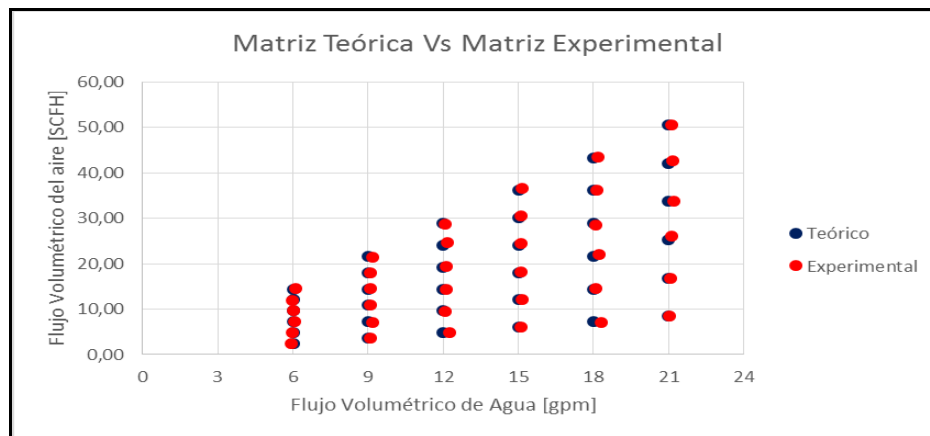


Figura N° 30 Representación gráfica de las matrices teóricas y experimentales (Ver Figura N°28).

## 4.4 ESTUDIO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DEL V-CONO Y PLACA ORIFICIO

### 4.4.1 Caída de presión vs Flujo volumétrico.

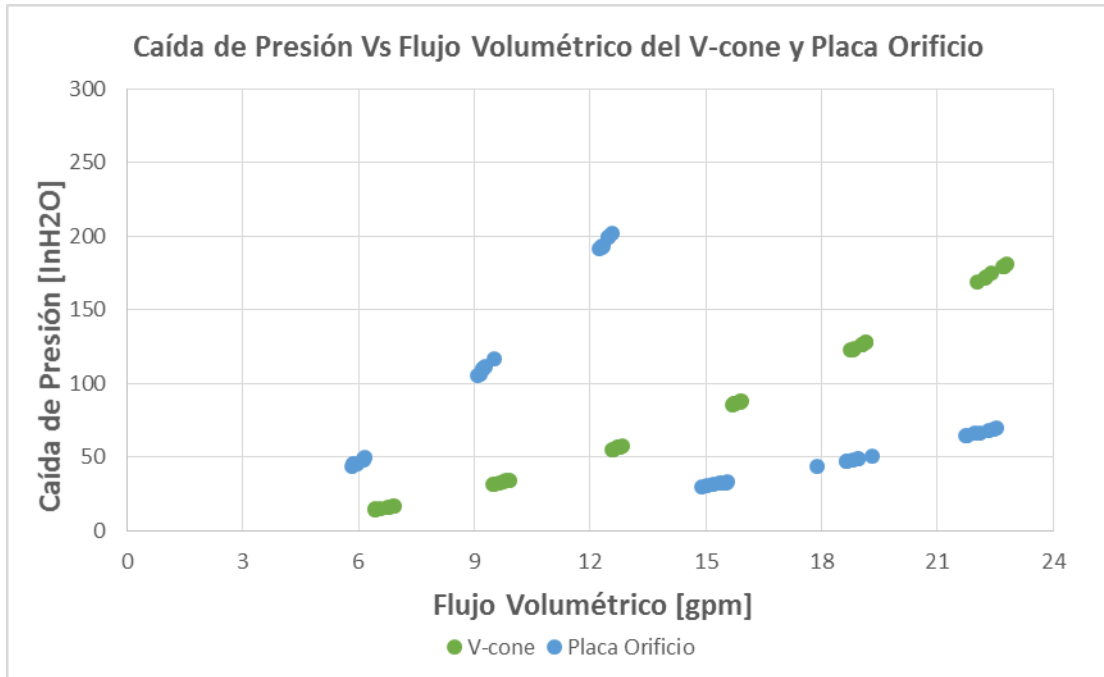


Figura N° 31 Representación gráfica de la caída de contra el flujo volumétrico del V-cono y Placa O.

Como se puede evidenciar en la Figura N° 31, la caída de presión es directamente proporcional al flujo volumétrico para ambos medidores de flujo, sin embargo se observa que para caudales entre 6 y 12 gpm el medidor placa orificio posee una mayor caída de presión con respecto al V-cono, cambiando este comportamiento a partir de caudales mayores a 15 gpm. Esto se puede atribuir al cambio de diámetro del orificio de la placa de 0,5 (6-12 gpm) a 0,8plg (15-21 gpm), ya que el fabricante establece que para obtener una medición precisa de los resultados, la caída de presión no puede estar fuera del rango comprendido de 25 y 250plg de agua. Además, se aprecia también que la caída de presión que comprende el rango de la placa de 0,5 plg incrementa con una tendencia mayor con respecto al rango establecido para la placa de 0,8plg, ya que la primera maneja intervalos de caudales menores (Ver Tabla N° 7) con respecto a la placa de mayor diámetro, de manera que esta última posee caída de

presión imperceptibles a medida que se aumenta el flujo volumétrico con respecto a la primera. Esto se puede comprobar mediante la gráfica del fabricante mostrada en el (Apéndice A).

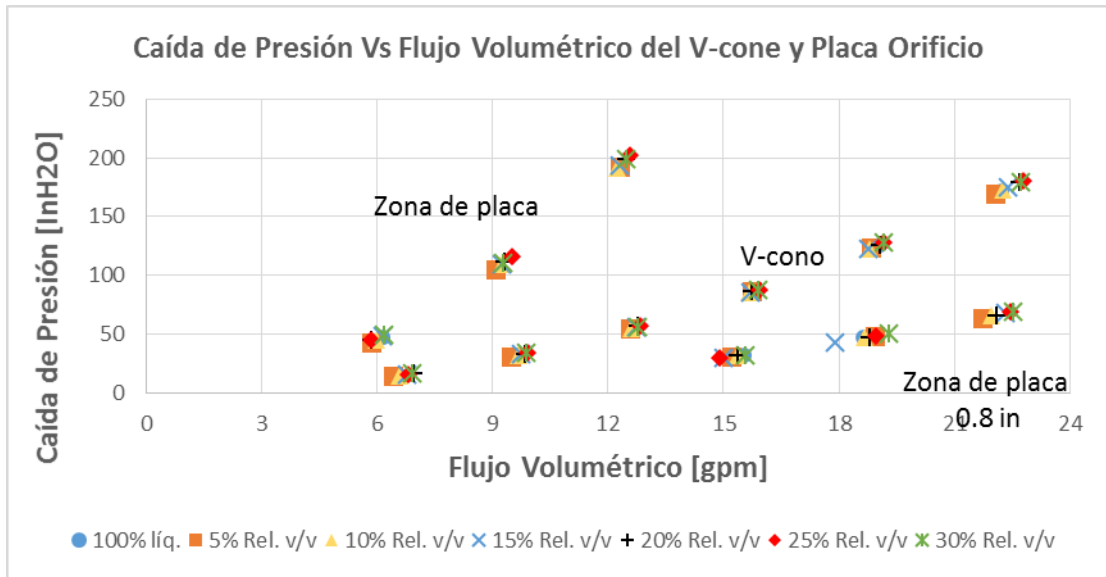


Figura N° 32 Representación gráfica de la caída de contra el flujo volumétrico del V-cono y Placa O identificando todas las fracciones volumétricas de líquido-gas.

Se puede decir que para el medidor de V-Cono la dispersión de los datos medidos variando el porcentaje de volumen v/v de gas-liquido es menor a la apreciada en la diferentes secciones del medidor de placa orificio, observando este comportamiento en la Figura N° 32.

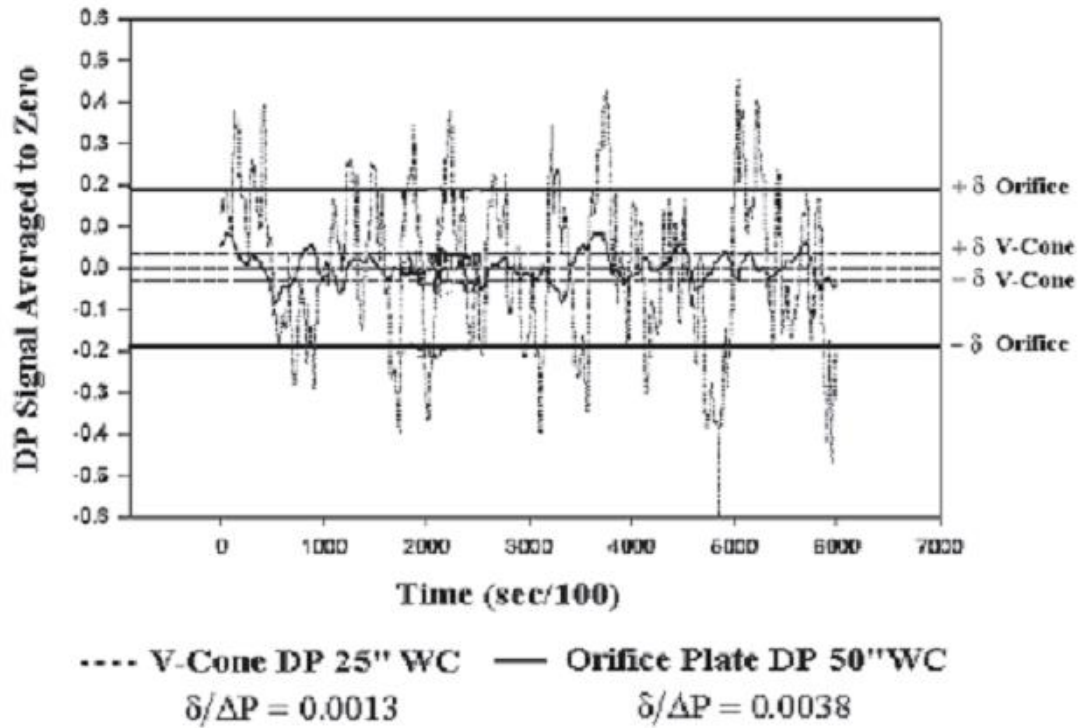
#### **4.4.2 Caída de presión Vs tiempo de captación de muestra.**

En la Figuras N° 36, 37, 38, se observa que a medida que aumenta el porcentaje de volumen de gas dentro de un flujo continuo de líquido la variación de la caída de presión es más significativa en las mediciones del medidor de flujo placa orificio específicamente en los caudales comprendidos para el diámetro de 0.5plg, esto se puede atribuir a que la caída de presión en líneas que transportan flujo bifásico es mayor que si transportaran flujo monofásico para las mismas condiciones de operación. Esto se debe a que el líquido ocupa un volumen o espacio, que de otra manera estaría ocupado por el gas, y por ende el gas debe viajar a mayor velocidad dentro de la tubería.

Sin embargo, el comportamiento mencionado cumple únicamente para el medidor de flujo placa orificio, ya que en cuanto al medidor V-cono, posee una linealidad en sus mediciones a pesar de la existencia de gas dentro de un flujo continuo y al incremento de la misma, debido a lo reportado por el fabricante (McCrometer, inc 2009-2013) que establece lo siguiente: El contorno del cono dispersa el flujo más uniformemente a través de la sección transversal total de la tubería, aplanando eficazmente el perfil de velocidad del fluido. El V-Cono actúa, básicamente, como su propio acondicionador de flujo. Por esta razón la señal de caída de presión generada por el V-Cono es estable y predecible a través de las zonas amplias que abarca el flujo. Este comportamiento se puede observar en la Figura N°32, además en un estudio reportado por el Dr. Peters y Dr. Steven (2003), se puede observar la inestabilidad en la señal que tiene el placa orificio al medir caudal en comparación al V-cono (Ver Figura N° 33)

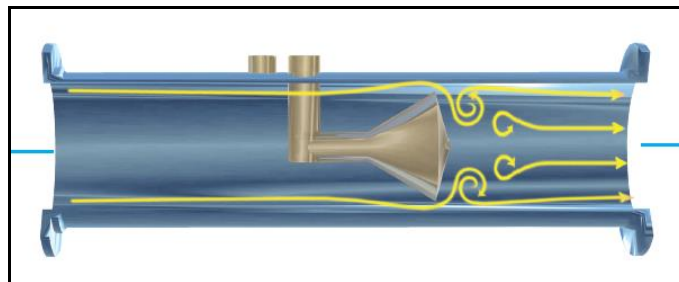


**DP Fluctuation Test**  
**Beta=0.75, Re=100,000, Velocity=130ft/s**



Fuente: Dr. Peters y Dr. Steven McCrometer (2003)

Figura N° 33 Comparación de la fluctuación en la señal emitida por el Placa Orificio y el V-cono



Fuente: McCrometer, inc 2009-2013

Figura N° 34 Dispersión del flujo a través de la sección transversal de la tubería debido al Cono dentro de la tubería.

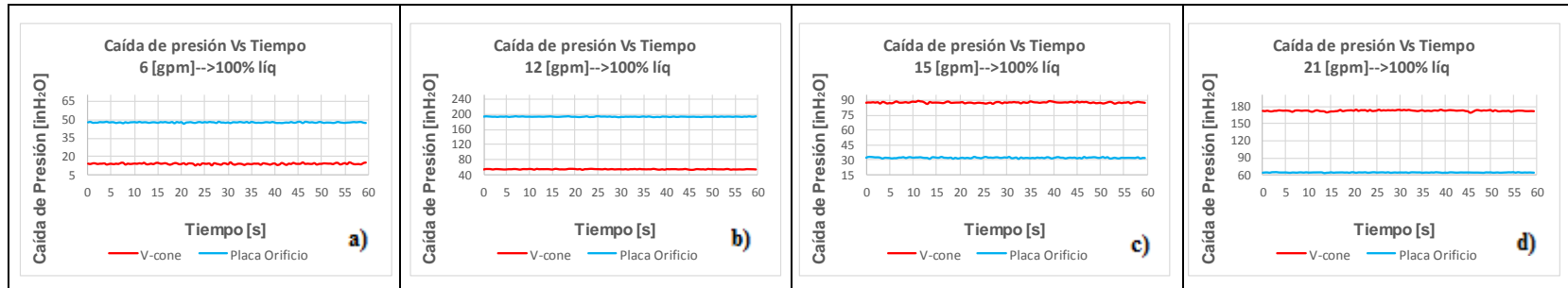


Figura N° 35 Comportamiento de la caída de presión con respecto al tiempo de los puntos comprendidos de (6, 12, 15, 21) gpm, de los medidores de flujo Vcono y Placa Orificio 100% líquido

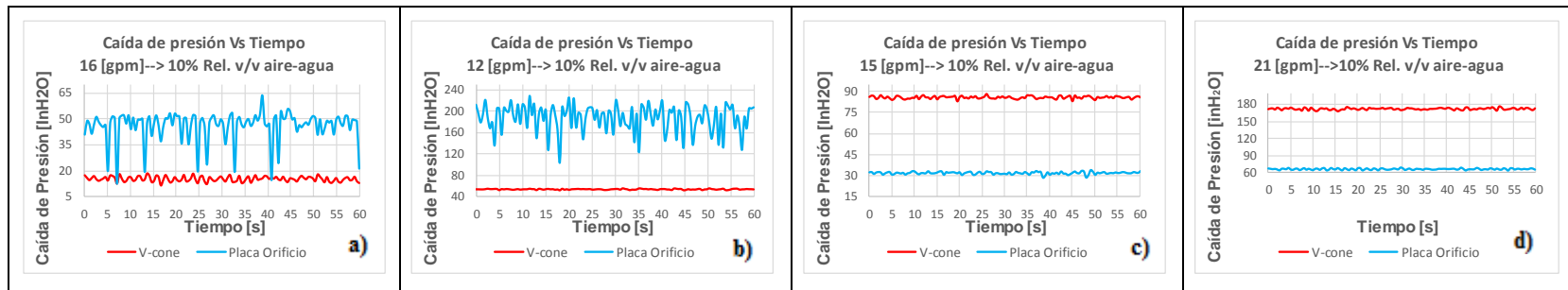


Figura N° 36 Comportamiento de la caída de presión con respecto al tiempo de los puntos comprendidos de (6, 12, 15, 21) gpm, de los medidores de flujo V-cono y Placa Orificio para una Rel. v/v 10%

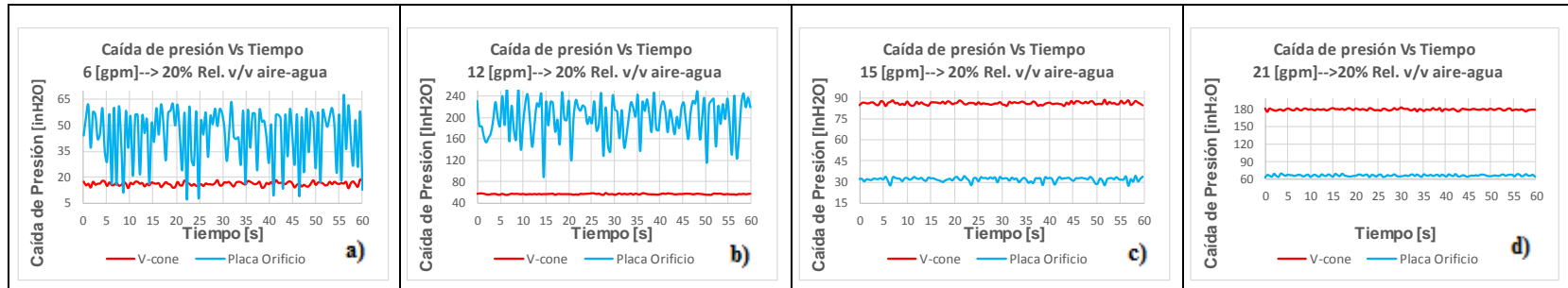


Figura N° 37 Comportamiento de la caída de presión con respecto al tiempo de los puntos comprendidos de (6, 12, 15, 21) gpm de los medidores de flujo V-cono y Placa Orificio para una Rel. v/v 20%

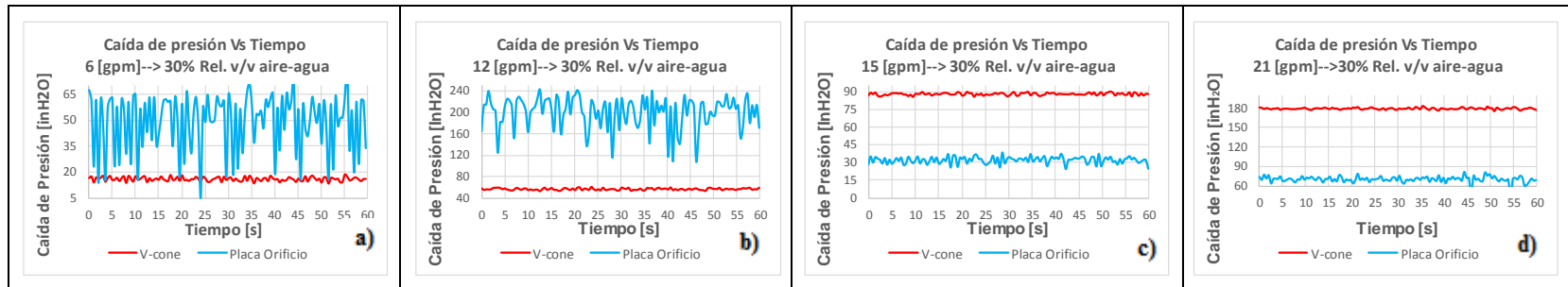


Figura N° 38 Comportamiento de la caída de presión con respecto al tiempo de los puntos comprendidos de (6, 12, 15, 21) gpm, de los medidores de flujo V-cono y Placa Orificio para una Rel. v/v 30%

A partir de lo anterior mencionado se demuestra la alternancia en los datos medidos por la placa orificio, generando así una variación mayor en cuanto a la caída de presión con respecto al V-Cono. Posteriormente se obtuvo el promedio de cada una de las gráficas y para cada medidor de flujo, para así evaluar el comportamiento entre las mediciones de relación v/v diferente. En la siguiente figura se muestra lo obtenido:

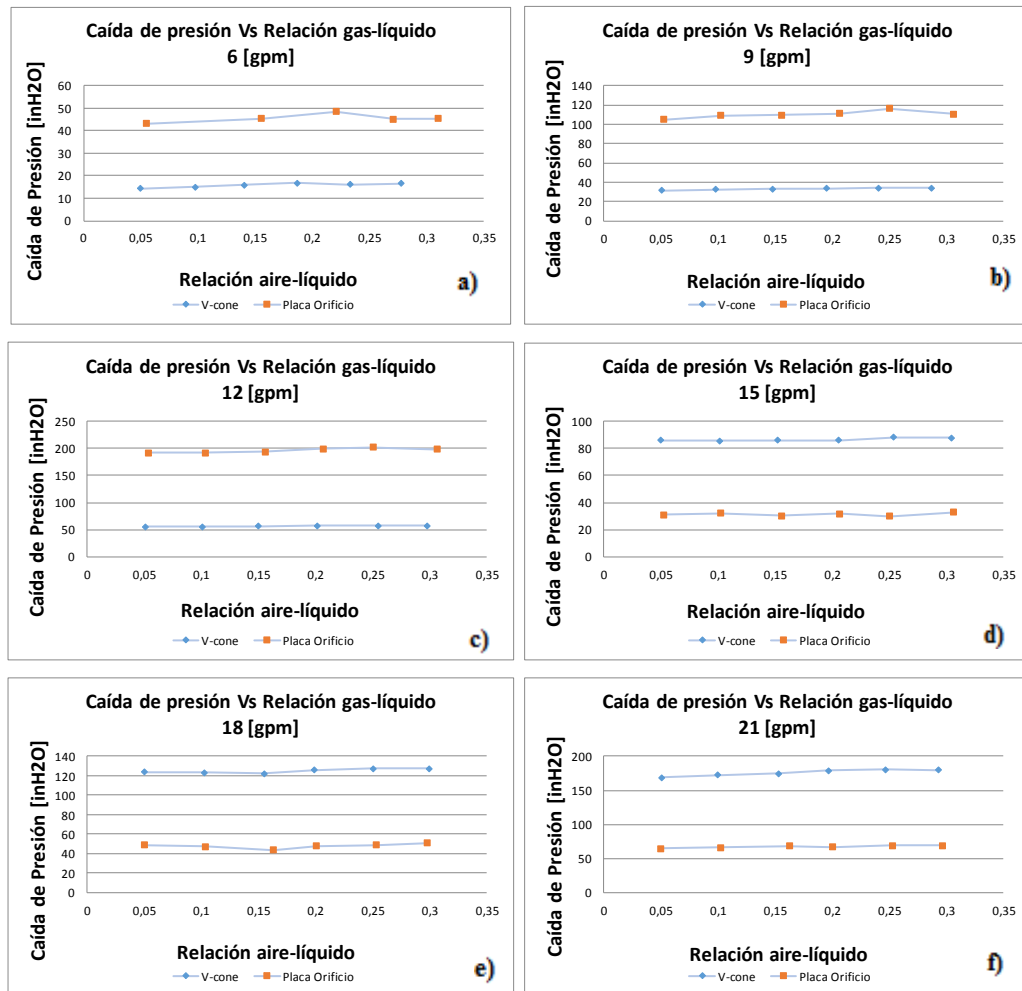


Figura N° 39 Comportamiento de la caída de presión de los caudalímetros V-cono y Placa Orificio para todas las relaciones de líquido-gas estudiadas.

De la Figura N° 39, se observa que en la placa orificio bajo la presencia de aire en un flujo continuo de líquido, muestra una variación en la medición de la caída de presión

en algunos casos (Figura N° 37- (a, b y e)), mientras que el V-cono se comporta de manera lineal en la totalidad de los casos, validando de esta manera la información proporcionada por McCrometer, inc.

#### 4.5 DESVIACIÓN DE MEDICIÓN DE LOS MEDIDORES DE FLUJO

Por otra parte, se quiere comprobar el comportamiento de los medidores de flujos monofásicos (V-Cono y placa orificio) cuando existe la presencia de un flujo bifásico (gas-liquido) es por ello que se requiere la comparación de la precisión de los datos medidos por los medidores de flujo en las distintas pruebas realizadas. En la Figura N° 41, se puede observar la desviación existente en cada una de las mediciones, comprobando de esta manera que a medida que se aumenta la cantidad de aire en el sistema la caída de presión de los medidores de flujo tienden a tener mayor dispersión entre ellas, viéndose más afectado el medidor de flujo placa orificio especialmente para caudales de 6 a 12 gpm. Cabe destacar que para el caso de 21 gpm en el V-Cono se observó la mayor dispersión de los datos, esto se puede atribuir a que el medidor de flujo a caudales mayores a 21 gpm con un porcentaje de aire mayor a 15%, este ya no se comporta de manera tan precisa.

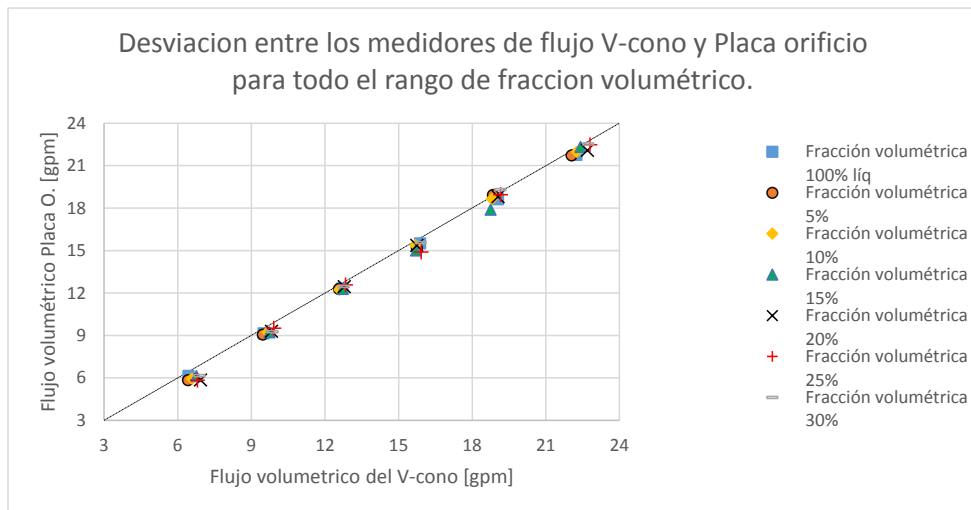


Figura N° 40 Comparación experimental en la medición de flujo volumétrico del V-cono y Placa Orificio.

Teórico		V-cone		
Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	$\Delta P$	D. Estandar	
6	100% liq.	14,45	0,98	
	5% v/v	14,36		
	10% v/v	15,08		
	15% v/v	15,94		
	20% v/v	16,74		
	25% v/v	16,11		
	30% v/v	16,55		

Teórico		Placa Orificio		
Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	$\Delta P$	D. Estandar	
6	100% liq.	47,54	2,30	
	5% v/v	43,17		
	10% v/v	45,35		
	15% v/v	48,62		
	20% v/v	45,28		
	25% v/v	45,48		
	30% v/v	49,84		

Teórico		V-cone		
Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	$\Delta P$	D. Estandar	
9	100% liq.	31,45	1,18	
	5% v/v	31,21		
	10% v/v	32,47		
	15% v/v	33,00		
	20% v/v	33,60		
	25% v/v	34,23		
	30% v/v	33,88		

Teórico		Placa Orificio		
Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	$\Delta P$	D. Estandar	
9	100% liq.	106,26	3,73	
	5% v/v	105,07		
	10% v/v	109,29		
	15% v/v	109,50		
	20% v/v	111,34		
	25% v/v	116,53		
	30% v/v	110,55		

Teórico		V-cone		
Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	$\Delta P$	D. Estandar	
12	100% liq.	56,20	0,88	
	5% v/v	54,98		
	10% v/v	55,19		
	15% v/v	56,40		
	20% v/v	56,85		
	25% v/v	57,40		
	30% v/v	56,69		

Teórico		Placa Orificio		
Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	$\Delta P$	D. Estandar	
12	100% liq.	193,38	4,08	
	5% v/v	192,35		
	10% v/v	191,61		
	15% v/v	193,54		
	20% v/v	198,94		
	25% v/v	202,15		
	30% v/v	198,83		

Teórico		V-cone		
Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	$\Delta P$	D. Estandar	
15	100% liq.	87,36	1,04	
	5% v/v	86,23		
	10% v/v	85,56		
	15% v/v	85,95		
	20% v/v	86,15		
	25% v/v	88,15		
	30% v/v	87,99		

Teórico		Placa Orificio		
Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	$\Delta P$	D. Estandar	
15	100% liq.	32,33	1,02	
	5% v/v	31,10		
	10% v/v	31,90		
	15% v/v	30,40		
	20% v/v	31,84		
	25% v/v	29,93		
	30% v/v	32,71		

Teórico		V-cone		
Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	$\Delta P$	D. Estandar	
18	100% liq.	125,91	2,14	
	5% v/v	123,58		
	10% v/v	123,11		
	15% v/v	122,36		
	20% v/v	125,84		
	25% v/v	127,62		
	30% v/v	127,60		

Teórico		Placa Orificio		
Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	$\Delta P$	D. Estandar	
18	100% liq.	46,91	2,22	
	5% v/v	48,62		
	10% v/v	47,18		
	15% v/v	43,35		
	20% v/v	47,80		
	25% v/v	48,67		
	30% v/v	50,55		

Teórico		V-cone		
Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	$\Delta P$	D. Estandar	
21	100% liq.	171,81	4,51	
	5% v/v	169,10		
	10% v/v	172,48		
	15% v/v	174,72		
	20% v/v	179,09		
	25% v/v	180,81		
	30% v/v	179,61		

Teórico		Placa Orificio		
Flugo Vol. [gpm]	Rel. v/v	$\Delta P$	D. Estandar	
21	100% liq.	64,32	2,03	
	5% v/v	64,29		
	10% v/v	65,77		
	15% v/v	67,85		
	20% v/v	66,45		
	25% v/v	68,79		
	30% v/v	69,25		

Figura N° 41 Desviación estándar de la caída de presión de todos los valores promedios de cada uno de los puntos evaluados con todas las fracciones volumétricas de líquido-gas del V-cono y placa Orificio.

#### 4.6 COMPARACIÓN DE MEDICIÓN DE FLUJO EXPERIMENTAL Y CFX DEL MEDIDOR DE FLUJO V-CONO.

Como se ha podido observar a través de los resultados mostrados en la sección IV.4.1, se ha evidenciado que el flujo volumétrico medido por el V-Cono es mayor al dado por el fabricante, de manera de verificar esta desviación se compararon los resultados obtenidos experimentalmente con los proporcionados por Botana (2015) donde realizó la simulación en CFX. En la figura N°42, se observa que existe un aumento de flujo volumétrico en la medición experimental tanto para la fase monofásica y la bifásica, además se observa en cuanto a la simulación un comportamiento variable en todos los puntos evaluados mientras que los datos obtenidos experimentalmente ofrecen un comportamiento parecido para todos los puntos evaluados, observándose con más detalle en la Figura N°43.

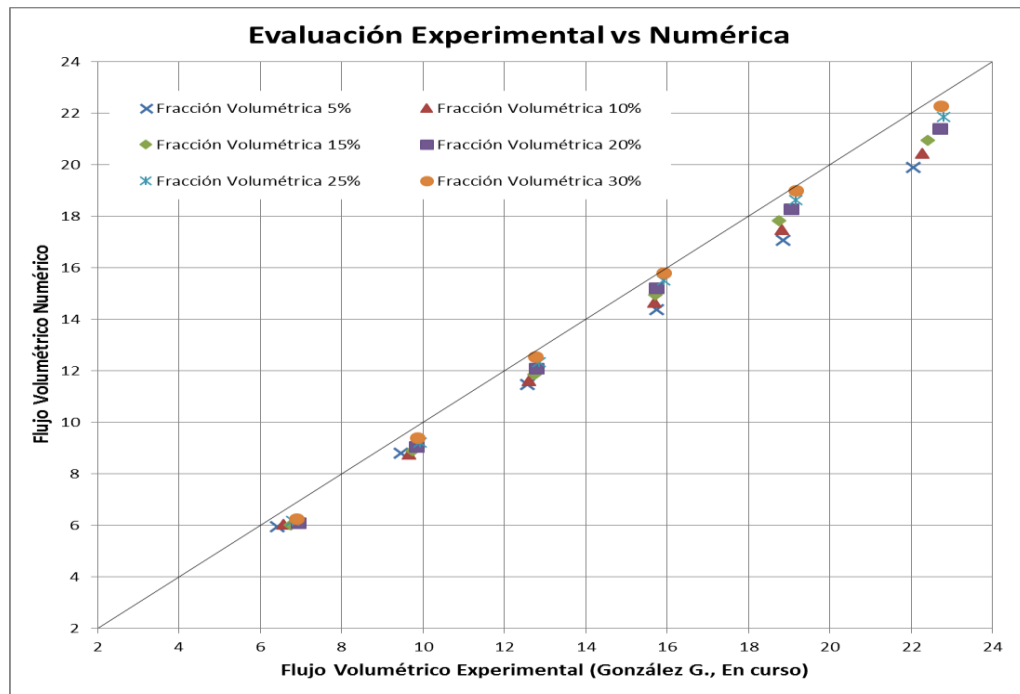


Figura N° 42 Comparación del caudal obtenido experimental en función del obtenido en simulación numérica (Botana, 2015) para todas las fracciones volumétricas estudiadas.

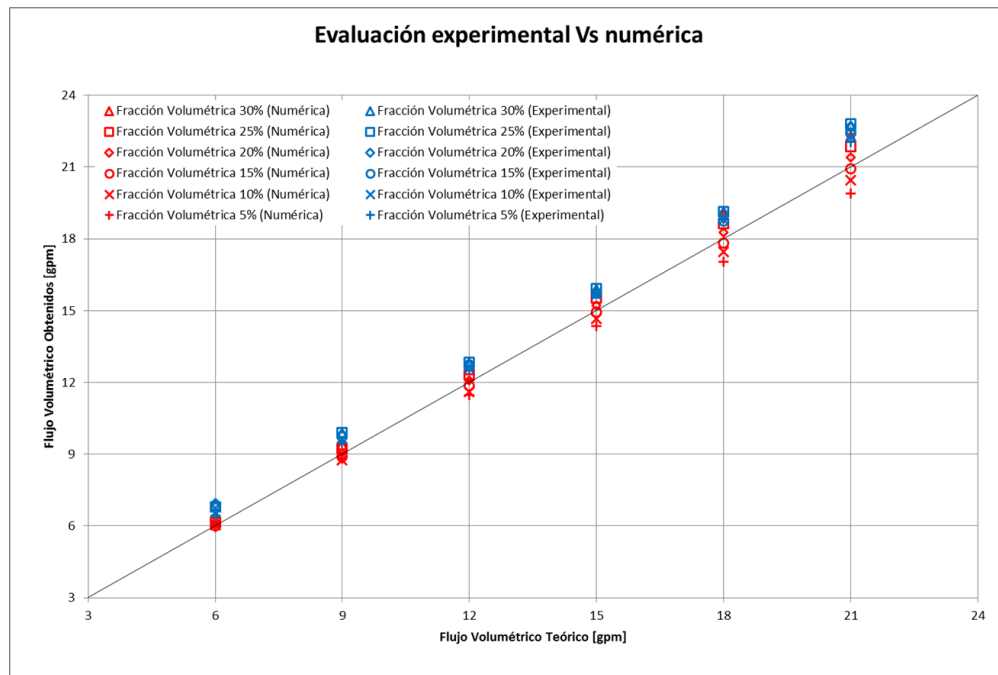


Figura N° 43 Comparación del flujo volumétrico experimental Vs numérica (Botana, 2015) para todas las fracciones volumétricas estudiadas.

Como se evidencia un aumento de flujo volumétrico en la medición experimental tanto en la fase monofásica como en la bifásica, se realizó el análisis del caudal en función de la caída de presión para 100% líquido, obteniendo la respectiva línea de tendencia y ecuación característica del análisis experimental Figura N°44.

Tabla N° 13 Incertidumbre asociada en la comparación de los valores proporcionados por el fabricante y obtenidos experimentalmente.

Fabricante		Experimental		Error relativo
Qlf [gpm]	$\Delta P$ [inH2O]	Qle [gpm]	$\Delta P$ [inH2O]	
6	12,48	6,44	14,45	6,88%
9	28,10	9,51	31,45	5,31%
12	49,93	12,71	56,20	5,56%
15	78,03	15,88	87,36	5,54%
18	112,35	19,05	125,91	5,51%
21	152,93	22,25	171,81	5,60%
				5,74%



En la Tabla N°13 se evidencia la discrepancia en las mediciones experimentales del medidor de flujo V-cono con las proporcionadas por el fabricante, viendo así un error sistemático, ya que los valores de error en todas las mediciones son muy parecido. Midiendo el experimental siempre por encima un 5% en todos los puntos evaluados.

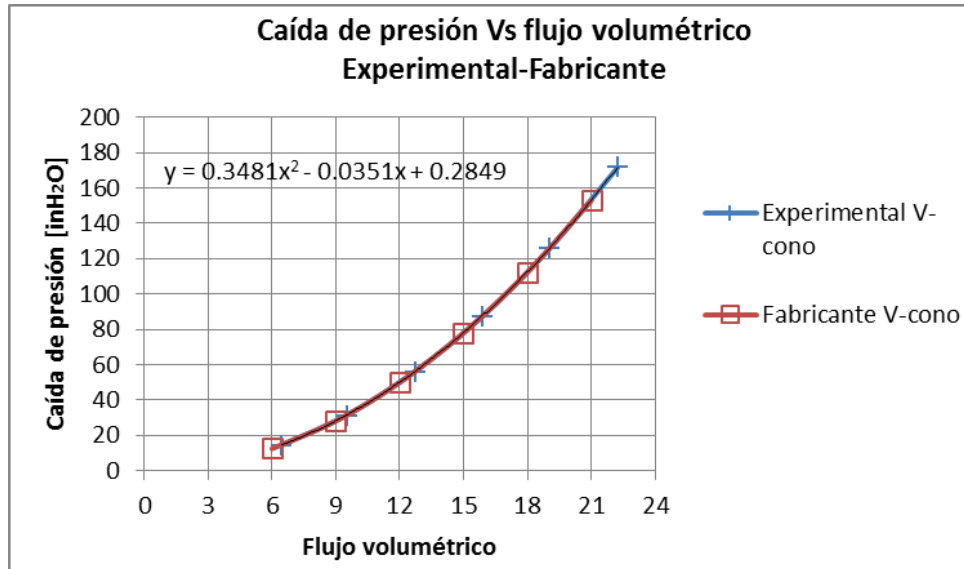


Figura N° 44 Medición de la caída de presión para un valor de caudal respectivo del caudalímetro del tipo V-cono

Como ejercicio para la verificación de los datos obtenidos, en la ecuación característica obtenida de los datos experimentales, se ingresaron los datos dados por el fabricante, verificando de esta manera que la curva generada por los datos experimentales es análoga a la curva obtenida por los datos proporcionados por el fabricante. Atribuyendo entonces el hecho del aumento de flujo a posibles errores de medición asociados al Coriolis o a algún instrumento mal posicionado en la sección correspondiente al tramo del colioris y V-Cono.

Tabla N° 14 Incertidumbre asociada en la comparación de los valores proporcionados por el fabricante y los obtenidos con la ecuación característica de la curva experimental.

Fabricante		Experimental Evaluando pts. del fabricante		Error relativo
Qlf [gpm]	$\Delta P$ [inH2O]	Qle [gpm]	$\Delta P$ [inH2O]	
6	12,48	6	12,60	0,97%
9	28,10	9	28,16	0,25%
12	49,93	12	49,99	0,11%
15	78,03	15	78,08	0,07%
18	112,35	18	112,43	0,08%
21	152,93	21	153,05	0,08%
				Total: 0,26%

#### **4.7 VALIDACIÓN DEL PATRÓN DE FLUJO CONDICIONADO PARA EL DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES PROPUESTAS.**

En la Figura N°45 se presenta el mapa de patrones de flujo obtenidos experimentalmente, Y en la Figura N° 46 se observa el mapa de patrones de flujo propuesto por Taitel y Dukler (1976), de manera tal que se pueda validar los resultados de los patrones de flujos obtenidos experimentalmente. Comparando estos dos gráficos se puede notar que los puntos de color azul que comprenden todos los valores para 6 gpm con relación volumen/volumen de aire de (5 a 30) %, no pertenecen al grupo de patrón de flujo del tipo burbujas de aire dispersas dentro de un flujo de líquido continuo. Mientras que todos los demás puntos evaluados efectivamente si entran dentro de la zona.

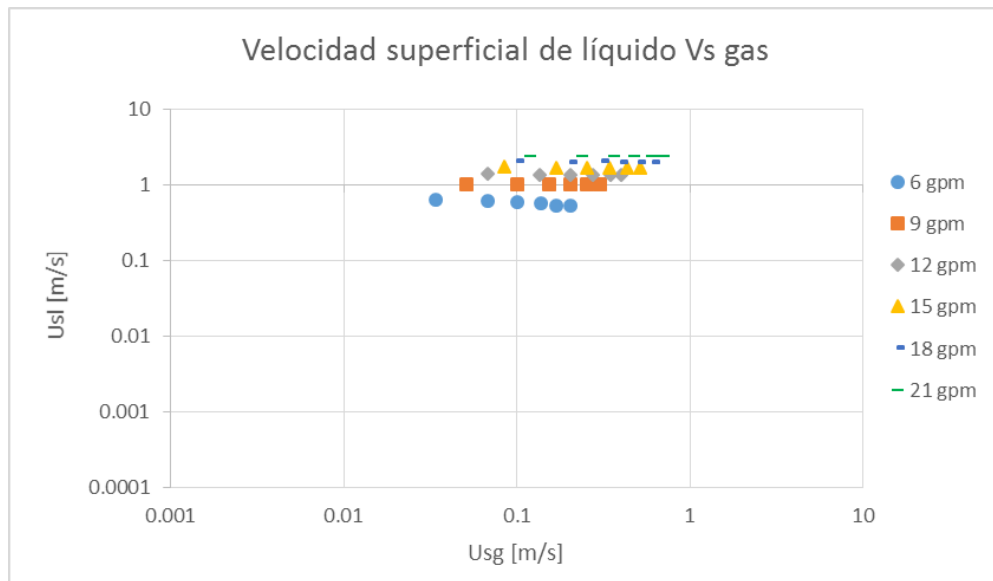
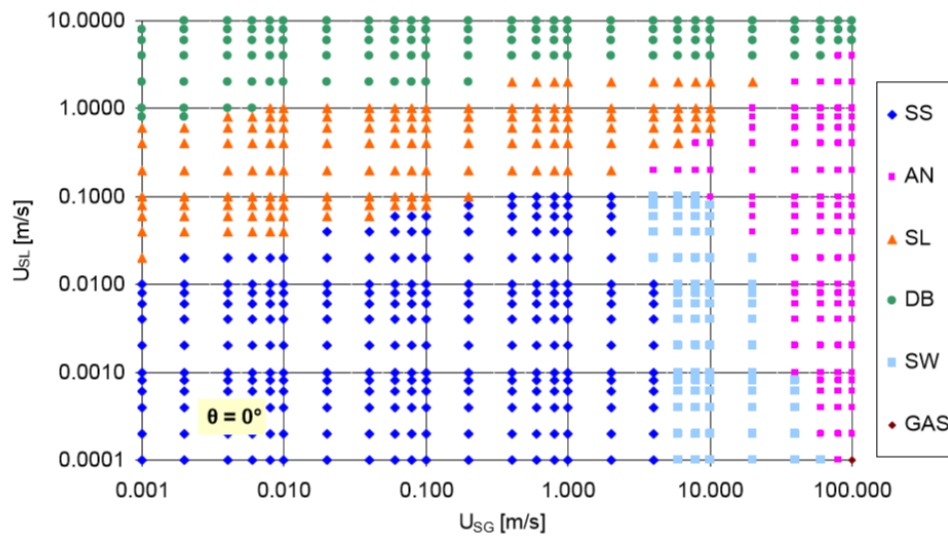


Figura N° 45 patrones de flujo obtenidos experimentalmente de las pruebas bifásicas.



Fuente: Haoulo 2007

Figura N° 46 Mapa de patrones de flujo teórico modelo de Taitel y Dukler (1976) para tuberías horizontales.

donde:

SS: Patrón de flujo estratificado liso

AN: Patrón de flujo anular con líquido disperso.

SL: Patrón de flujo Tapon

DB: Patrón de flujo burbujas dispersas-

SW: Patrón de flujo estratificado ondulado.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el capítulo anterior, fue posible obtener una serie de conclusiones con respecto al presente Trabajo Especial de Grado.

- 1 Se logró determinar la matriz de prueba que fue desarrollada en la presente investigación a partir de los datos proporcionados por el fabricante del caudalímetro V-cono (McCrometer), en base a un patrón de flujo burbujas de aire dispersas dentro de un flujo de líquido continuo.
- 2 Fue posible la completa adecuación del banco de ensayos para la realización de todas las pruebas implementadas en la matriz de prueba determinada, en condiciones de flujo monofásico y bifásico (agua y aire) en dirección horizontal.
- 3 Se instalaron y calibraron todos los instrumentos de medición del banco de ensayos, determinando así el error de medición asociado a cada uno de ellos.
- 4 Se logró plasmar un instrumento virtual “VI” mediante la aplicación LabView 2011, el cual permitió monitorear, controlar y simultáneamente almacenar los datos obtenidos en las pruebas elaboradas en el banco de ensayos.
- 5 En las pruebas monofásicas, el caudalímetro que tuvo mejor comportamiento con respecto al medidor de flujo patrón fue la placa orificio, mostrando una incertidumbre aproximada del 2%, mientras que el V-cono presentó una incertidumbre cercana al 5%.
- 6 El medidor de flujo que se vio menos afectado en la caída de presión por la presencia de aire en las pruebas bifásicas líquido-gas, fue el medidor de flujo V-cono, presentando una desviación estándar menor, en la mayoría de las pruebas.
- 7 Bajo las condiciones proceso con la que contaba el banco de ensayos, se evidenció la presencia de un error sistemático aproximada a 5% en la medición

del caudal del V-cono, a diferencia del error (aleatorio) reportada en la simulación numérico (CFX). Atribuyendo el hecho del aumento de flujo a posibles errores de medición asociados al Coriolis o a algún instrumento mal posicionado en la sección correspondiente al tramo del Colioris y V-Cono.

- 8 Para el medidor de flujo placa orificio con  $d = 12,7 \text{ mm}$  (0,5 plg) donde se manejan caudales comprendidos entre  $0,000379$  a  $0,000757 \text{ m}^3/\text{s}$  (6 a 12 gpm), la fluctuación de la caída de presión en función del tiempo es considerablemente mayor que la de la placa orificio con  $d = 20,32 \text{ mm}$  (0,8 plg) para el rango de  $0,000946$  a  $0,00132 \text{ m}^3/\text{s}$  (15 a 21 gpm).
- 9 Se comprobó la aplicabilidad de la placa orificio con flujo monofásico (líquido) según lo reportado en la bibliografía consultada.
- 10 El V-cono generó mejores resultados que con la placa orificio trabajando en flujo bifásico, debido a la poca dispersión en la medición de la caída de presión, fluctuación de esta en función del tiempo y versatilidad en la aplicabilidad del caudal.

## 5.2 RECOMENDACIONES

En base a las conclusiones mencionadas anteriormente, es posible plantear unas recomendaciones para trabajos futuros. Estas recomendaciones se enuncian a continuación:

- 1 Ampliar la data experimental trabajando fuera del rango de operación del presente Trabajo Especial de Grado. Para ello es necesario el uso de caudalímetros para la línea de líquido y para la línea de gas que operen en un rango diferente al ya existente, así como el aumento en la capacidad de la bomba.
- 2 Realizar otras investigaciones utilizando diferentes fluidos en las mezclas multifásicas, con el objetivo de evaluar el efecto de las propiedades del fluido en la caída de presión del medidor tipo Placa Orificio y V-cono.
- 3 Utilizar un compresor con mayor capacidad para realizar las pruebas monofásicas de aire y determinar el comportamiento de la caída de presión de los medidores de flujo implementados.
- 4 Colocar tanques de almacenamiento de líquido con mayor capacidad para trabajar con mayores caudales y extender el rango de estudio de los medidores de flujo.
- 5 Colocar tramos de plexiglás aguas arriba y aguas abajo del medidor de flujo placa orificio con el fin de observar el comportamiento de los patrones de flujo.
- 6 Hacer la reconstrucción del banco de ensayos con tuberías que tengan mayor resistencia a la corrosión.
- 7 Evaluar bajo otras condiciones de instalación el caudalímetro V-cono, para verificar la posible existencia de errores sistemáticos asociados.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alarcón, G., (1998). Flujo de dos fases. Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, ULA, Venezuela.
2. Barson, R. C., Preedy, J. E., & Williams, J. J. (1993). The economic advantage of using three phase subsea meters. Proc. Sem. Multiphase Meter and their Subsea Applications. Londres.
3. Campos O. (2008). Diseño de un programa de cómputo para dimensionar medidores de flujo por presión diferencial en líquidos. Trabajo especial de grado. Escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México, D.F.
4. Campos, S.R.V. et al (2014, June-28). Orifice plate meter field performance: Formulation and validation in multiphase flow conditions. Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, Brazil.
5. Chao, T. et al (2013, September-5), Horizontal oil–water two-phase flow measurement with information fusion of conductance ring sensor and cone meter. Tianjin Key Laboratory of Process Measurement and Control, School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin, China.
6. Corneliusen, S., Couput, J. P., Dahl, E., Dykesteen, E., Frøysa, K. E., Malde, E., et. al. (2007, Octubre). *Handbook of Multiphase Flow Metering*. Recuperado el 14 de Enero de 2009, de NFOGM: <http://www.nfogm.no/>
7. Crane, (1997). Flujo de fluidos en válvulas accesorios y tuberías.
8. Creus, A. (1998). Instrumentación Industrial, Marcombo, S.A, Barcelona España.
9. Deng-Hui He y Bo-Feng Bai (2014, April-16), Two-phase mass flow coefficient of V-Cone throttle device. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China.
10. Falcone, G., Hewit, G. y Alimonti, C. (2009) Multiphase Flow Metering. Ámsterdam.
11. Frank M. White (2012). Fluid Mechanics 6ª Edition. University of Rhode Island.
12. Frank M. White, (2013). Fluid Mechanics. Four edition. University of Rhode Island.
13. Gómez Y. (2005). Diseño de un banco de ensayos para el estudio de flujo bifásico isotérmico de gas y de líquido en tuberías. Trabajo especial de grado .Universidad Central de Venezuela. Caracas.
14. González J. (2006), Análisis, diagnóstico y simulación de redes en tuberías. Ecuaciones fundamentales para el flujo monofásico en tuberías.
15. Haoulo M. (2007). Estudio experimental de patrones de flujo bifásico gas-líquido

- en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
16. Hollingshead, C.L. et al (2011, August-23). Discharge coefficient performance of Venturi, standard concentric orifice plate, V-cone and wedge flow meters at low Reynolds numbers. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Utah State University, Logan, UT, United States.
  17. Informe técnico 14879, (2015). Descripción completa del circuito para medición de campos de velocidad en flujo confinado mediante el uso de la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV). Intevep-PDVSA.
  18. Jean-F. Dulhoste, José D. Montenegro, Rafael Santos, Marcos Guillén. (SF). Estudio del diseño de un medidor de flujo del tipo V-cone. Universidad de Los Andes. Mérida – Venezuela.
  19. Jean-F. Dulhoste, Marcos Guillén, Carlos Espinoza, Raúl Duarte. (SF). Estudio Introductorio Del Funcionamiento De Un Medidor De Flujo del Tipo V-Cone. Universidad de Los Andes. Mérida - Venezuela.
  20. Mateos, J. G. (1999) Acondicionamiento de señales. Universidad de Guadalajara. [http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/Modulo\\_05/detectores/orificio/](http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/Modulo_05/detectores/orificio/)
  21. McCrometer, Inc (2002-2007). Tecnología avanzada de medidores de flujo de presión diferencial V-cono.
  22. McCrometer, Inc (2009-2013). Tecnología avanzada del medidor de flujo de presión diferencial.
  23. Mehdizadeh, P. and Farchy, D., (1995). Multi-phase flow metering using dissimilar flow sensors: theory and field trial results.
  24. Mott, Robert L. (1996) Mecánica de Fluidos Aplicada. Prentice Hall Hispanoamericana, 4ª Edición.
  25. Mubayed H.M., (2007, Abril). Estudio experimental de patrones de flujo bifásico gas-líquido en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas. Universidad Central de Venezuela
  26. Norma ASME PTC, (1998). Test uncertainty. Instrument and Apparatus.
  27. Norma ISO 5167-1, (2003). General principles and requirements. Second edition.
  28. Norma ISO 5167-2, (2003). Orifice Plates. First edition.
  29. Norma ISO/DIS 5167-5, (2014). Cone meters.
  30. Norma ISO/TS, (2004). Guidance for the use repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation.
  31. Pirouzpanah, S. et al (2014, October-19), Multiphase flow measurements using coupled slotted orifice plate and swirl flow meter. Department of Mechanical



Engineering, Texas A&M University, Texas, TX, USA.

32. Rivas, A. I. (2013) Serie autodidáctica de medición del agua.  
[http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Placa\\_orificio.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Placa_orificio.pdf).
33. Shoham, O. (2005). Two-phase flow modeling. The University of Tulsa. Department of Petroleum Engineering.
34. Soldovieri, T. (2009). Una introducción a los fluidos, vibraciones y termodinámica con numerosos ejemplos e ilustraciones.
35. Steven, R. (2008, June-10). Horizontally installed cone differential pressure meter wet gas flow performance. Director of Multiphase and Wet Gas Flow Research Colorado Engineering Experiment Station, USA.
36. Thorn, R., Johansen, G., & Hammer, E. (1997). Recent developments in three-phase flow measurement. *Measurement Science Technology* (8), 691-701.
37. Zhang, H. J., Yue, W. T., & Huang, Z. Y. (2005). Investigation of oil-air two-phase mass flow rate measurement using Venturi and void fraction sensor. *Journal of Zhejiang University Science*.

## **APÉNDICE**

# APÉNDICE

## Apéndice A: Descripción y características del Placa Orificio

Reference Manual  
00809-0100-4686, Rev JA  
October 2011

## Rosemount Integral Orifice Flowmeter Series

### Handling

The product tag is not designed to withstand the weight of the orifice - do not lift the product by the tag.

### Straight Run Requirements

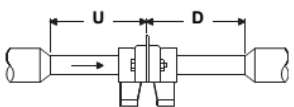
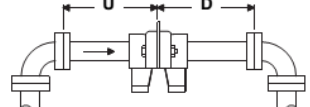
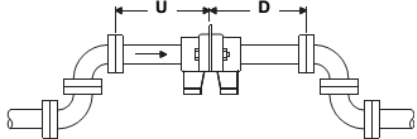
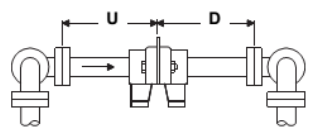
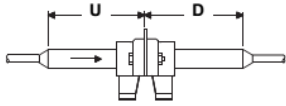
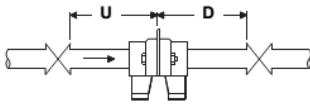
Pipe Length Requirements for Installation	
<b>FIGURE A. Reducer</b> (2 d to d over a length of 1.5 d to 3 d) 	<b>FIGURE B. Single 90° Bend</b> flow from one branch only 
<b>FIGURE C. Two or More 90° Bends in the Same Planes</b> 	<b>FIGURE D. Two or More 90° Bends in Different Planes</b> 
<b>FIGURE E. Expander</b> (0.5 d to d over a length of d to 2 d) 	<b>FIGURES F and G. Ball/Gate Valve Fully Open</b> 

TABLE 1. Recommended lengths of pipe

The following chart gives the upstream (U) and downstream (D) lengths as a guideline recommended by ISO 5167 for the above installations. The lengths are given in terms of pipe diameters. For example, for a 1-in. line size with a beta ratio (b) of 0.4 using installation type B above, the straight length of upstream piping required is  $16 \times 1 = 16$  in., and downstream  $6 \times 1 = 6$  in.

$\beta$	On Upstream (U)						On Downstream (D) FIGURES A - G
	FIGURE A <sup>(1)</sup>	FIGURE B <sup>(1)</sup>	FIGURE C <sup>(1)</sup>	FIGURE D <sup>(1)</sup>	FIGURE E <sup>(1)</sup>	FIGURE F and G <sup>(1)</sup>	
<0.20	5 <sup>(2)</sup>	6 (3)	10 <sup>(2)</sup>	34 (17)	6 <sup>(2)</sup>	12 (6)	4 (2)
0.40	5 <sup>(2)</sup>	16 (3)	10 <sup>(2)</sup>	50 (25)	12 (8)	12 (6)	6 (3)
0.50	8 (5)	22 (9)	18 (10)	75 (34)	20 (9)	12 (6)	6 (3)
0.60	9 (5)	42 (13)	30 (18)	65 (18)	26 (11)	14 (7)	7 (3,5)
0.67	12 (6)	44 (20)	44 (18)	60 (18)	28 (14)	18 (9)	7 (3,5)
0.75	13 (8)	44 (20)	44 (18)	75 (18)	36 (18)	24 (12)	8 (4)
	<b>U</b>						<b>D</b>

(1) Values in parenthesis correspond to an additional +0.5% discharge coefficient uncertainty.

(2) Straight length gives zero additional uncertainty; data not available for shorter lengths.

Las longitudes de tramos recto aguas arriba y aguas abajo seleccionados para el desarrollo de las pruebas en la presente investigación experimental fueron 75D y 8D respectivamente, seleccionando el caso más extremo para garantizar el completo desarrollo del fluido.

## Rosemount Integral Orifice Flowmeter Series

**Reference Manual**  
00809-0100-4686, Rev JA  
October 2011

### **Bolting a transmitter to the Rosemount 1195**

If the 1195 is ordered separately from the 3051S or 3095MV transmitter and will be used in a direct mount configuration, it will need to be assembled to the transmitter.

#### **NOTE**

Factory assembly is recommended for best performance.

#### **Bolt to a 3- or 5-Valve Manifold**

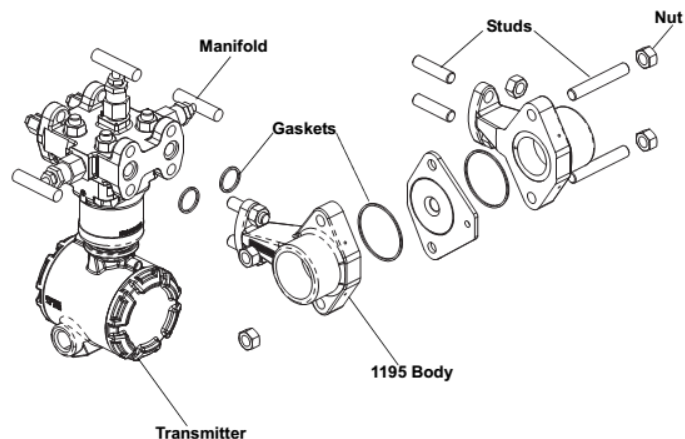
1. Use studs and nuts supplied with the 1195 to connect to the transmitter sensor and manifold.
2. Always use a 3- or 5-valve manifold when direct mounting a transmitter to the 1195.
3. Observe the side of the orifice plate marked "Inlet." This side should align to the High Pressure side of the DP transmitter.
4. Torque the bolts to 38 ft-lb.

#### **NOTE**

Protect the transmitter sensing diaphragms and do not remove the o-rings in transmitter sensor module.

5. Carefully assemble the 1195 to the pressure transmitter sensor making sure the "H" and "L" on transmitter and primary match.
6. Preload to 150 in./lbs then final torque at 300 in./lbs.

Figure 2-2. Bolting the 1195  
to a transmitter



Esquema y partes del medidor de flujo utilizado en el presente trabajo especial de grado.

## Apéndice B: Descripción y características del V-cono

### V-Cone® Preliminary Sizing

By MATCO TECHNOLOGY CA

Tag #	12571 AGUA	Fluid	WATER
Serial #	11-5169	Fluid State	LIQUID
Job Ref.	12571280712	End User	INTEVEP
Model	VW01AC14N2	Industry	Other Industrial (000)

Description	V-Cone 1" S316L Bored, ANSI WN CL150 RF, 1/4" NPT
Note	

$C_f$	0.85	$q$ max. Flowrate	30	GPM	McCrometer Cal.	
$P_f$	30 psiG	$Re$ max. Reynolds	1.022e+05		Third Party Cal.	
$T_f$	80 °F	$V$ max. Velocity	11.14	fps	Dye Pen. Exam.	
$\rho$	62.09 lb/ft3	$\Delta P$ max. Dp	11.275	psi	Hydro. Test	
$\mu$	0.8799 cP	$\Delta P$ min. Dp	0.1128	psi	X-Ray Exam.	
$G$		$D$ Meter I.D.	1.049	in	Mag. Part.	
$Z$		$d$ Cone O.D.	0.8750	in	PMI	
$Y$		$\beta$ Beta Ratio	0.5516		CMTR Copies	
$k$		Turn Down	10		Application Eng.	EG
$C_p$						
$M_w$	18.015					
$P_b$						
$T_b$						
$Z_b$						
$P_{baro}$	14.696 psi					
$P_c$	3198.8 psi					
$T_c$	705.13 °F					
$F_a$	1.000					
aPE	D 6.7e-06 d 6.7e-06					
$P_v$	0.5076 psi					
HL	190 inWC					

	Re	Velocity fps	Gas. Exp. Y	$\Delta P$ psi	Flowrate GPM
1	1.022e+05	11.14		11.28	30.000
2	92000	10.02		9.133	27.000
3	81780	8.909		7.216	24.000
4	71560	7.796		5.525	21.000
5	61340	6.682		4.059	18.000
6	51110	5.568		2.819	15.000
7	40890	4.455		1.804	12.000
8	30670	3.341		1.015	9.0000
9	20450	2.227		0.4510	6.0000
10	10220	1.114		0.1128	3.0000

← Entered value.

Table based on one flow condition (P, T, Z, k ...) V25 Version 4.3

Record Start Date	
Print Date	08-09-2012

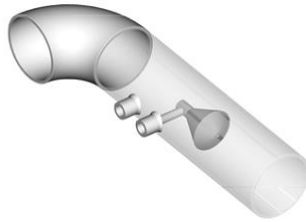


File: S11516~1.V25

Datos proporcionados por el fabricante, utilizado para el desarrollo de los experimentos en la presente investigación.

## Requisitos de instalación

Debido a su capacidad de aplanar el perfil de velocidad, el V-Cone se puede colocar mucho más cerca de las perturbaciones situadas aguas arriba que otros medidores de Dp. Se recomienda instalar el V-Cone dejando de cero a tres diámetros de tubería recta aguas arriba del instrumento y de cero a un diámetro aguas abajo. Esto puede ser beneficioso para los usuarios que utilizan líneas grandes y costosas, y también para aquellos que sólo disponen de tramos cortos. McCrometer ha realizado pruebas de rendimiento del V-Cone aguas abajo de un codo de 90° y de dos codos de 90° acoplados en diferentes planos. Las pruebas demostraron que el V-Cone se puede instalar junto a codos sencillos o junto a dos codos colocados en planos diferentes sin sacrificar su precisión.



Codo sencillo y el V-Cone  
Figura 4



Dos codos y el V-Cone  
Figura 5

### 2.5 Desempeño a largo plazo

La forma contorneada del cono estrecha el flujo sin golpearlo contra una superficie abrupta. A lo largo de la superficie del cono se forma una barrera que aleja el fluido del borde beta y evita que el cono se desgaste por la acción de fluidos con impurezas. Debido a esto, la relación beta no se altera y la calibración del medidor mantiene su precisión durante mucho más tiempo.



3255 WEST STETSON AVENUE • HEMET, CALIFORNIA 92545 USA Page 4 de 11

TEL: 951-652-6811 • 800-220-2279 • FAX: 951-652-3078

Printed In The U.S.A Lit. #24508-94 Rev.2.9/02-08

Copyright © 2002-2007 McCrometer, Inc. All printed material should not be changed or altered without permission of McCrometer. Any published pricing, technical data, and instructions are subject to change without notice. Contact your McCrometer representative for current pricing, technical data, and instructions.

### Apéndice C: Descripción de la bomba.

La bomba de inyección de líquido utilizada para realizar las pruebas experimentales en el presente trabajo especial de grado, es una bomba rotativa de desplazamiento positivo marca Viking, con una presión máxima de operación de 14 bar (200psi), velocidad máxima de operación 1750 rpm y una capacidad máxima de flujo de 30 gpm.



	Size	Standard Port	Nominal Capacity At Maximum Speed		Maximum Speed	Maximum Pressure		
		Inches	GPM	M <sup>3</sup> /hr	RPM	PSI	BAR	
CAST IRON - DUCTILE IRON - STEEL	H	1.5	15	3	1,750	200	14	
	HL	1.5	30	7	1,750	200	14	
	K	2	75	17	780	200	14	
	KK	2	100	23	780	200	14	
	L	2	135	31	640	200	14	
	LQ	2.5	135	31	640	200	14	
	LL	3	140	32	520	200	14	
	LS	3	200	45	640	200	14	
	Q	4	300	68	520	200	14	
	M	①	4	420	95	420	200	14
	QS		6	500	114	520	200	14
	N		6	600	136	350	200	14
	R		8	1,100	250	280	200	14
	RS		10	1,600	365	280	125	8.5
P	①	10	1,500	340	230	125	8.5	

Fuente: Viking Pump

**Apéndice D: Minuta de mesa de trabajo.**



Gerencia General de Producción  
Gerencia Técnica de Infraestructura y Mejoramiento

**MINUTA (PROYECTO ID ASEFLUMAC)**

Tipo de Reunión:

<input type="checkbox"/>	Aclaratoria	<input type="checkbox"/>	Informativa
<input checked="" type="checkbox"/>	Arranque	<input type="checkbox"/>	Avance
<input type="checkbox"/>	Seguimiento	<input type="checkbox"/>	Cierre
<input type="checkbox"/>	Otro. Especifique _____		

No.: 1

Agenda asociada No.: N/A

Lista de Asistencia No.: N/A

Autor: Luis Daniel Pérez Lugar: Laboratorio Norte 6 (Piso 3)  
 Organización: PDVSA Intevep Fecha: 16/03/2015  
 Asunto: Reunión Arranque Vcone+Woca (medidor multifásico en línea) Hora: 02:30 pm – 4:30 p.m

Nombre y Apellido	Gerencia	Departamento	Indicador	Telefono
Luis Daniel Pérez	PRIM	Transporte	perezlu	58180
Miguel Bravo	PRIM	Mecatrónica	bravomu	56594
Jorge Rojas	PRPP	Mecatrónica	rojasjll	58493
Fabio Tamburini	PRPP	Mecatrónica	tamburinifa	58875
Jofrank Perdomo	PRPP	Mecatrónica	perdomojg	58303
Guillermo Lombano	PRIM	Mecatrónica	lombanog	57251
Ramón Cabello	PRIM	Transporte	cabellor	56138
Gerardo Gonzalez	PRIM	Tesista-Transporte	gonzalezgeh	56661
Andres Botana	PRIM	Tesista-Transporte	botanaa	56661
Gustavo Bentivenga	PRIM	Tesista-Transporte	bentivegnag	56661

1. Luis Pérez inicia reunión explicando alcance de la actividad de desarrollo para medición de flujo multifásico en línea mediante la integración de los instrumentos vcone y woca.
2. Actividades a desarrollar:
  - a. Adecuación del circuito para instalación de equipos (Vcone, Placa orificio, micromotion, woca)
  - b. Comparación de la medición de flujo monofásico volumétrico del Vcone, Placa, Mircromotion y tanque.



- c. Utilización de Vcone para determinar flujo volumétrico multifásico agua-aire para diferentes caudales (según matriz de prueba)
  - d. Utilización de Woca para determinar fracción volumétrica aire líquido para diferentes caudales de flujo multifásico agua-aire (según matriz de prueba)
3. Jorge Rojas, Fabio Tamburini y Jofrank Perdomo informan que el circuito del PIV posee dos transmisores dañados:
- a. Transmisor de temperatura para la fase de aire
  - b. Transmisor de nivel de líquido en el tanque 2.

Recomiendan identificar la cantidad de señales necesarias de transmisores para la nueva instalación ya que la actual posee 16 señales de las cuales 11 están ocupadas, Jorge Rojas indica que los transmisores actuales están conectados con un solo terminal, recomiendan que para disminuir el ruido deberían conectarse los dos terminales sin embargo esta modalidad disminuiría la disponibilidad de señales a la mitad aproximadamente.

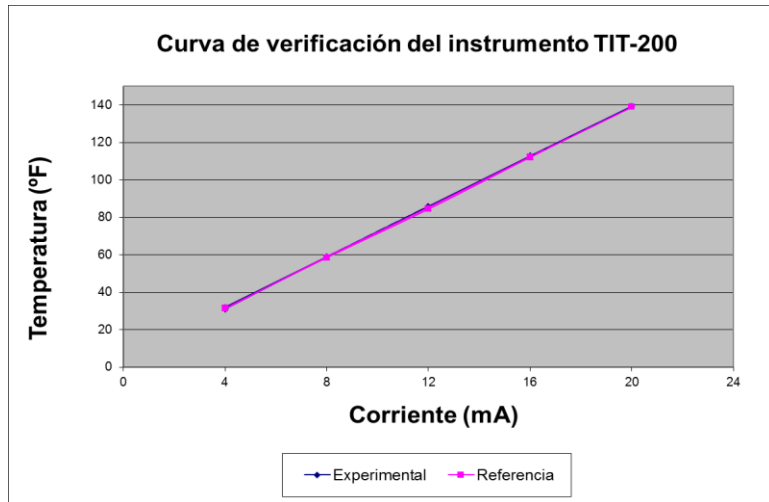
4. Miguel Bravo recomienda para realizar las pruebas de precisión del vcone, tener el mayor número de variables controladas, en función a esto, indica utilizar agua Destilada y caracterizada para realizar las pruebas.
5. Miguel Bravo informa que solo se podrá utilizar un solo cabezal del woca por que el equipo que mide
6. Un fluido alternativo para realizar las pruebas es Kerosene, sin embargo para este fluido no se tiene inventario, por lo que Luis Pérez le recomienda realizar una solicitud en caso de ser requerido al compañero Ramón Cabello.
7. Ramón Cabello informó que el sistema de suministro de aire no posee secador, por lo que la calidad de aire es bastante húmedo, esta condición genera problemas en la instrumentación para los sistemas neumáticos de instrumentación (Actuador de la Válvula para control de flujo de aire) que utilizar el aire de proceso.
8. El grupo recomienda instalar el secador o una alternativa para mitigar este problema de condensación del agua en las líneas de procesos e instrumentación.
9. Jorge Rojas, Jofrank y Fabio informan que por tener la misma fuente para aire de procesos e instrumentos, la válvula de control de flujo para suministro de aire de proceso presenta fluctuaciones y no puede ser controlado adecuadamente, por lo que se recomienda independizar la alimentación de aire para instrumentos, las alternativas presentadas en la discusión de trabajo son:
- a. Utilizar suministro de aire del circuito vecino

- b. Instalar un pulmón al lado del circuito que permita aumentar la disponibilidad del aire para procesos e instrumentos sin que se generen fluctuaciones en el proceso.
  - c. Utilizar aire de un compresor auxiliar (amarillo)
10. Ramón Cabello recomienda para realizar un control más fino en el suministro de aire de proceso reemplazar la válvula de control de flujo actual por una de globo o aguja que permita realizar este proceso con mejor exactitud.
11. Ramón Cabello solicita el material necesario (consumibles) para comenzar la adecuación del circuito (teflón, cable, etc)
12. Jorge Rojas, Jofrank y Fabio informan que la válvula de seguridad para alivio de líquido en caso de una sobrepresión en la descarga de la bomba presenta fuga hacia la línea de drenaje del sistema.
13. Fabio recomiendan instalar una placa de choque a la salida de la tubería de alimentación de los tanques 1 y 2 para evitar salpicar líquido afuera de los tanques durante la operación.
14. Jorge Rojas, Jofrank y Fabio informan que la vibración del motor de la bomba puede alterar las mediciones del micromotion por lo que recomiendan amortiguar estas vibraciones, en discusión de trabajo sugieren las siguientes alternativas:
- a. Colocar mangueras en la descarga y succión de la bomba para amortiguar vibraciones
  - b. Desmontar bomba de la plataforma del circuito e instalarla afuera del skid.
- Adicionalmente sugieren acudir a Norte 2 y solicitar medición de vibraciones del circuito para luego enviar información al fabricante del medidor de flujo másico por efecto coriolis a fin de determinar si la vibración puede afectar la medición.
15. Miguel Bravo indica que se requiere cable Ethernet para comunicación del Woca con el labview.
16. Luis Pérez indica que a las tapas de los tanques se les colocará unos cuellos de cisne para evitar presurización o problemas con vacío al cerrarlos con la tapa, adicionalmente enviará la solicitud para realizar las placas de choques (estos trabajos serán realizados en taller mecánico).
17. Luis Pérez indica que se pudiese instalar un recipiente a presión (recipiente azul) al lado del circuito como pulmón y enviar dos líneas de este recipiente una para el proceso y otra para el actuador neumático de la válvula de control de flujo para ver si mejora el control.
18. Henry Pantoja informa que posee los planos isométricos y DTI del circuito del PIV

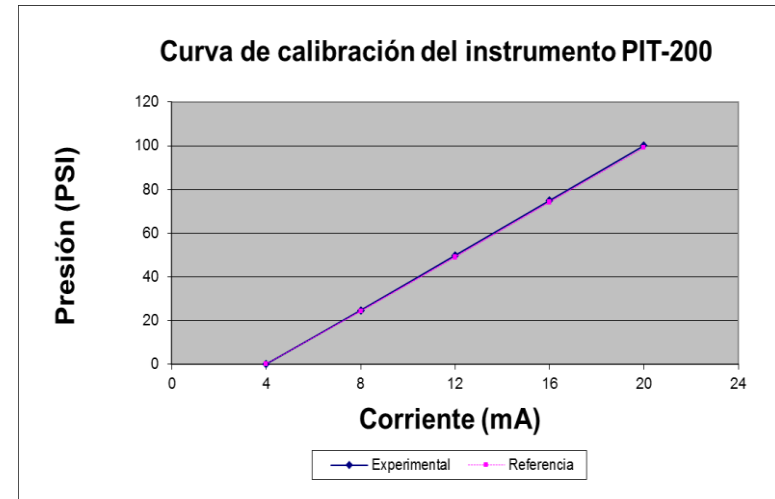
19. Luis Pérez, Leonardo Cáliz y Gerardo González se encargaran de elaborar una propuesta de PFD, DTI e isométrico para la modificación del circuito y elaboración de la lista de materiales, la misma será enviada al compañero Henry Pantoja para su actualización en Autocad.
  20. Luis Pérez Y Leonardo Cáliz y Gerardo Gonzales elaboraran Lista de actividades generales, Estructura de desglose de Trabajo (EDT) y Cronograma de actividades
  21. Gerardo González consolidará lista de materiales y equipos a requerir para la adecuación del circuito.
  22. Luis Pérez y Leonardo Cáliz Una vez definida la lista de materiales y planos se reunirán con el equipo de trabajo para delegar responsabilidades en las disciplinas Procesos, Mecánica, Instrumentación y Control.
  23. Se requerirá actualizar el VI de Labview, para esto se necesita tener el DTI listo
- FIN DE MINUTA...



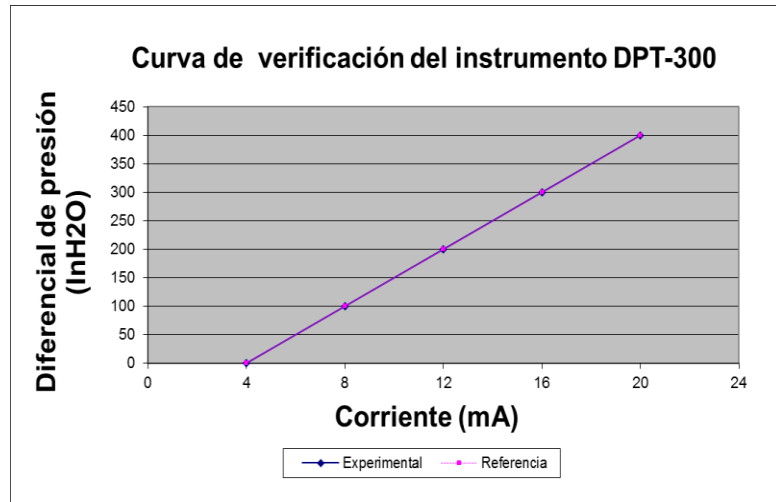
**Apéndice F:** Curva de calibración de todos los instrumentos.



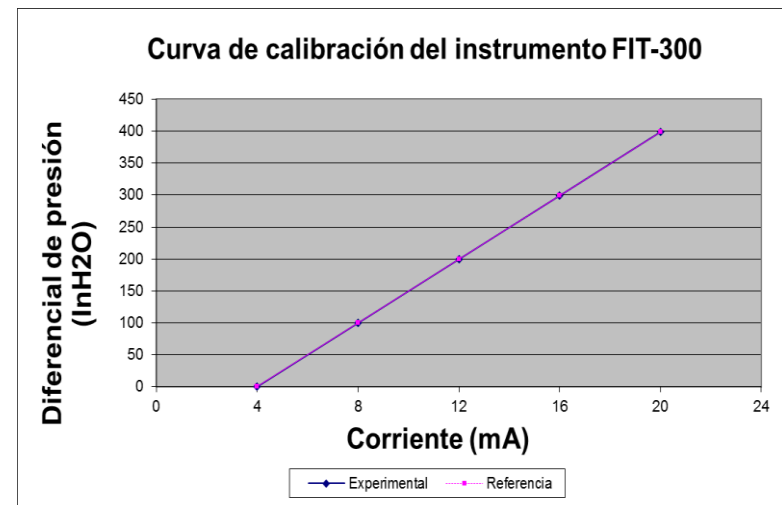
Experimental	Referencia	Corriente
31,10	31,5	4
58,95	58,5	8
85,87	84,4	12
112,78	112,1	16
139,32	138,9	20
112,79	112,4	16
85,89	85,3	12
58,98	58,9	8
32,06	31,2	4
Desviación		0,874022024



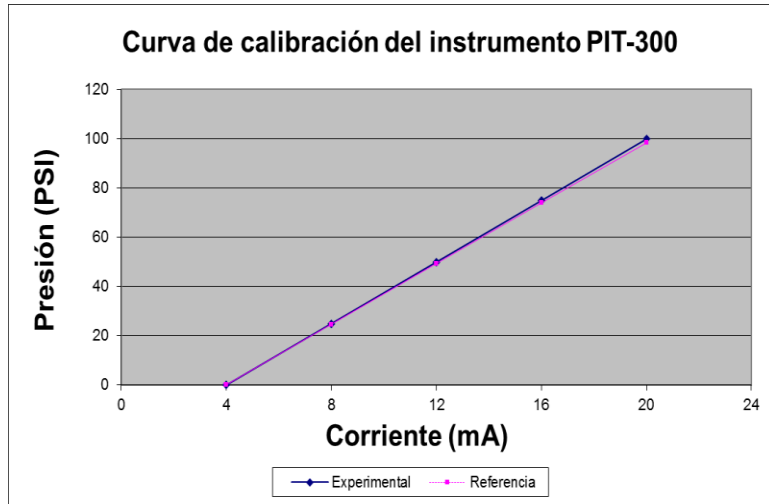
Experimental	Referencia	Corriente
0,12	0	4
24,75	24,3	8
49,83	49,1	12
74,96	74,3	16
100,05	99,1	20
74,94	74,1	16
49,86	48,9	12
24,72	24,1	8
0,11	0	4
Desviación		1,228117863



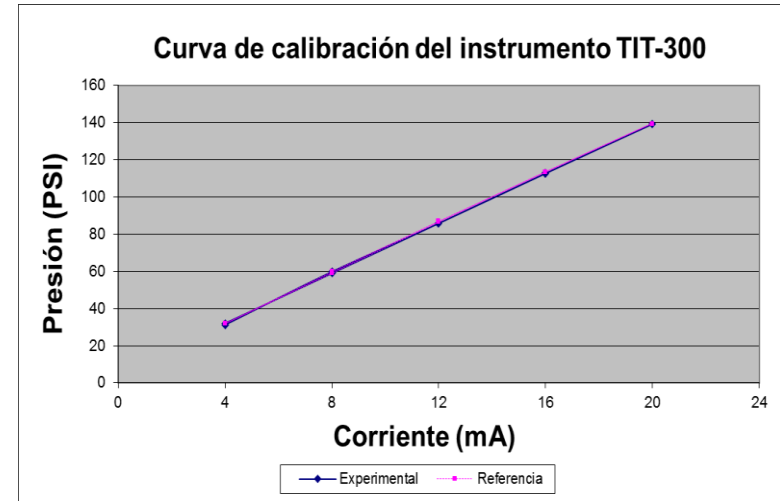
Experimental	Referencia	Corriente
0,40	0	4
100,19	99,75	8
200,16	199,65	12
299,92	299,48	16
399,90	399,77	20
299,98	299,43	16
200,11	199,59	12
100,18	99,72	8
0,41	0	4
Desviación		0,263155981



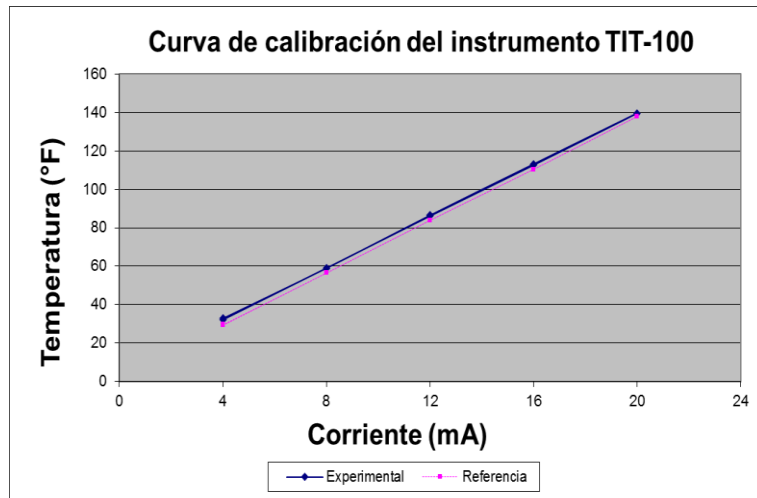
Experimental	Referencia	Corriente
0,40	0	4
99,96	99,66	8
199,70	199,53	12
299,22	299,28	16
398,98	399,23	20
299,41	299,64	16
199,62	199,58	12
100,05	99,71	8
0,32	0	4
Desviación		0,169276949



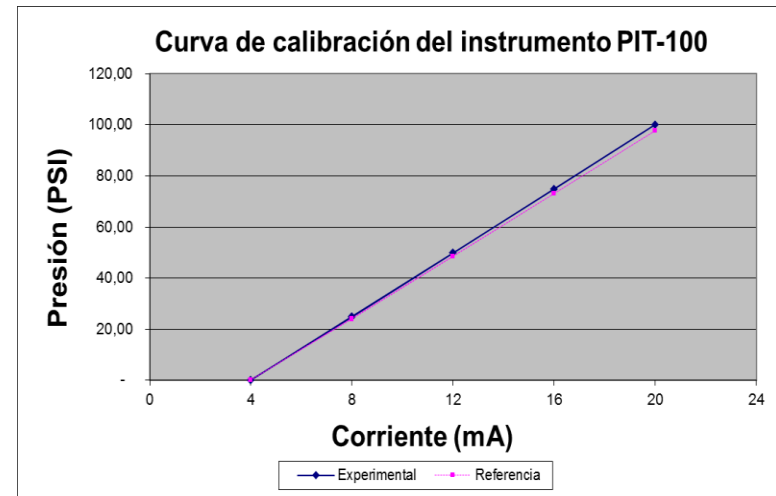
Experimental	Referencia	Corriente
0,06	0	4
25,01	24,62	8
49,94	49,28	12
74,87	73,92	16
99,81	98,3	20
74,88	73,91	16
49,92	49,29	12
25,01	24,61	8
0,07	0	4
Desviación		1,160774607



Experimental	Referencia	Corriente
31,25	31,95	4
59,85	59,8	8
85,87	86,9	12
112,78	113,5	16
139,32	139,5	20
112,79	113,3	16
85,89	86,5	12
58,98	59	8
32,06	32	4
Desviación		0,573304582

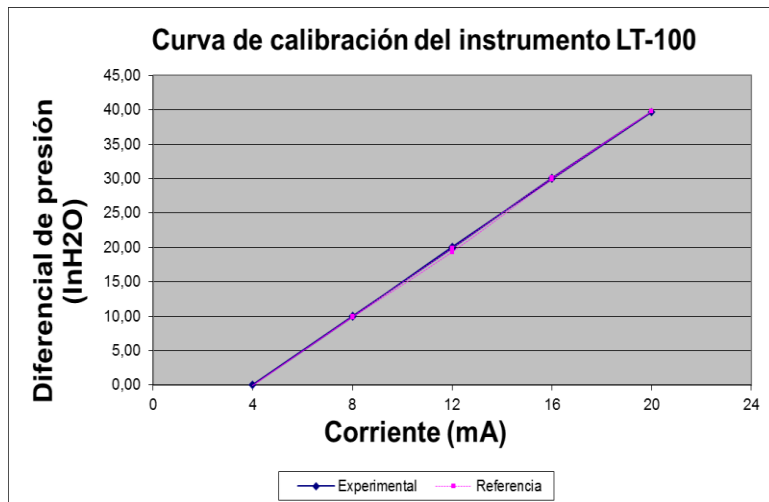


Experimental	Referencia	Corriente
32,79	29,6	4
58,98	56,5	8
86,47	83,8	12
113,15	110,3	16
139,60	137,7	20
112,62	110,3	16
86,13	83,8	12
59,04	56,5	8
32,16	29,4	4
Desviación		2,231899876

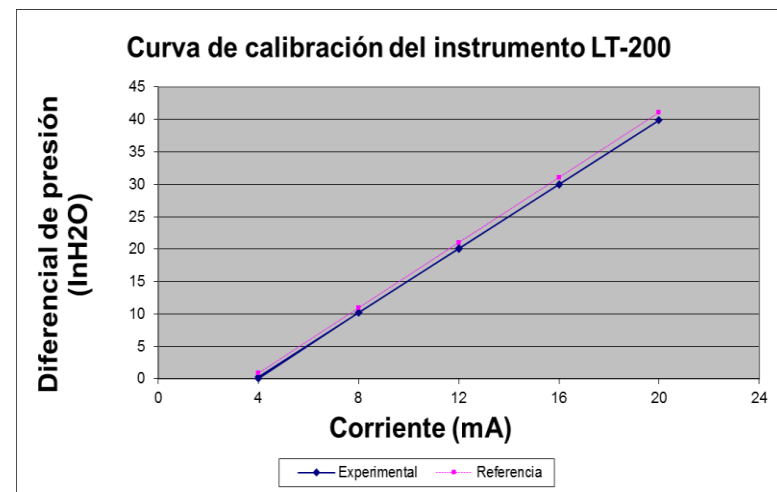


Experimental	Referencia	Corriente
0,18	0,01	4
24,84	23,92	8
49,85	48,37	12
74,99	73	16
100,19	97,6	20
74,93	73	16
49,90	48,5	12
25,04	24,1	8
0,12	0,002	4
Desviación		2,456813577

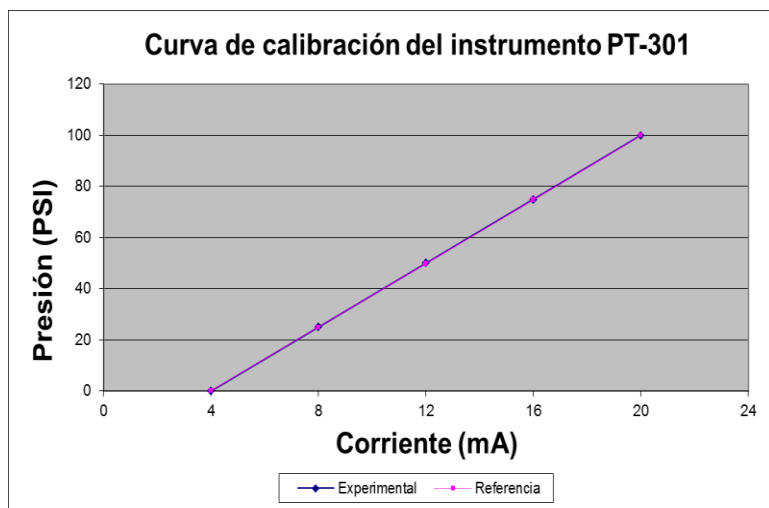




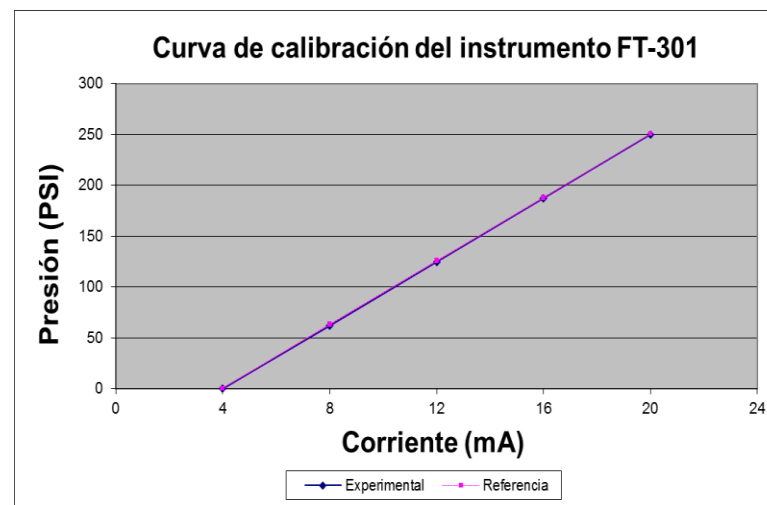
Experimental	Referencia	Corriente
0,05	-0,02	4
9,95	9,85	8
20,09	19,35	12
29,95	29,89	16
39,71	39,75	20
30,11	30,08	16
19,92	19,9	12
10,04	9,96	8
0,09	-0,04	4
Desviación		0,641064367



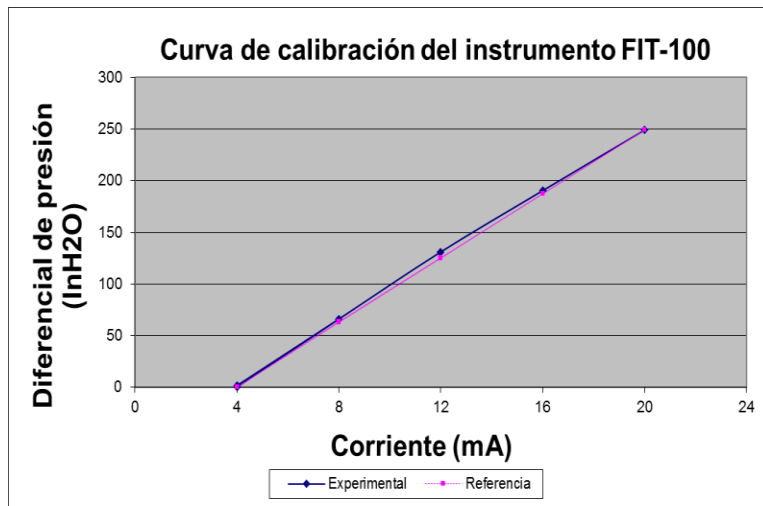
Experimental	Referencia	Corriente
0,03	0,87	4
10,21	10,94	8
20,08	20,98	12
29,99	31,01	16
39,89	41,06	20
29,98	31,01	16
20,11	21,01	12
10,20	10,94	8
0,29	0,87	4
Desviación		3,468956394



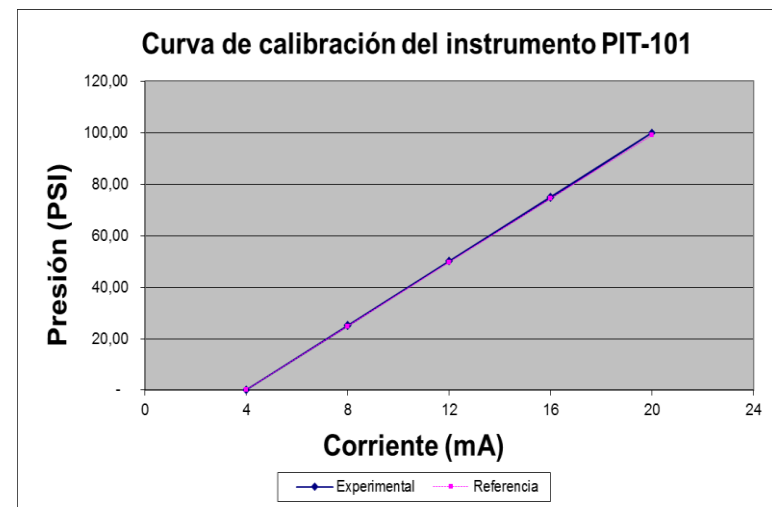
Experimental	Referencia	Corriente
0,08	0	4
25,03	24,94	8
50,04	49,89	12
75,01	74,53	16
99,99	99,79	20
75,02	74,83	16
50,04	49,57	12
25,06	24,93	8
0,07	0	4
Desviación		0,355897234



Experimental	Referencia	Corriente
0,08	0,31	4
62,30	63,4	8
124,79	125,8	12
187,32	187,9	16
250,00	250,3	20
187,39	187,3	16
124,77	125,2	12
62,05	62,7	8
0,37	0,32	4
Desviación		0,497471984



Experimental	Referencia	Corriente
0,25	0	4
66,09	62,86	8
131,23	125,22	12
190,54	187,56	16
249,23	249,67	20
190,49	187,7	16
131,18	125,61	12
66,26	63,66	8
1,80	0	4
Desviación		2,361758368



Experimental	Referencia	Corriente
0,19	0,01	4
25,20	24,85	8
50,22	49,65	12
75,15	74,5	16
100,09	99,09	20
74,73	74,4	16
50,21	49,64	12
25,01	24,72	8
0,22	0,01	4
Desviación		0,73191228

**Apéndice G:** Gráficos de Caída de presión y caudal del PO.

Rangos de caída de presión vs caudal máximo y mínimo de operación de las placas orificio para tubería de 12,7 mm (0.5 plg) y 25,4 mm (1 plg).

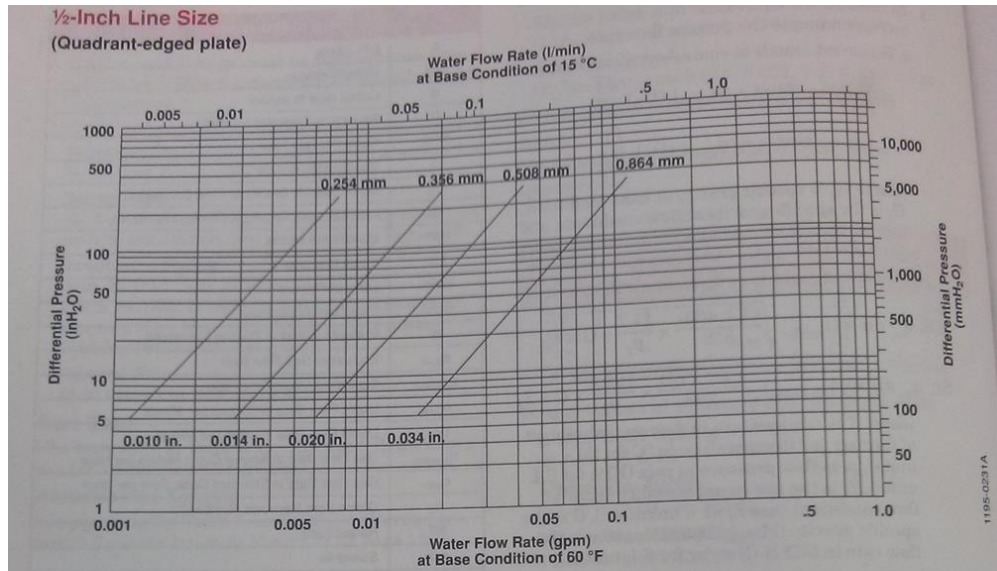


FIGURE 2. Approximate Sizing Graph (1/2-inch line size, quadrant-edged plates) for Water Flow Rate.

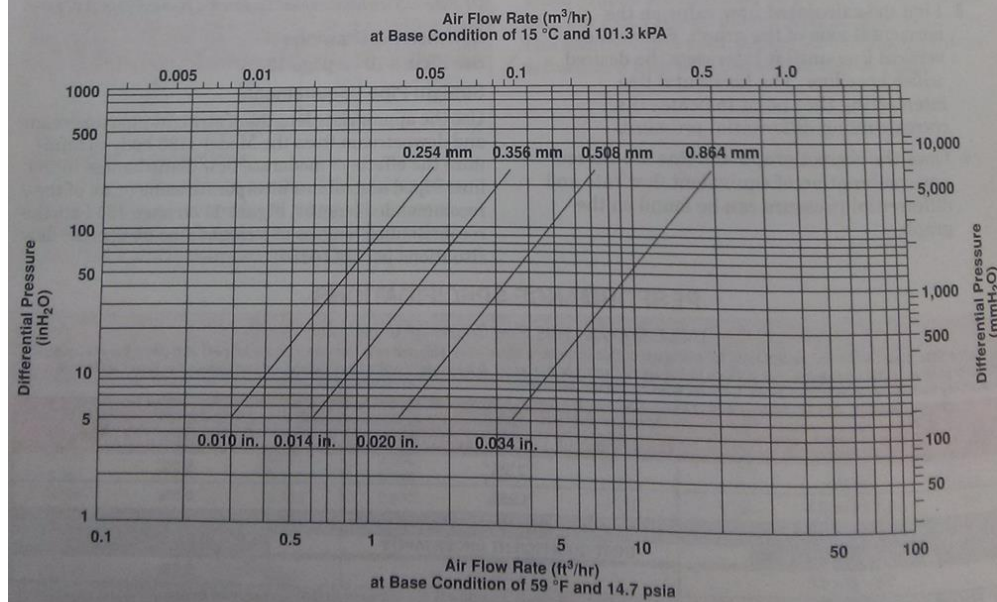


FIGURE 3. Approximate Sizing Graph (1/2-inch line size, quadrant-edged plates) for Air Flow Rate.

**1/2-Inch Line Size**  
(Square-edged plate)

Rosemount Inc.

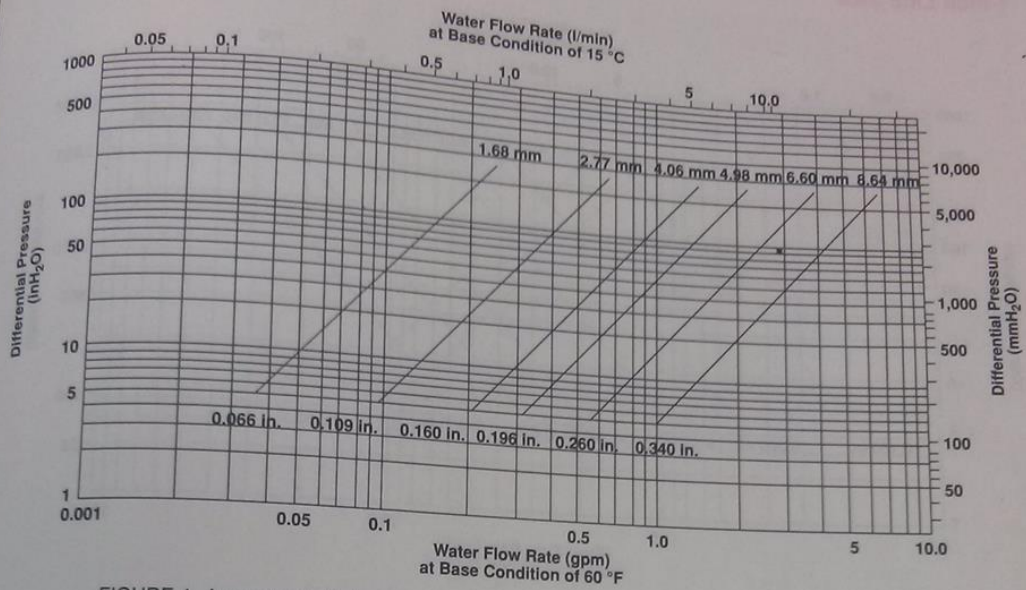


FIGURE 4. Approximate Sizing Graph (1/2-inch line size, square-edged plates) for Water Flow Rate.

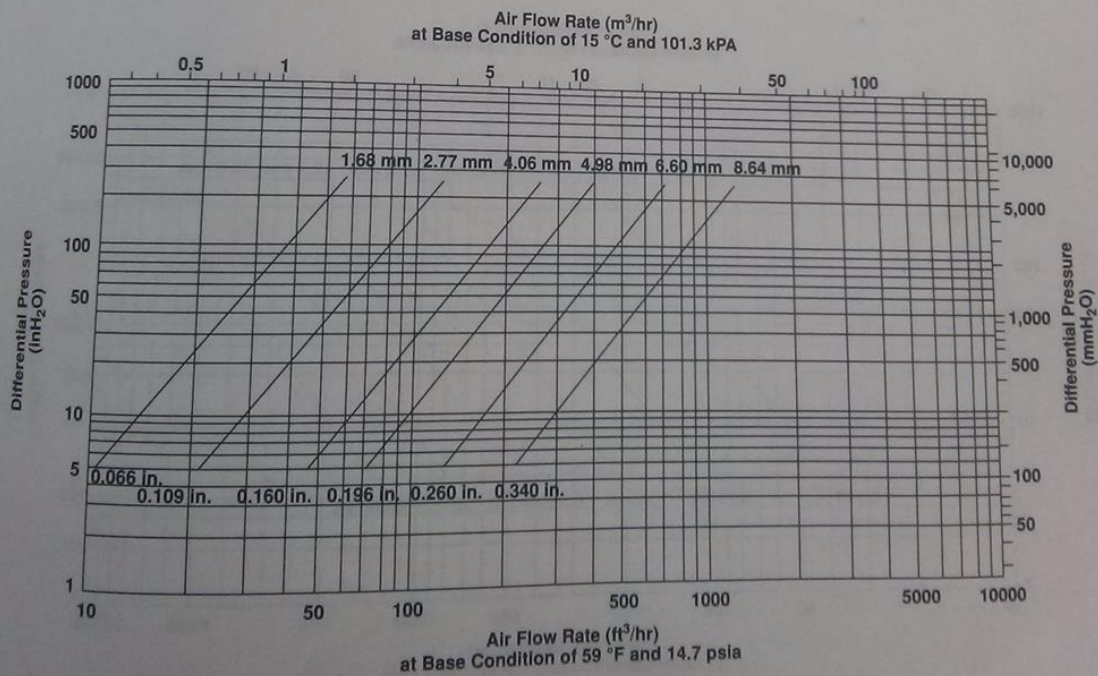


FIGURE 5. Approximate Sizing Graph (1/2-inch line size, square-edged plates) for Air Flow Rate.

1-Inch Line Size

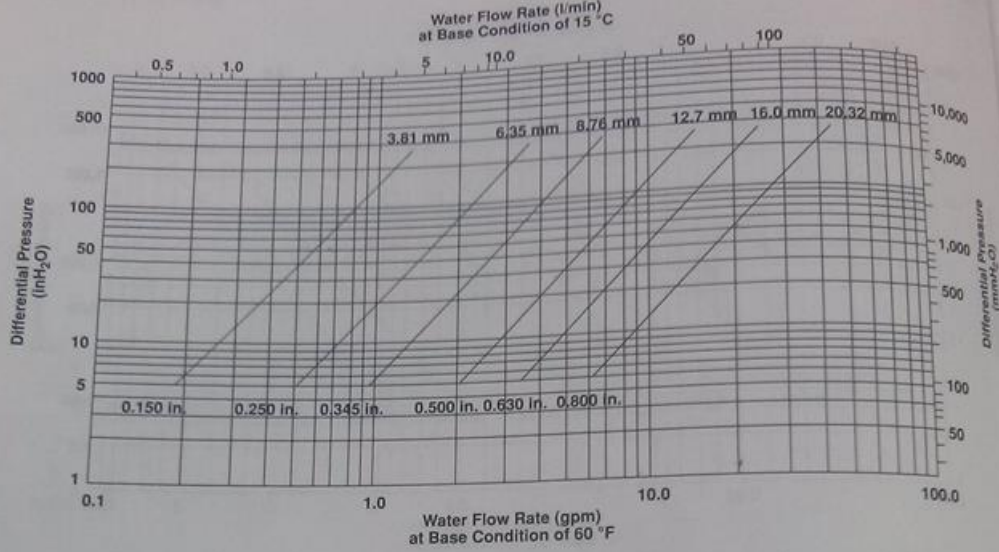


FIGURE 6. Approximate Flow Graph (1-inch line size) for Water Flow Rate.

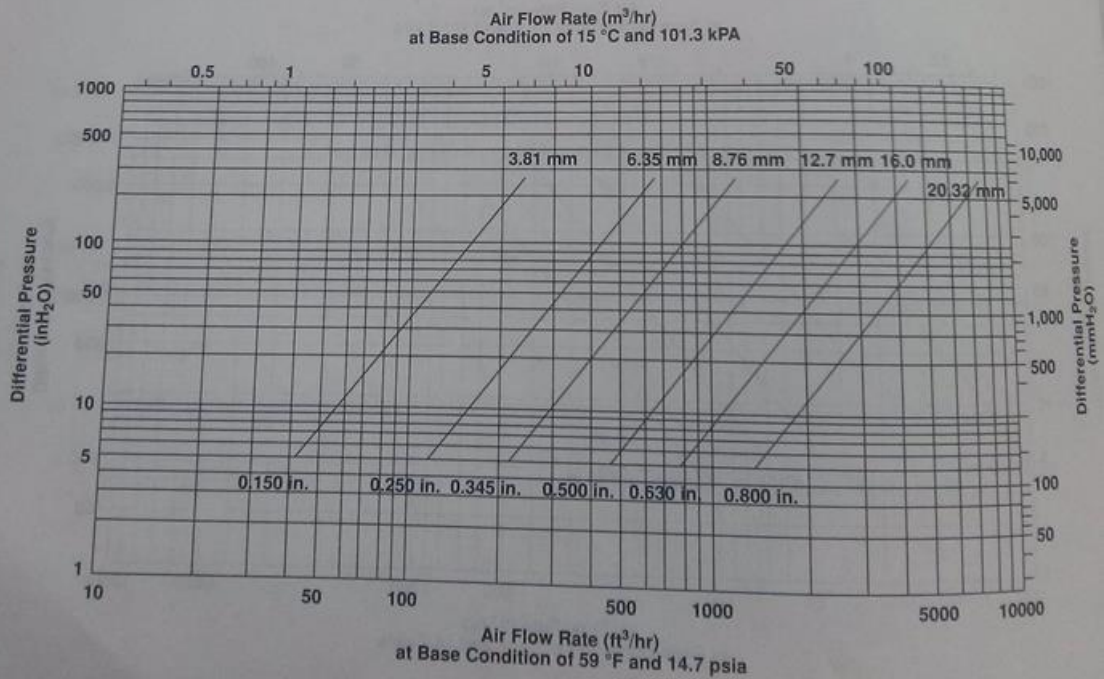


FIGURE 7. Approximate Flow Graph (1-inch line size) for Air Flow Rate.

**Apéndice H:** Isometría del banco de ensayos.

