

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CAÍDA DE PRESIÓN DE FLUJO BIFÁSICO AIRE-AGUA EN TUBERÍAS HORIZONTALES

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los bachilleres:
Cela M., Daniel.
Fuentes C., Jose.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CAÍDA DE PRESIÓN DE FLUJO BIFÁSICO AIRE-AGUA EN TUBERÍAS HORIZONTALES

TUTOR ACADÉMICO: Prof. García, Francisco.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los bachilleres:
Cela M., Daniel
Fuentes C., Jose.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008



Caracas, 21 de noviembre de 2.008

ACTA

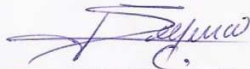
Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

CELA DANIEL y FUENTES JOSE

Titulado:

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CAIDA DE PRESION DE FLUJO BIFASICO
AIRE-AGUA EN TUBERIAS HORIZONTALES”**

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



Prof. Julio Segura
Jurado



Prof. Eugenio Sansone
Jurado



Prof. Francisco García
Tutor

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

DEDICATORIA

A mi familia, especialmente a mis papás y mi hermano

Daniel Cela

A mi mamá, mi novia y hermanas

Jose Fuentes

RECONOCIMIENTOS

En toda mi experiencia universitaria incluyendo la finalización de este proyecto de grado, ha habido personas que merecen el reconocimiento porque que sin su valiosa aportación hubiese sido imposible culminar con éxito este camino y hay quienes las merecen por haber plasmado sus huellas en el camino.

*A mis padres, **Emilia y Silverio**, por ser mis guías y ejemplo de inspiración, por su cariño, comprensión y apoyo sin condiciones ni medida. A mi hermano **José Antonio** por servir de total admiración en mi vida. Esta tesis es suya.*

*A mi compañero de tesis **Jose Casella**, que mas que un compañero es como un hermano para mí, que dio lo mejor de sí para terminar este proyecto después de interminables noches de estudio.*

*A mi novia, compañera y amiga, **Julia Rodríguez**, por brindarme su apoyo, comprensión y amor. Gracias por haberme brindado de forma apasionada toda su paciencia y cariño en todo momento, y por todos tus consejos (algo que lo haces muy bien).*

*A mis compañeros y amigos **Carlos Leyton** y **Luis Hernández**, que nos brindaron su ayuda y cooperación a lo largo de este proyecto.*

*A todos mis **Amigos y Compañeros**: Luis Alberto Troitiño, José Juan Marchamalo, Dani Gómez, Daniel Rafael, Alberto Espinasa, María Eugenia Arriaga, José Tomas Sucre, Tomas Mujica, Rodolfo Ayres, Denis Boret, Gabriela Díaz, Nuno Gomes y a todos aquellos quienes no nombro y que han sido un excelente apoyo incondicionalidad en los momentos más difíciles de mi vida.*

Daniel Cela Méndez.

RECONOCIMIENTOS

Quisiera dar gracias a dios y a mi abuela por cuidarme siempre y en todo momento, sé que desde arriba guía mis pasos y nunca me dejan solo.

*A mi mamá **Ana María**, por ser la persona que me ha enseñado en toda mi vida, por ser la solución a mis necesidades, por tener algo porque luchar en mi vida, por su cariño, comprensión y apoyo sin condiciones ni medida. A mi papa por ser alguien de quien aprendí muchas cosas y que me ha ayudado en todo este tiempo.*

*A mi gran amigo y hermano **Daniel Cela**, que he compartido una infinidad de momentos gratos en mi vida, que ha sido una persona de gran admiración para mí, que siempre ha estado cuando necesito de su ayuda, que siempre me ha escuchado, que dio lo mejor de sí y que su amistad es incondicional.*

*A mis hermanas **Génesis** y **Anita**, que siempre han colaborado conmigo, me han aconsejado y apoyado siempre, que son parte importante en mi vida y que he pasado todas mis experiencias con ellas.*

*A mis compañeros y amigos **Carlos Leyton** y **Luis Hernández**, que siempre fuimos un grupo unido de trabajo, que siempre dieron lo mejor para culminar este trabajo. A todos mis **Amigos y Compañeros**: Aquiles Escarra, Rodolfo Ayres, Joel Tellez, Sergio Fava, Dani Gómez, Nuno Gomes, Julia Rodríguez, Erika Angarita, Alirio Alcalá, Ivan Poskal, Pedro Medina, Ricardo Avellaneda, Marcela, Luis Troitiño, Daniel Rafael, Alberto Espinasa, María Eugenia Arriaga, Denis Boret, Gabriela Díaz y a todos aquellos quienes no nombro y que han sido un excelente apoyo incondicionalidad.*

*Finalmente, de forma **ESPECIAL** quiero agradecer y dedicar este trabajo a la persona de quien he aprendido, sufrido, admirado, suspirado...quien me ha hecho soñar en un futuro, quien me quita el sueño, quien con una palabra o un gesto me hace ser feliz, quien sé que da la vida por mí...esa es **Andrea**, la mujer con quien he pasado los momentos más felices de mi vida, mi futura esposa y mi guía en todo momento...*

Jose Fuentes Casella

AGRADECIMIENTOS

*A la **Universidad Central de Venezuela**, Especialmente a la Escuela de Ingeniería Mecánica, que nos permitió iniciar nuestra carrera profesional y nos dio lo necesario para ser quien somos.*

*A nuestro tutor académico Profesor **Francisco García García**, que compartió con nosotros su amor por la Ingeniería y el afán por conseguir el conocimiento a través de sus certeras orientaciones y asesorías durante todo este tiempo.*

A todos los profesores que han sido parte de nuestro proceso de educación y en especial a los profs. Ing. Crisanto Villalobos, Franklin Baduy, Enrique Limongi y Violeta Wills, Jesuado Areyán.

*A los **técnicos** del Galpón de la EIM de la U.C.V., por su ayuda en la construcción del banco de ensayos.*

*Al **Laboratorio de Transferencia de Calor**, por permitirnos utilizar sus instalaciones, equipos y herramientas.*

*Al **CDCH** por el financiamiento otorgado a través de los proyectos PI 08-00-6245-2008, PG 08-00-5653-2007 y la Ayuda Institucional No 08.00.6681.2007.*

Cela M., Daniel y Fuentes C., Jose

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CAÍDA DE PRESIÓN DE FLUJO BIFÁSICO AIRE-AGUA EN TUBERÍAS HORIZONTALES

Tutor Académico: Francisco García. Trabajo Especial de Grado. Caracas, UCV.

Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2008. 106 pág.

Caída de Presión, Flujo Bifásico, Correlaciones Empíricas, Modelos Mecanicistas,
Modelos Homogéneos, Patrón de flujo.

En este trabajo se realizó un estudio experimental de caída de presión para flujo bifásico agua-aire en tubería horizontal, considerando flujo isotérmico y régimen permanente. Para realizar los experimentos se acondicionó un banco de ensayos previamente construido, donde se fabricaron algunos elementos primarios de la estructura y se realizó la puesta a punto e instalación de los instrumentos de medición requeridos para este trabajo. Se modificaron las uniones entre mangueras y tuberías, y se construyó tanto la sección de mezcla como las bridas de unión del medidor de flujo volumétrico. Por otro lado, se calibró el juego de placas orificio necesario para registrar el caudal de líquido en función de la caída de presión en la línea de suministro y se niveló la tubería del circuito experimental en posición horizontal. La puesta a punto del banco de ensayos se realizó mediante pruebas en flujo monofásico líquido en régimen turbulento, con el fin de evaluar la calibración de los instrumentos y el efecto de la rugosidad equivalente de la tubería. Se generó una base de datos experimental con 213 puntos de caída de presión, los cuales fueron graficados versus la velocidad superficial de gas para diferentes velocidades superficiales de líquido. Se observa que un incremento de la velocidad superficial de líquido genera un aumento en la caída de presión más significativo que el obtenido al aumentar la velocidad superficial de gas. Adicionalmente, se presenta la variación de la caída de presión por patrón de flujo para una determinada condición de operación. Los resultados muestran que el flujo tapón presenta las mayores fluctuaciones con respecto a la caída de presión de operación promedio. Por otra parte, con los datos experimentales generados se evaluó la precisión de algunas correlaciones y modelos seleccionados de la literatura. Esta evaluación se hizo en base al error absoluto promedio, donde las mejores dos correlaciones y el mejor modelo presentan errores por debajo del 23%.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iv
RECONOCIMIENTOS	v
RECONOCIMIENTOS	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
NOMENCLATURA, SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PROBLEMA EN ESTUDIO	4
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES.....	5
1.2.1. Objetivos.....	5
1.2.2. Alcances.....	6
1.3. METODOLOGÍA.....	7
CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. ASPECTOS FUNDAMENTALES.....	11
2.2. ANTECEDENTES.....	14
CAPÍTULO III: ELEMENTOS DEL BANCO DE ENSAYOS.	22
3.1. SISTEMA DE SUMINISTRO DE FLUIDOS DE OPERACIÓN (AGUA – AIRE).....	24
3.2. CIRCUITO DE FLUJO BIFÁSICO.....	26
3.2.1. NIVELACIÓN DE LAS TUBERIAS.....	28
3.3. ELEMENTOS DE MEDICIÓN.....	29
3.3.1. PLACAS DE ORIFICIO Y PORTA PLACAS.....	29
3.3.1.1. MÉTODO DE CALIBRACIÓN DINÁMICO.....	30
3.3.1.2. CALIBRACIÓN DE LAS PLACAS ORIFICIO.....	32

3.3.1.3. PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE LAS PLACAS ORIFICIO	34
3.3.2. MEDIDORES DE CAUDAL DE LOS FLUIDOS DE OPERACIÓN ...	37
3.3.3. MEDIDORES DE PRESION LOCAL Y DIFERENCIAL.....	40
3.3.4. COMPONENTES PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES	42
3.3.4.1. CAJA DE VISUALIZACIÓN	42
3.3.4.2. VIDEOCÁMARA	42
3.3.4.3. FUENTE DE ILUMINACIÓN.....	44
3.4. REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DEL BANCO DE ENSAYOS.....	45
3.4.1. SECCION DE MEZCLA	45
3.4.2. SECCIÓN DE DESVÍO DE FLUJO BIFÁSICO.....	46
3.4.3. SISTEMA DE UNIÓN DE MANGUERAS Y TUBERÍAS	47
3.5. SÍNTESIS DE LAS MODIFICACIONES Y MEJORAS REALIZADAS.	49
CAPÍTULO IV: ENSAYOS EXPERIMENTALES.	51
4.1 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL INTERVALO DE OPERACIÓN DEL BANCO EN FLUJO BIFÁSICO	51
4.2. PUESTA A PUNTO DEL CIRCUITO EN FLUJO MONOFASICO, REGIMEN TURBULENTO	53
4.3. PROTOCOLO EXPERIMENTAL PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE GRADIENTE DE PRESIÓN DE FLUJO BIFÁSICO GAS- LÍQUIDO	55
4.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES	57
4.4.1. BASE DE DATOS EXPERIMENTAL DE CAÍDA DE PRESIÓN	57
4.4.2. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LOS MODELOS SELECCIONADOS.	70
SÍNTESIS Y CONCLUSIONES.....	74
RECOMENDACIONES.....	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
APÉNDICES.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Elementos del sistema de suministro del líquido (Haoulo, 2007).	24
Tabla 2. Componentes del sistema de suministro de aire (Haoulo, 2007).	26
Tabla 3. Dimensiones de los Tanques aforados.	31
Tabla 4. Características del Banco Experimental.	50
Tabla 5. Intervalo de velocidades superficiales de agua y aire para flujo bifásico.	53
Tabla 6. Cantidad de datos por patrón de flujo.	57
Tabla 7. Intervalo de valores obtenidos en los experimentos de flujo bifásico.	58
Tabla 8. Porcentaje de variación con respecto al promedio de caída de presión para un patrón de flujo característico.	69
Tabla 9. Acrónimos de los modelos y correlaciones seleccionados.	71
Tabla 10. Evaluación de la precisión de los modelos y correlaciones seleccionados contra la data experimental de 213 puntos obtenida en el banco de ensayos	71
Tabla A. 1 % de error para la placa de ½”(B).	87
Tabla A. 2 Datos de Calibración para la placa de ½”(A).	88
Tabla A. 3 Datos de calibración para la placa de ¾”.	90
Tabla A. 4 Datos de calibración para la placa de 1”.	92
Tabla A. 5 Incertidumbres de mediciones directas en la calibración de las placas orificio	97
Tabla A. 6 Incertidumbres de mediciones indirectas en la calibración de las placas orificio.	97
Tabla A. 7. Dimensiones de las bridas del vortex de 2 pulgadas.	103
Tabla A. 8 Comparación de los resultados experimentales de flujo monofásico líquido para los medidores de presión diferencial en función a la rugosidad equivalente de la tubería.	105
Tabla A. 9 Análisis de la influencia de la incertidumbre del caudal y la temperatura en la medición de caída de presión.	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de sección transversal de una tubería ocupada por gas y líquido.	12
Figura 2. Patrones de Flujo en tuberías Horizontales.	15
Figura 3. Diagrama de componentes del banco de ensayos.....	23
Figura 4. Bomba centrífuga (izquierda), Válvulas de suministro y desvío (derecha).25	
Figura 5. Compresor del galpón (Izquierda), Compresor sala de calderas (Derecha) (Toro y Suarez, 2007).	26
Figura 6. Circuito de flujo bifásico.	27
Figura 7. Disposición de válvulas de cierre rápido (Izquierda) y sección de retorno (Derecha) (Leyton y Hernández, 2008).	28
Figura 8. Nivel Laser.....	29
Figura 9. Tomas en la brida para la medición de presión diferencial.	30
Figura 10. Juego de placas orificio.	30
Figura 11. Tanques utilizados para la calibración de las placas orificio.....	31
Figura 12. Diagrama del circuito de calibración para las placas orificio.....	33
Figura 13. Esquema de un porta placa orificio.	35
Figura 14. Curvas de calibración de las placas orificio.	37
Figura 15. Medidor de presión diferencial (Izquierda) y diagrama de conexiones eléctricas (Derecha).....	38
Figura 16. Medidor de Flujo (Vortex 1 pulgada de diámetro).....	38
Figura 17. Vortex de 2 pulgadas.	39
Figura 18. Porta placa orificio de la línea de aire de 2 pulgadas y manómetro diferencial de mercurio.	39
Figura 19. Medidor de presión local 1 y 2 y medidor de presión diferencial.	40
Figura 20. Diagrama de conexiones de los medidores de presión local y diferencial.41	
Figura 21. Sistema de purga del medidor de presión diferencial.....	41
Figura 22. Caja de visualización.	42
Figura 23. Patrones de flujo registrados. DCR-HC21 (Arriba), HDR-SR7E (Abajo).	43

Figura 24. Videocámara instalada.....	43
Figura 25. Disposición del sistema de iluminación. Sistema anterior (Izquierda), Sistema Mejorado (Derecha).....	44
Figura 26. Sección de mezcla (Haoulo, 2007) (Izquierda), Sección de mezcla con uniones mediante bridas (Derecha).....	46
Figura 27. Sección de desvío de flujo bifásico.	46
Figura 28. Sistema de acople en la sección de entrada y salida de flujo descendente.	47
Figura 29. Sistema de acople tubería-tubería.	48
Figura 30. Bridas del Vortex de 2 pulgadas.	48
Figura 31. Zonas de trazado del mapa de patrones de flujo.....	52
Figura 32. Mapa de patrón de flujo para $\theta=0^\circ$	58
Figura 33. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 0.082- 0.086 m/s.....	60
Figura 34. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 0.223- 0.259 m/s.....	60
Figura 35. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 0.330- 0.352 m/s.....	61
Figura 36. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 0.470- 0.485 m/s.....	61
Figura 37. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 0.673- 0.685 m/s.....	62
Figura 38. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 0.953- 0.965 m/s.....	62
Figura 39. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 1.180- 1.170 m/s.....	63
Figura 40. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 1.366- 1.353 m/s.....	63
Figura 41. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 1.502- 1.522 m/s.....	64

Figura 42. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para Usl entre 2.006- 2.028 m/s.....	64
Figura 43. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para usl entre 2.199- 2.245 m/s.....	65
Figura 44. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para Usl entre 2.518- 2.532 m/s.....	65
Figura 45. Visualizaciones en 3D de la base datos Experimental.....	66
Figura 46. Porcentaje de variación con respecto al promedio de la caída de presión característica de cada patrón de flujo vs. Número de mediciones realizadas.	68
Figura 47. Comparación de la precisión de los modelos o correlaciones contra los 213 puntos de datos experimentales por patrón de flujo.....	73

NOMENCLATURA, SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Nomenclatura

A: Área transversal de la tubería

D: Diámetro

e: Desviación normal del promedio

E₁: Error porcentual promedio

E₂: Error porcentual absoluto promedio

E₃: Desviación estándar del error porcentual promedio

E₄: Desviación estándar del valor calculado menos el valor experimental dividido entre el valor experimental

f: Factor de fricción

g: Gravedad

G: Flujo másico total por unidad de área

H: Altura

H_g: Fracción volumétrica de gas o de vacío con deslizamiento entre las fases

Hg: Mercurio

h_L: Altura del líquido

H_l: Fracción volumétrica del líquido con deslizamiento (*Liquid Holdup*)

K: Constante

L: Longitud de tubería

ṁ: Tasa de flujo másico

M: Masa

M_w: Peso molecular

n: Número de datos, número de puntos o mediciones

P: Presión, perímetro

P_C: Presión crítica

P_R: Presión reducida

Q: Caudal, Tasa de flujo volumétrico

R: Constante universal de los gases

r: Radio

t : Tiempo

T_C : Temperatura crítica
 T_R : Temperatura reducida
 U : Velocidad superficial, velocidad de mezcla
 V : Volumen recolectado
Val: Valor
 x : Fracción másica del gas
 X_M : Factor de Lockhart y Martinelli
 Z : Factor de compresibilidad del aire, nivel de altura de líquido
 $\Delta P/\Delta Z$: Caída de presión por unidad de longitud
 λ_g : Fracción volumétrica de gas o de vacío sin deslizamiento entre las fases

Símbolos Griegos

α Fracción volumétrica ocupada por la fase gaseosa
 Δ : Variación o diferencia
 ε : Rugosidad
 λ : Fracción volumétrica de gas o líquido sin deslizamiento.
 μ : Viscosidad dinámica
 π : Número pi
 ρ : Densidad
 σ : Tensión superficial
 υ : Volumen específico
 φ : Error relativo porcentual

Subíndices y Superíndices

A: Debido a la aceleración
calc: Calculado
exp: Experimental
F: Debido a la fricción
g: Gas
m: Mezcla
sg: Superficial del gas

sl: Superficial del líquido

T: Total

v: Volumétrico

Abreviaturas

AN: Flujo Anular

BBC: Beggs y Brill (1973)

DB: Flujo burbuja dispersa

DUC: Correlación de Dukler *et al.* (1964)

FFIPC: Correlaciones mejoradas del factor de fricción de mezcla para cada patrón de flujo de García (2004)

FFIUC: Correlaciones universales mejoradas del factor de fricción de mezcla de García (2004)

FFPC: Correlación del factor de fricción de mezcla para cada patrón de flujo de García (2004)

FFUC: Correlación universal del factor de fricción de mezcla de García (2004)

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

LMC: Correlación de Lockhart y Martinelli (1949)

SL: Flujo tapón

SW: Flujo estratificado ondulado

WHM: Modelo homogéneo de Wallis (1969)

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

INTRODUCCIÓN

El flujo bifásico está asociado al flujo simultáneo de dos fases en cualquiera de sus configuraciones, sólido-líquido, sólido-gas, líquido-líquido y líquido-gas. La combinación de flujo bifásico más compleja de analizar es la de gas-líquido, esto debido a las múltiples configuraciones espaciales que adoptan ambas fases a lo largo del sistema y a que la fase gaseosa es compresible. Estas configuraciones espaciales se conocen como patrones de flujo.

El conocimiento de la caída de presión de flujo de dos fases es de gran importancia en el diseño y desarrollo de equipos como intercambiadores de calor, reactores nucleares y criogénicos, equipos de refrigeración, equipos de transporte, redes de tuberías, medidores, separadores y mucho otros en los que el monitoreo de la caída de presión y la visualización de los patrones de flujo todavía es tecnológicamente un problema limitante.

El bombeo de fluidos tanto en sistemas bifásicos como multifásicos se encuentra en numerosas aplicaciones de la industria petrolera, química, nuclear, entre otras. En Venezuela, la aplicación más desarrollada corresponde a la industria petrolera en la producción de hidrocarburos, donde la extracción de fluidos de un yacimiento viene como una mezcla de gas asociado al hidrocarburo, petróleo y agua de formación. Así mismo, se presenta en el uso de lodos o fluidos de perforación de pozos, los cuales corresponden a mezclas de componentes dosificados en cantidades que permitan garantizar la integridad del pozo, lubricación de la mecha, evitar derrumbes, reacciones de las formaciones y fracturas hidráulicas durante la perforación, es por ello que la correcta determinación de la caída de presión, la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento (*Liquid Holdup*) y el patrón de flujo existente para las condiciones de operación en el sistema de producción

permiten evaluar las alternativas óptimas de selección, instalación y puesta en marcha de los diferentes componentes del sistema.

Para resolver los problemas asociados con este tipo de flujo de dos fases, se emplean correlaciones empíricas y modelos simplificados tales como el modelo de flujo homogéneo y los modelos mecanicistas, entre otros.

El desarrollo de este Trabajo Especial de Grado está desglosado en 4 capítulos. En el capítulo I, se presenta el planteamiento del problema, los objetivos con sus respectivos alcances y la metodología para desarrollar los ensayos experimentales.

En el capítulo II, se presentan los aspectos fundamentales que conciernen al estudio de flujo bifásico, donde se cita una amplia revisión bibliográfica que incluye los principales trabajos relacionados con el cálculo de gradiente de presión en flujo multifásico a través de tuberías horizontales, organizados por tipos de modelos y por año de publicación.

En el capítulo III, se realiza una descripción detallada de los elementos que conforman los sistemas de medición y recolección de datos del banco experimental de flujo bifásico isotérmico de agua y aire, así como la metodología de calibración de las placas orificio, nivelación de las tuberías del circuito y el rediseño y construcción de acoples entre las mangueras de suministro de fluidos y las tuberías de acrílico.

En el capítulo IV, se determina la ventana operacional del banco de ensayos a partir de las velocidades alcanzadas en flujo monofásico líquido y monofásico gas. Se diseña el protocolo experimental para realizar las pruebas de caída de presión, tomando en cuenta las condiciones de capacidad de los sistemas de suministro de fluidos y la apreciación de los elementos de medición de flujo volumétrico y presión disponibles. Por otra parte, se muestra en forma gráfica la base de datos obtenida experimentalmente de caída de presión en función de las velocidades superficiales de agua y aire, el comportamiento dinámico de la caída de presión para un patrón

característico de flujo estratificado, tapón, anular y burbuja dispersa y finalmente el mapa de patrones de flujo obtenido para flujo horizontal. Adicionalmente, se presenta la evaluación de la base de datos experimental obtenida con las correlaciones empíricas y modelos seleccionados del trabajo realizado por García (2004), en la cual se comparan los resultados teóricos de dichos modelos con los resultados generados en el circuito de flujo bifásico.

Por último, se presentan las síntesis y conclusiones del presente Trabajo Especial de Grado, así como las recomendaciones pertinentes para futuros trabajos de investigación en el área de flujo bifásico en tuberías.

CAPÍTULO I: PROBLEMA EN ESTUDIO

En este capítulo se presenta el problema en estudio, sus objetivos, alcances y la metodología empleada en la elaboración de este trabajo.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estudio de flujo bifásico a través de tuberías comprende gran cantidad de variables que permiten llevar a cabo la correcta ejecución del diseño de equipos e instalaciones que operen bajo estas condiciones y por consiguiente una optimización espacial, económica y segura de dichos sistemas.

En este sentido, el crecimiento en la demanda energética, la explotación de crudos pesados y extra pesados conlleva al uso y desarrollo de nuevas tecnologías, entre las cuales se encuentra la tecnología asociada al flujo multifásico que comprende todos los aspectos de medición, bombeo, sistemas de producción, evaluación de productividad de pozos (verticales, direccionales y horizontales), que generan la necesidad de reducir los costos asociados con la instalación y operación de las líneas de transporte de crudo, así como la realización de diseños confiables para el estudio de flujo de gas y líquido, con el fin de obtener mayores ingresos por costos asociados con la producción de los hidrocarburos.

La determinación de la caída de presión, fracción volumétrica de líquido con deslizamiento (*Liquid Holdup*) y los patrones de flujo asociados al flujo bifásico, generalmente se ha llevado a cabo a partir de correlaciones empíricas y diversos modelos simplificados, como los modelos homogéneos y mecanicistas que han sido desarrollados debido a la complejidad de los fenómenos físicos asociados al flujo bifásico y a la gran cantidad de variables que involucra este tipo de flujo. Sin embargo, la mayoría de estos modelos han sido desarrollados y/o validados con datos experimentales en un intervalo de operación específico y en algunos casos muy

restringidos. Por otra parte, no existe certeza en cuanto al grado de precisión en la determinación de dichos parámetros frente a bases de datos experimentales distintos a los que los originaron.

Por lo anteriormente expuesto, el tema de la presente investigación es realizar un estudio experimental de caída de presión en flujo bifásico isotérmico de gas y de líquido en tubería horizontal y evaluar la precisión de diferentes modelos para la determinación de caída de presión frente a los resultados experimentales obtenidos.

1.2. OBJETIVOS Y ALCANCES

1.2.1. Objetivos

Objetivo General

El objetivo general del Trabajo Especial de Grado, aquí propuesto, es realizar un estudio experimental de caída de presión de flujo bifásico isotérmico de aire y de agua en tubería horizontal.

Objetivos Específicos

1. Instalar el medidor de flujo volumétrico de gas, en la tubería de 50.80 mm (2 pulgadas) de diámetro del sistema de suministro de aire del banco experimental de flujo bifásico.
2. Instalar el medidor de presión diferencial en el sistema de medición de flujo volumétrico de líquido del banco experimental de flujo bifásico.
3. Instalar los medidores de presión diferencial y de presión local en la zona de prueba del banco experimental de flujo bifásico.
4. Calibrar las placas orificio para determinar el flujo volumétrico de agua para todo el intervalo de operación de la bomba del banco experimental.
5. Rediseñar el sistema de acople entre las tuberías rígidas y las mangueras, en las secciones de suministro de aire y de agua, sección de salida de la zona de flujo ascendente y las secciones de entrada y salida de la zona de flujo descendente.

6. Nivelar las tuberías del sistema de flujo bifásico.
7. Determinar experimentalmente el intervalo de operación del circuito en flujo monofásico y la matriz de prueba experimental del banco de flujo bifásico.
8. Diseñar el protocolo experimental para realizar las pruebas de caída de presión de flujo bifásico de gas y de líquido en tubería horizontal.
9. Determinar experimentalmente la caída de presión de acuerdo a las condiciones de operación establecidas.
10. Evaluar el desempeño de diferentes modelos de predicción de caída de presión de flujo de gas y de líquido en tuberías horizontales frente a los datos experimentales obtenidos en el punto anterior.

1.2.2. Alcances

- Para realizar las pruebas se utilizó el banco experimental para el estudio de flujo bifásico en tuberías, construido por Tovar e Ibarra (2006).
- La selección y adquisición de los instrumentos de medición de flujo volumétrico de gas y de los medidores de presión diferencial y local, fue anterior a este trabajo y solo se realizó su instalación y puesta a punto.
- Los datos experimentales de caída de presión de flujo bifásico, están limitados al intervalo de operación del flujo de aire y de agua disponibles en el banco experimental.
- Los modelos y correlaciones para la determinación de la caída de presión de flujo bifásico evaluados en este TEG, fueron los que obtuvieron la mejor precisión en el trabajo desarrollado por García (2004). Adicionalmente, se incluyeron las correlaciones de Lockhart y Martinelli (1949), Beggs y Brill (1973) y los modelos mecanicistas de Xiao *et al.* (1990) y Gómez *et al.* (2000). La programación de estos modelos no forma parte de este trabajo. La evaluación del desempeño de los modelos se realizará comparando los resultados teóricos de dichos modelos con los resultados experimentales generados en el circuito experimental de flujo bifásico.

1.3. METODOLOGÍA

La metodología seguida para poder alcanzar los objetivos del presente trabajo se enfoca en dos grandes ámbitos. El primero corresponde a la puesta a punto del banco de ensayos, contemplando el rediseño y construcción de algunos de sus elementos primarios, y el segundo a la obtención de datos experimentales de caída de presión en flujo bifásico y su comparación con los modelos y correlaciones que obtuvieron el mejor desempeño en el trabajo realizado por García (2004), más las correlaciones de Lockhart y Martinelli (1949) y Beggs y Brill (1973) y los modelos mecanicistas de Xiao *et al.* (1990) y Gomez *et al.* (2000).

En primer lugar, la puesta a punto del banco de ensayos comprendió la instalación de los instrumentos necesarios para la adquisición de datos experimentales, como lo son los medidores de presión tanto diferencial como local y los medidores de flujo volumétrico de aire, esto aunado a los instrumentos con que ya se contaba anteriormente.

Adicionalmente, se llevó a cabo la nivelación de las tuberías del circuito experimental mediante un nivelador laser y se calibraron las placas orificio mediante el método de calibración dinámico basado en la norma ISO 8316:1987 (E) para determinar las curvas características necesarias en la medición de caudal de líquido.

En cuanto al rediseño y fabricación, se construyeron nuevos sistemas de acoples entre mangueras y tuberías, que consisten en bridas unidas a través de pernos con el fin de obtener mayor sujeción en el circuito de flujo bifásico y poder así garantizar su correcto funcionamiento al estar sometido a sus condiciones de operación máxima. En este sentido, en el rediseño tanto de la sección de mezcla como en los acoples entre tuberías de la zona de flujo ascendente se utilizó este tipo de uniones.

La instalación del medidor de flujo volumétrico de la línea de suministro de aire de 0.0508 m (2 pulgadas) de diámetro, requirió la fabricación de bridas con el dimensionamiento sugerido por el catálogo del equipo.

Adicionalmente, se realizaron pruebas en régimen monofásico líquido con el fin de evaluar los diferentes componentes del banco de ensayos en la determinación de la caída de presión. En este sentido, se determinó el error entre los valores obtenidos experimentalmente de caída de presión con los obtenidos mediante la ecuación de Darcy Weisbach, para así, evaluar el efecto de la rugosidad equivalente de la tubería que minimice la desviación estándar de los residuales entre los valores medidos y los calculados.

En segundo lugar, se registraron los datos experimentales necesarios para la determinación de la caída de presión de flujo bifásico isotérmico en régimen permanente. Para ello se generó una matriz experimental con las velocidades superficiales de agua y aire según el intervalo de operación del banco de ensayos.

La naturaleza fluctuante de algunos patrones de flujo bifásico genera variaciones significativas en la medición de la caída de presión, por ello es necesario reportar un valor promedio de dicho parámetro. Este promedio está en base a un número determinado de mediciones, las cuales permiten garantizar que la caída de presión promedio de un experimento es independiente del número de mediciones realizadas. En este sentido, se logró determinar que registrando 20 mediciones, no existen variaciones significativas de la caída de presión promedio.

La metodología empleada para llevar a cabo los experimentos consistió en recorrer la matriz experimental manteniendo la velocidad superficial de líquido constante y variando la velocidad superficial de gas, de tal manera que las condiciones máximas de operación correspondan a limitaciones en cuanto a velocidades superficiales de flujo o presión máxima de operación del banco de ensayos.

Posterior a la realización de los experimentos, la base de datos obtenida se procesó a fin de ejecutar los algoritmos programados de los 6 modelos y correlaciones que obtuvieron los mejores desempeños en la evaluación general realizada por García (2004), estos incluyen las 4 correlaciones desarrolladas por Garcia (2004), más la correlación de Dukler *et al.* (1964) y el modelo homogéneo de Wallis (1969). Adicionalmente, se incluyeron las correlaciones de Lockhart y Martinelli (1949) y Beggs y Brill (1973) y los modelos mecanicistas de Xiao *et al.* (1990) y Gómez *et al.* (2000). Finalmente se compararon los valores experimentales con los calculados.

Dicha comparación se realizó mediante el cálculo de 4 de los 8 parámetros estadísticos utilizados frecuentemente (Gregory y Fogarasi, 1985; Xiao *et al.*, 1990). Estos parámetros estadísticos se definen como:

El error porcentual promedio:

$$E_1 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \varphi_i$$

El error porcentual absoluto promedio:

$$E_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |\varphi_i|$$

La desviación estándar del error porcentual promedio:

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

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

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

Donde:

$$\varphi_i = \left[\frac{(Val_{cal} - Val_{exp})}{Val_{cal}} \right] 100$$

n: Número de datos experimentales

El error porcentual promedio E_1 , es una medida de la concordancia entre los valores calculados y experimentales. Este indica en promedio, el grado de sobrepredicción (valores positivos) o subpredicción de los valores calculados con respecto a los experimentales. Similarmente, el error porcentual absoluto promedio E_2 , es una medida de la concordancia entre los valores calculados y experimentales. Sin embargo, los errores positivos y negativos no se cancelan entre sí. Por esta razón, el error porcentual absoluto promedio es considerado un parámetro clave para evaluar la capacidad de predicción de un conjunto de modelos y correlaciones. La desviación estándar del error porcentual promedio E_3 , indica el grado de dispersión de los errores con respecto al promedio. La raíz cuadrada del promedio del error porcentual al cuadrado (root mean square percent error) E_4 , indica el grado de dispersión entre los valores calculados y los valores experimentales (García, 2004).

Finamente se generó un reporte de errores en base a estos parámetros, y se jerarquizó la precisión de cada uno de estos modelos y correlaciones en base al error porcentual absoluto promedio. Para ello, se evaluó la precisión de los modelos mencionados anteriormente frente a toda la base de datos obtenida experimentalmente.

CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. ASPECTOS FUNDAMENTALES

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 bifásico se requiere adicionalmente de otros datos, como patrones de flujo, deslizamiento y velocidad relativa entre las fases (Shoham, 2001).

A continuación se hace referencia a las variables comúnmente utilizadas para el estudio de flujo bifásico:

- Tasa de Flujo Másico [M/T]:

$$\dot{m} = \dot{m}_l + \dot{m}_g \quad (1)$$

Donde:

\dot{m} : Tasa de flujo másico total

\dot{m}_l : Tasa de flujo másico de líquido

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

- Tasa de Flujo Volumétrico [L^3/T]:

$$Q = Q_l + Q_g = U_{sl}A + U_{sg}A \quad (2)$$

Donde:

Q : Tasa de flujo volumétrico total

Q_l : Tasa de flujo volumétrico de líquido

Q_g : Tasa de flujo volumétrico de gas

U_{sl} : Velocidad superficial de líquido

U_{sg} : Velocidad superficial de gas

A : Área de la tubería

- Velocidad de la fase líquida [L/T]:

$$U_l = \frac{Q_l}{A_l} \quad (3)$$

- Velocidad de la fase gaseosa [L/T]:

$$U_g = \frac{Q_g}{A_g} \quad (4)$$

Donde, en referencia a la Figura 1:

A_l : Área de sección transversal ocupada por el líquido

A_g : Área de sección transversal ocupada por el gas

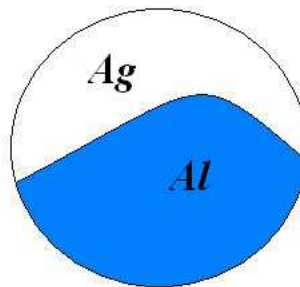


Figura 1. Área de sección transversal de una tubería ocupada por gas y líquido.

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

$$U_{sl} = \frac{Q_l}{A} \quad (5)$$

- Velocidad superficial de la fase gaseosa [L/T]:

$$U_{sg} = \frac{Q_g}{A} \quad (6)$$

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

$$U_m = U_{sl} + U_{sg} \quad (7)$$

- Fracción volumétrica de líquido con deslizamiento o fracción volumétrica de líquido (*Liquid Holdup*):

$$H_l = \frac{V_l}{V} \quad (8)$$

- Fracción volumétrica de líquido sin deslizamiento:

$$\lambda_l = \frac{V_l}{V} = \frac{\left(\frac{Q_l}{U_l}\right)}{\left(\frac{Q_l}{U_l} + \frac{Q_g}{U_g}\right)} = \frac{Q_l}{(Q_l + Q_g)} \quad (9)$$

$$\lambda_l = \frac{U_{sl}}{(U_{sl} + U_{sg})} \quad (10)$$

Donde $U_l = U_g$ porque no hay deslizamiento entre las fases

- Fracción de gas o de vacío (*Void Fraction*):

- Con deslizamiento entre las fases:

$$H_g = \frac{V_g}{V} = 1 - H_l \quad (11)$$

- Sin deslizamiento entre las fases:

$$\lambda_g = \frac{V_g}{V} = 1 - \lambda_l \quad (12)$$

- Flujo másico por unidad de área de líquido [M/L^2T]:

$$G_l = \frac{\dot{m}_l}{A} = \rho_l U_{sl} \quad (13)$$

- Flujo másico por unidad de área de gas [M/L^2T]:

$$G_g = \frac{\dot{m}_g}{A} = \rho_g U_{sg} \quad (14)$$

- Flujo másico por unidad de área total [M/L^2T]:

$$G_m = G_l + G_g \quad (15)$$

2.2. ANTECEDENTES

El flujo bifásico en conductos se ha venido estudiando con mayor énfasis debido a su frecuente aparición en muchas aplicaciones de la ingeniería, como por ejemplo, la industria petrolera, química y nuclear. El principal inconveniente que existe en el estudio de este tipo de flujo es la diversidad de variables que se involucran como lo son, temperatura, flujo volumétrico, presión de operación, deslizamiento y velocidad entre fases, propiedades físicas del fluido y el patrón de flujo existente.

En flujo horizontal, la descripción de los patrones de flujo propuesta por Barnea *et al.* (1980) es una de las más aceptadas y reconocida por la mayoría de los investigadores, y es de suma importancia como punto de partida para el cálculo de la caída de presión y la transferencia de calor y de masa. En la Figura 2, se presenta la

clasificación de patrones de flujo propuesta por Barnea *et al.* (1980) cuando el líquido y el gas fluyen en la misma dirección.

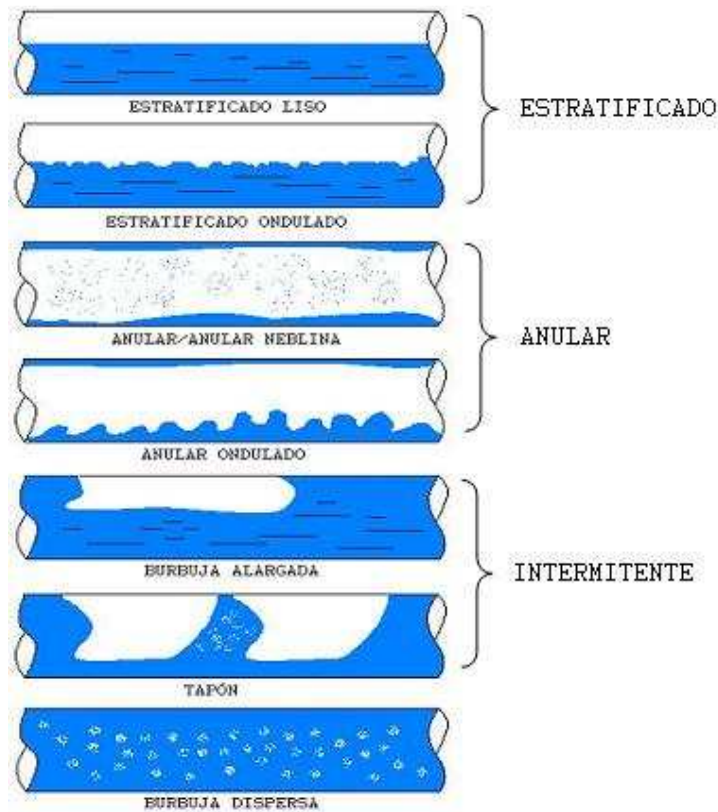


Figura 2. Patrones de Flujo en tuberías Horizontales.

Flujo Estratificado: Las fases están separadas por la acción de la gravedad, donde la fase líquida fluye en el fondo de la tubería y el gas en el tope. El flujo estratificado se subdivide en estratificado liso y estratificado ondulado de acuerdo a la forma que presente la superficie de líquido.

Flujo Intermitente: En este patrón, tapones de líquido fluyen alternadamente a lo largo de la tubería seguidos por burbujas de gas que fluyen sobre una película de líquido. El flujo intermitente se subdivide en flujo tapón y flujo burbuja alargada. Cuando el flujo no presenta perturbaciones y no existen burbujas de gas en el tapón de líquido, el patrón de flujo se denomina burbuja alargada. Para altas tasas de flujo,

cuando el tapón de líquido presenta burbujas de gas el patrón de flujo se denomina tapón.

Flujo Anular: En flujo anular, una película de líquido rodea un núcleo de gas que fluye a alta velocidad y el cual puede contener gotas de líquido (Flujo neblina) donde ambas fases están íntimamente mezcladas. Cuando el flujo de gas es relativamente bajo, la mayoría del líquido fluye como una película en el fondo de la tubería, mientras ondas inestables de líquido fluyen alrededor de la tubería humedeciendo su periferia. Este patrón de flujo se conoce como flujo anular ondulado.

Flujo Burbuja Dispersa: 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.

Existen diferentes modelos en la literatura especializada, como los denominados homogéneos, que consideran al flujo bifásico como un fluido pseudo homogéneo con propiedades físicas promedio de la mezcla. Entre los modelos homogéneos más utilizados se encuentran los presentados por Poettmann y Carpenter (1952), Cicchitti *et al.* (1960), Baxandell y Thomas (1961), Fancher y Brown (1963), Wallis (1969), Oliemans (1976) y Beattie y Whalley (1982), entre otros. A continuación se presentan los fundamentos de algunos de estos modelos.

Cicchitti *et al.* (1960), calculan la caída de presión de manera similar al modelo de Wallis (1969) donde el flujo se trata como una mezcla pseudo fase homogénea. La principal diferencia entre estos dos modelos es la definición de las propiedades del fluido.

Wallis (1969) es uno de los más reconocidos en el estudio de flujo bifásico en tuberías. En éste modelo el flujo de gas y de líquido se trata como una pseudo fase homogénea cuya velocidad y propiedades físicas son un promedio entre ambas fases a la cual se le aplican las ecuaciones desarrolladas para flujo monofásico.

Oliemans (1976) para calcular el gradiente de presión se basa en el postulado de que el deslizamiento del gas que fluye sobre el líquido origina una acumulación en la tubería de esencialmente líquido estático, el cual reduce el área efectiva disponible para el flujo de gas-líquido en la tubería.

Beattie y Whalley (1982), desarrollaron un modelo homogéneo simple para determinar el gradiente de presión por fricción para flujo adiabático en tuberías de sección circular, en donde se comparó con modelos similares de geometrías complejas con transferencia de calor, obteniendo resultados con una buena precisión de gradiente de presión para bajas fracciones de vacío.

Las correlaciones empíricas se fundamentan en generar relaciones funcionales de datos experimentales en función de grupos adimensionales que controlen los mecanismos físicos del fenómeno en estudio. Entre las correlaciones desarrolladas para evaluar el gradiente de presión de flujo de gas y de líquido en tuberías horizontales se encuentran las desarrolladas por Lockhart y Martinelli (1949), Reid *et al.* (1957), Hoogendoorn (1959), Ros (1961), Dukler *et al.* (1964), Eaton *et al.* (1967), Beggs y Brill (1973), Müller y Heck (1986), Hart *et al.* (1989), Chen *et al.* (2002) y García *et al.* (2003), entre otros. En general, la mayoría de estas correlaciones han sido desarrolladas con datos experimentales con un intervalo de operación muy reducido, lo cual limita severamente su aplicación. A continuación se presentan los fundamentos de algunos de estas correlaciones.

Lockhart y Martinelli (1949), proponen un modelo de flujo separado en el cual se supone que, indistintamente de las condiciones de operación, cada fase fluye por separado, por lo que cada configuración de flujo puede tener velocidades y propiedades físicas diferentes. En consecuencia, cada una de las fases es analizada utilizando las herramientas desarrolladas para flujo monofásico. Los autores propusieron una correlación generalizada que relacionaba variables experimentales como el parámetro adimensional de presión y la fracción volumétrica, las cuales

corresponden a la función del factor de Lockhart y Martinelli X_M y la fracción del tubo ocupada por una fase, respectivamente.

Reid *et al* (1957), realizaron experimentos de caída de presión en tuberías de diámetro mayor a 3,5 pulgadas. El propósito de su investigación fue extender los resultados de Baker (1954) y validar las correlaciones para grandes diámetros de tuberías con los presentados por Chenoweth y Martin (1955) y Lockhart y Martinelli (1949). Cuando los autores compararon sus resultados con los obtenidos de la correlación de Baker observaron que estos se asemejaban dependiendo del patrón de flujo, además de que esta última correlación solo aplica para flujo tapón y anular.

Hoogendoorn (1959), desarrolló una correlación para determinar el gradiente de presión para flujo de gas y líquido en tuberías horizontales dependientes del patrón de flujo. En su investigación el autor utilizó una combinación de flujo de aire-aceite y aire-agua para tuberías lisas y rugosas y concluyó que la correlación de Lockhart y Martinelli (1949) no se debería aplicar en flujo estratificado liso y ondulado, flujo anular, flujo tapón y flujo espumoso cuando la densidad del gas difiere de la densidad del aire a presión atmosférica. Por tanto, para los casos mencionados anteriormente, el autor desarrolló nuevas correlaciones para determinar la caída de presión, específicamente el término correspondiente a la pérdida de presión debida a la fricción.

Dukler *et al.* (1964), dividieron su trabajo en dos partes. En la primera parte, se comparan ciertas correlaciones para el cálculo de la presión y del *Liquid Holdup* frente a una data experimental tomando en cuenta la desviación estándar, fracción de desviación y el factor ψ que se define como la desviación fraccionaria; y en la segunda parte, realizan un análisis de similitud con la finalidad de proponer una nueva correlación para el cálculo del gradiente de presión.

Beggs y Brill (1973) se basan en determinar los patrones de flujo, la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento y el gradiente de presión en flujo bifásico aire-agua en tuberías de cualquier inclinación. Las correlaciones fueron desarrolladas

en base a 584 pruebas y sólo tres regímenes de flujo fueron considerados: segregado, intermitente y distribuido, estos patrones de flujo fueron observados en tuberías horizontales. Este método posee la ventaja de calcular la fracción volumétrica de líquido como si la tubería fuera horizontal y luego, utilizando un factor de corrección por inclinación Ψ , se calcula para el ángulo de inclinación real.

Kadambi (1981), realizó un procedimiento analítico para determinar el gradiente de presión y la fracción volumétrica de gas con deslizamiento en flujo bifásico estratificado, utilizando las variables de la correlación de Lockhart y Martinelli (1949). Una característica importante del trabajo de este investigador, es que reconoció cuatro tipos de situaciones, las cuales dependen de los números de Reynolds del líquido y del gas: líquido laminar-gas laminar, líquido turbulento-gas laminar, líquido laminar-gas turbulento y líquido turbulento-gas turbulento. No obstante, las ecuaciones desarrolladas por Kadambi se refieren al caso laminar-laminar o turbulento-turbulento, debido a que él mismo no logró aproximar curvas satisfactoriamente en los casos líquido laminar-gas turbulento y viceversa.

La correlación propuesta por Müller y Heck (1986), está basada en dos características importantes: la primera, la calidad del flujo determinada a partir de una expresión desarrollada por Reza y Chavez (1985) que iguala la caída de presión de cada una de las fases a la caída de presión del gas; y la segunda, la tasa de flujo másico total por unidad de área. Los autores en su estudio desarrollaron una correlación para determinar el gradiente de presión por fricción en flujo estratificado en tubería horizontal.

Chen *et al.* (2002), desarrollaron una correlación para el estudio de flujo bifásico en tuberías de pequeño diámetro (menores a 10 mm), donde se debe tomar en cuenta la influencia de la tensión superficial así como también compararla con la fuerza gravitacional. El gradiente de presión por fricción para flujo homogéneo es corregido por un factor Ω que es función del número de Bond, Froude y Weber, el cual mejora significativamente el desempeño de la correlación. El desarrollo de una

correlación que se adapte a esta condición geométrica es el objetivo principal de Chen *et al.* (2002), debido a que las correlaciones existentes para predecir el comportamiento de la fricción bifásica se basan en datos experimentales tomados para tuberías de diámetros grandes y la extrapolación de las mismas para extender su aplicación a diámetros inferiores resulta muy inexacta.

En el modelado mecanicista, el objetivo fundamental es determinar el patrón de flujo existente para unas condiciones dadas (Taitel y Dukler, 1976., Taitel *et al.*, 1980., Barnea, 1987). Posteriormente, se formulan modelos hidrodinámicos separados para cada uno de los posibles patrones de flujo (Xiao *et al.*, 1990, Ansari *et al.*, 1994, Ouyang, 1998, Gómez *et al.*, 2000). A continuación se presentan los fundamentos de algunos de estos modelos.

Xiao *et al.* (1990), realizaron un estudio extenso para flujo de gas-líquido en tuberías horizontales, presentando así su modelo mecanicista. Este modelo es capaz de determinar los patrones de flujo existentes y evaluar las características del fluido, como la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento y la caída de presión para flujo estratificado, intermitente, anular o burbuja dispersa. Adicionalmente, estableció una base de datos obtenida de un banco de pruebas cuyo fluido de trabajo era petróleo y su gas derivado. Los datos recolectados por Xiao *et al.* (1990) se compararon con datos provenientes algunos de los modelos de correlación más comúnmente utilizados para flujo bifásico en tuberías horizontales y se llegó a la conclusión que el comportamiento global de este método es más certero que el de las correlaciones empleadas.

Ouyang (1998), desarrolló un modelo mecanicista para flujo bifásico de gas y de líquido en pozos horizontales en el cual se combinan diferentes criterios de transición presentados por Taitel y Dukler (1976) y Barnea (1987) para determinar patrones de flujo anular, burbuja, burbuja dispersa, intermitente y estratificado. En éste modelo la fenomenología del flujo en la dirección radial, el desarrollo de patrones de flujo y el gradiente de presión es tomada en consideración.

Gómez *et al* (2000), plantearon un modelo compuesto por dos secciones. La primera enfocada en la determinación del patrón de flujo y la segunda, en desarrollar un conjunto de modelos mecanicistas individuales para el cálculo de la pérdida de presión en flujo estratificado, tapón, burbuja, anular y burbuja dispersa. El modelo desarrollado se denomina “unificado” porque puede ser aplicado en tuberías tanto horizontales como verticales con todo el intervalo de inclinaciones. Otro aspecto importante es que los autores afirman que el que régimen es laminar si el número de Reynolds es menor o igual a 1.500, y no 2.300 como la mayoría de los investigadores.

CAPÍTULO III: ELEMENTOS DEL BANCO DE ENSAYOS.

El banco experimental de flujo bifásico utilizado en este Trabajo Especial de Grado, tiene como punto de partida el trabajo realizado por Gómez (2005), que contempló el diseño de un banco de ensayos para el estudio de flujo bifásico isotérmico de gas y líquido en tuberías para cualquier ángulo de inclinación, donde se emplearon metodologías de diseño basadas en el estudio de, tecnologías locales y foráneas, espacio disponible, ergonomía, impacto ambiental, experiencia de usuarios, entre otros. Posteriormente, los trabajos realizados por Tovar e Ibarra (2006) en el rediseño del sistema de levantamiento de la estructura y de suministro de aire para el estudio de flujo monofásico gas en tuberías; Toro y Suárez (2007) en el estudio experimental de patrones de flujo bifásico aire-agua en tuberías horizontales e inclinadas y Haoulo (2007) en el diseño y construcción de la sección de mezcla y las zonas de visualización, así como la selección de los elementos del sistema de suministro de líquido para el posterior estudio experimental de patrones de flujo bifásico en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas, han permitido evolucionar de manera sucesiva las prestaciones y capacidad operativa del banco experimental. Es por esto, que muchos de los elementos que conforman los diferentes sistemas deben ser mejorados ó remplazados para obtener resultados experimentales más confiables.

En este sentido, la modificación y fabricación de los elementos que conforman los diferentes sistemas del banco experimental, como lo son acoples entre mangueras y tuberías, nivelación del circuito experimental, entre otros, así como la puesta a punto de los medidores de flujo volumétrico y medidores de presión diferencial y local, son objetivos de este trabajo. En la Figura 3 se muestra un diagrama de los componentes del banco de ensayos.

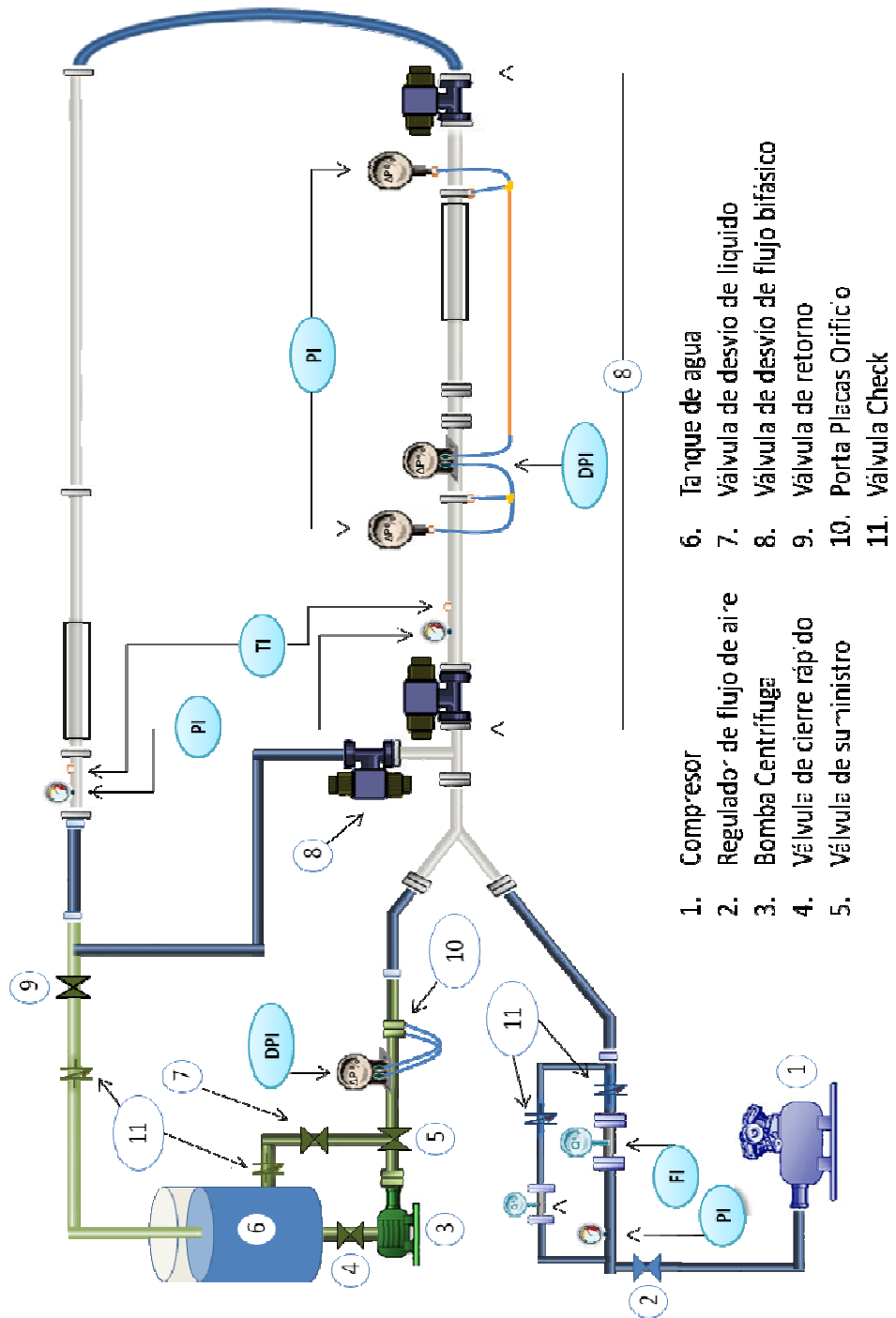


Figura 3. Diagrama de componentes del banco de ensayos.

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

El suministro de líquido al banco de ensayos se realiza mediante una bomba centrífuga con 7,5 HP de potencia, que maneja un caudal de 0,00504 m³/s (80 GPM) a una presión a la salida de aproximadamente 414 kPa (80 lb/in²) (Figura 4). Los elementos constructivos de este sistema de suministro se presentan en el trabajo de Haoulo (2007) y se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Elementos del sistema de suministro del líquido (Haoulo, 2007).

Cantidad	Elemento	Descripción
1	Tanque de almacenamiento del líquido	Capacidad de 520 litros
1	Bomba centrífuga	Potencia 7.5 HP. Capacidad de 80 GPM (aprox.), motor eléctrico trifásico (220 ó 440volt.) consumo de 10 a 22 A. depende del voltaje usado
1	Válvula de cierre rápido manual	2"
2	Válvula de no retorno	2"
3	Válvula de compuertas	2"
15 m aprox.	Tubería galvanizada	2"
2	Conectores para mangueras flexibles	2"
1	Válvula de seguridad	Presión máxima estática 60 psi.
	Alimentación eléctrica	Línea trifásica de 440 voltios
1	Arrancador eléctrico de la bomba	Con la protección térmica ajustada a 17 A.

Para controlar el caudal de líquido que se suministra al circuito experimental, se instaló un sistema de dos válvulas de compuertas como se puede ver en la Figura 4, una que suministra al circuito el caudal del líquido requerido de forma directa, y la otra válvula que desvía el caudal excesivo hacia el tanque de almacenamiento. Después que el líquido viaja por el circuito experimental mezclado con el gas (aire) retorna otra vez al tanque de almacenamiento y el aire se separa por efecto de densidad y el líquido se recupera (Haoulo, 2007).

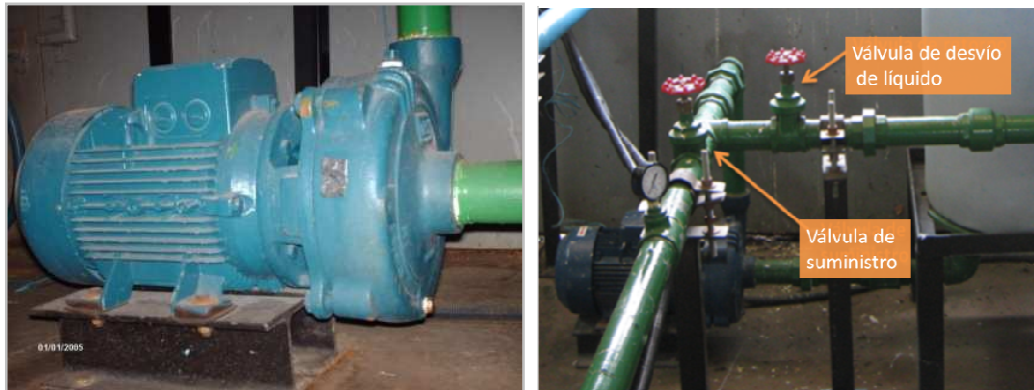


Figura 4. Bomba centrífuga (izquierda), Válvulas de suministro y desvío (derecha).

El suministro de aire proviene de dos compresores recíprocos industriales. El primer compresor de mayor capacidad está ubicado en el cuarto de calderas (Figura 5) y cuenta con un motor eléctrico trifásico de 20 HP de potencia, con capacidad de 1378,96 kPa (200 psig) de presión, aunque la presión máxima de operación está fijada en 1034,22 kPa (150 psig) por cuestión de seguridad. El segundo compresor está ubicado dentro del galpón de máquinas térmicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica (Figura 5), y cuenta con un motor de 15 HP de potencia, con capacidad de 1378,96 kPa (200 psig) de presión, aunque la presión máxima de operación está fijada en 827,37 kPa (120 psig), igual que el caso anterior, por seguridad.

Para realizar los ensayos experimentales con bajos caudales es utilizado el compresor de menor capacidad, y cuando es necesario incrementar el caudal de aire se emplean ambos compresores para lograr las velocidades superficiales requeridas. Los componentes del sistema de suministro de aire se presentan en la Tabla 2.



Figura 5. Compresor del galpón (Izquierda), Compresor sala de calderas (Derecha) (Toro y Suarez, 2007).

Tabla 2. Componentes del sistema de suministro de aire (Haoulo, 2007).

<i>Cantidad</i>	<i>Elemento</i>	<i>Descripción</i>
1	Compresor (Sala de calderas)	Motor: Potencia 20 HP, 1460 RPM, 220/440 V 52.6/26.3 A, trifásico 50 Hz. Compresor: marca INGERSOLL-RAND, tipo 30, modelo 20T2, serial 257167 Tanque: medidas (0,76 x 2,13) m ² ó (30 x 84) pulgadas ² , capacidad 1378,96 kPa (200 psi)
1	Compresor (Taller)	Motor: potencia 15 HP, 1700 RPM, 416 V, 27A, trifásico, 50 Hz. Compresor: marca INGERSOLL-RAND, modelo 15T, serial 200295 Tanque: medidas (1,52 x 0,91) m ² ó (60 x 36) pulgadas ² , capacidad 1378,96 kPa (200 psi)
1	Válvula de no retorno	5,08 cm (2")
1	Válvula de no retorno	2,54 cm (1")
2	Válvula de compuertas	2,54 cm (1")
2.5m aprox.	Tubería galvanizada	5,08 cm (2")
5 m aprox.	Tubería galvanizada	2,54 cm (1")
1	Conector para mangueras flexibles	5,08 cm (2")

3.2. CIRCUITO DE FLUJO BIFÁSICO

El circuito de flujo bifásico, que se muestra en la Figura 6, está conformado por secciones de tubería de acrílico transparente con un diámetro de 0,0381 m (1½ pulgada), dispuestos en forma de "U" que descansan sobre una plataforma que permite variar el ángulo de inclinación, y que en conjunto con los sistemas de

suministro de fluidos y elementos de medición conforman el banco de ensayos experimental utilizado en este trabajo.

El circuito de tuberías cuenta con dos tramos paralelos, uno de ascenso por donde se inyectan los fluidos por la sección de mezcla y otro de descenso que a la vez sirve de retorno de flujo al tanque de almacenamiento. En ambos tramos se encuentra una zona de desarrollo fluidodinámico de una longitud determinada, una zona de prueba acondicionada con conexiones para medición de presión y una sección de visualización, en la cual se toma en cuenta el efecto de distorsión de la imagen generado a causa de la curvatura de la tubería transparente.



Figura 6. Circuito de flujo bifásico.

Adicionalmente, el circuito de flujo bifásico está acondicionado con 3 válvulas de cierre rápido dispuestas de manera que, al cerrar dos de ellas (válvula 1 y 2, Ver Figura 7) se pueda recolectar la fracción volumétrica de líquido dentro de la tubería, mientras que la otra válvula de desvío situada después de la sección de mezcla es abierta para permitir el retorno del flujo al tanque principal. La disposición de las válvulas y el diseño y fabricación de la sección de retorno en forma de letra “T”, fue desarrollada por Leyton y Hernández (2008) y se muestra en la Figura 7.

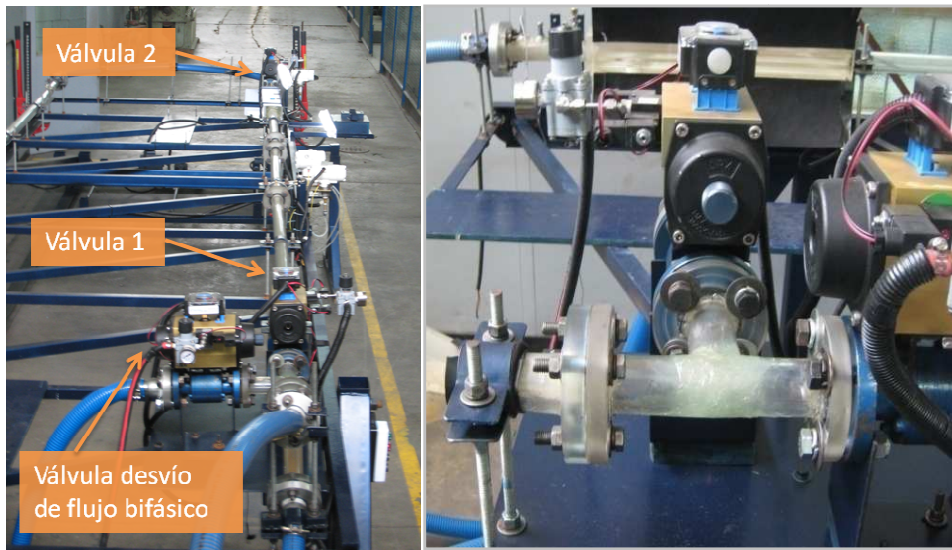


Figura 7. Disposición de válvulas de cierre rápido (Izquierda) y sección de retorno (Derecha) (Leyton y Hernández, 2008).

Después de haber sido instaladas las válvulas para medir la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento y la sección de mezcla en forma de letra “Y”, la zona de desarrollo del banco experimental tiene una longitud de 2.37 m, con una relación longitud-diámetro 62.2 D. Inmediatamente después se encuentra la sección de pruebas que tiene una longitud de 2.77 m con una relación longitud-diámetro 73 D aproximadamente, donde está ubicada la zona de visualización. Estas distancias están limitadas por el espacio físico disponible.

3.2.1. NIVELACIÓN DE LAS TUBERIAS

El banco de ensayos se caracteriza por su versatilidad para variar su ángulo de inclinación, y la adecuada nivelación del circuito es indispensable para obtener correctas mediciones de caída de presión, así como la visualización de los niveles de líquido en la tubería para medir la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento.

Durante la instalación de las tuberías, válvulas y acoples, la nivelación del circuito de flujo fue alterada, por lo cual se requirió nivelar el mismo con precisión para garantizar la horizontalidad. En este sentido, una pequeña variación en la

inclinación de las tuberías tiene como consecuencia una incorrecta visualización de la fracción volumétrica de líquido dentro de la tubería, así como una medición errónea de caída de presión por efecto de elevación.

La nivelación de las tuberías se realizó con un nivelador láser marca SKIL modelo 500 con una precisión de $\pm 12\text{mm}$ a 10 m, montado sobre un trípode ubicado dentro del circuito experimental, de manera que al girar el haz de luz del nivelador se pueda visualizar y corregir la horizontalidad del sistema (Ver Figura 8). Para visualizar el nivel del láser con mayor facilidad, se emplean unos lentes especiales y se utilizan unos paneles de cartón en contacto con la tubería por la parte exterior del circuito para reflejar el laser proyectado por el equipo como nivel de referencia.



Figura 8. Nivel Laser.

3.3. ELEMENTOS DE MEDICIÓN

En este punto se hace referencia a las características de los equipos de medición instalados en el banco de ensayos.

3.3.1. PLACAS DE ORIFICIO Y PORTA PLACAS

El porta placas y el juego de placas orificio utilizados en este trabajo fue fabricado y construido por (Toro y Suarez, 2007) siguiendo las normas ISO 5167-1:2003 (E) e ISO 5167-2:2003 (E). En la Figura 9 se muestra las tomas para la medición de presión diferencial en la línea de suministro de agua.



Figura 9. Tomas en la brida para la medición de presión diferencial.

En el presente trabajo sólo se llevó a cabo la instalación y calibración de las placas orificio de 0.0127, 0.019 y 0.0254 m ($\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ y 1 pulgada) de diámetro, para determinar el caudal de líquido en el banco de ensayos. En la Figura 10, se muestra el juego de placas orificio utilizados en el presente trabajo.



Figura 10. Juego de placas orificio.

3.3.1.1. MÉTODO DE CALIBRACIÓN DINÁMICO

Dadas las condiciones de operación y disposición física de los elementos del banco de ensayo, la calibración de las placas orificio para agua se realizó mediante el método de recolección dinámica de fluido en un tanque aforado de dimensiones

conocidas, basado en las normas ISO 8316:1987 (E). Para ello, se cuenta con 2 tanques aforados (Figura 11) cuyas dimensiones se presentan en la Tabla 3.



Figura 11. Tanques utilizados para la calibración de las placas orificio.

Tabla 3. Dimensiones de los Tanques aforados.

	<i>Tanque Pequeño</i>	<i>Tanque grande</i>
<i>Espesor [m]</i>	<i>0.0044</i>	<i>0.00175</i>
<i>Perímetro [m]</i>	<i>1.165</i>	<i>1.836</i>
<i>Diámetro interno [m]</i>	<i>0.362</i>	<i>0.549</i>

El principio del método de medición de tasa de flujo volumétrico mediante la calibración dinámica es el siguiente:

- Recolección de líquido hasta obtener un nivel (volumen) inicial Z_0 (V_0) predeterminado en donde se inicia el contador de tiempo t_0 .
- Detener el tiempo t_1 cuando el nivel (volumen) alcance un valor final Z_1 (V_1) predeterminado.

Con estos valores obtenidos y la fórmula que relaciona el tiempo de llenado con el volumen recolectado se determina el caudal correspondiente y se grafica la curva de calibración del sistema.

$$Q = \frac{\text{Volumen}(m^3)}{\text{tiempo}(s)} = \frac{\pi * r^2 * \Delta H_{\text{agua}}}{\Delta t} = \frac{\pi * r^2 * (Z_1 - Z_0)}{t_1 - t_0} \quad (16)$$

Donde:

r: Radio del tanque volumétrico

ΔH_{agua} : Diferencia de altura de agua en el tanque volumétrico

Δt : tiempo de llenado de un ΔH_{agua} predeterminado

3.3.1.2. CALIBRACIÓN DE LAS PLACAS ORIFICIO

Para realizar la calibración de las placas orificio es necesario tomar en cuenta los siguientes valores de medición:

- ΔP : Diferencia de presión medida en las tomas de presión aguas arriba y aguas abajo
- ΔH_{agua} : Diferencia de altura del nivel del agua en un tanque volumétrico.
- t: Tiempo que el sistema tarda en llenar un ΔH_{agua} en el tanque volumétrico.

Para garantizar la correcta medición de estos valores es necesario verificar que el circuito de calibración posea los siguientes parámetros o requerimientos:

- En el circuito de calibración no deben existir fugas para evitar mediciones erróneas de volumen en el tanque volumétrico.
- No deben existir burbujas de aire atrapado entre la zona donde está ubicado el medidor de presión diferencial y el tanque volumétrico para evitar lecturas erróneas de ΔP .

- Cuando se establece la capacidad volumétrica del tanque se deben tomar en cuenta las irregularidades que pueden existir en la medición del perímetro y altura, así como el espacio ocupado por la sección transversal de la manguera sumergida en el mismo para no alterar los posteriores cálculos de volumen recolectado. Para ello se realizaron varias mediciones de perímetro en el tanque a diferentes niveles de líquido recolectado para garantizar que los cálculos posteriores de área transversal sean correctos. En la Figura 12, se muestra un diagrama del sistema de calibración de las placas orificio.
- La medición del tiempo inicial y final para un nivel predeterminado de agua debe llevarse a cabo con sumo cuidado para obtener un valor con buena precisión en el posterior cálculo del caudal.

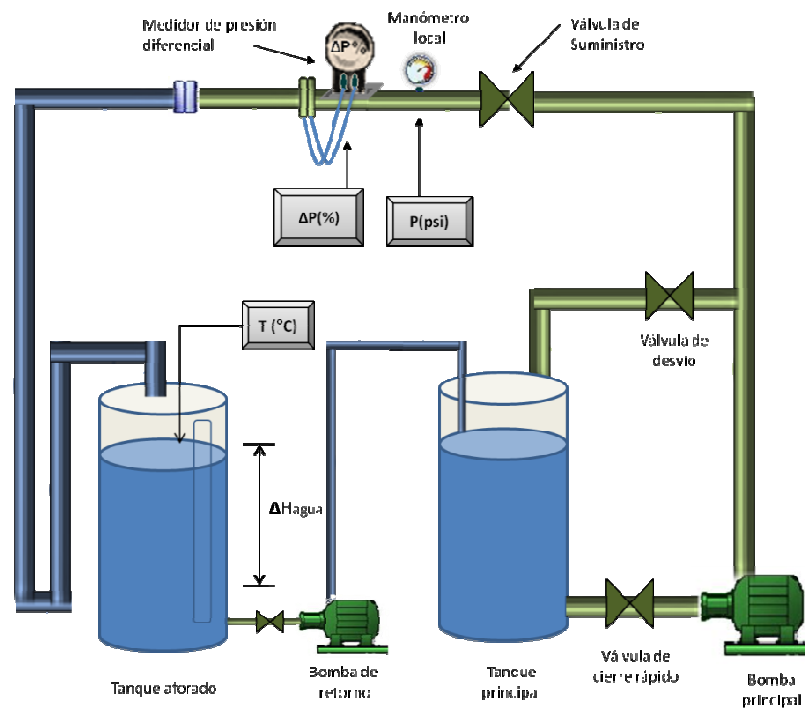


Figura 12. Diagrama del circuito de calibración para las placas orificio.

3.3.1.3. PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE LAS PLACAS ORIFICIO

1. Suministrar de agua al sistema de calibración de manera tal que, cuando el tanque aforado esté a un 80% aproximadamente de su capacidad, el tanque principal se encuentre al menos en un 50% de su capacidad para evitar la entrada de aire al sistema.
2. Desconectar la descarga del sistema y conectarla a un tanque aforado de diámetro conocido.
3. Conectar una bomba auxiliar para retorno del tanque aforado al tanque del sistema.
4. Colocar la placa orificio a calibrar en el porta placa.
5. Conectar el medidor de presión diferencial digital.
6. Verificar que la válvula de cierre rápido en la succión de la bomba principal esté abierta.
7. Verificar que las válvulas de suministro y de desvío estén cerradas.
8. Encender la bomba principal y abrir la válvula de desvío.
9. Abrir la válvula de suministro lentamente y purgar el medidor de presión diferencial abriendo su válvula de purga hasta que se elimine de las mangueras la presencia de burbujas de aire y luego cerrar dicha válvula.
10. Verificar que no existan burbujas de aire acumuladas en la manguera que llega al tanque aforado.
11. Abrir la válvula de suministro hasta que se comience a apreciar un ΔP en el medidor de presión diferencial.
12. Esperar que se estabilice el flujo de agua y tomar el valor ΔP del medidor.
13. Fijar un nivel inicial ΔH_{agua} en el tanque aforado.
14. Tomar el tiempo que tarda en alcanzar una posición final predeterminada dicho ΔH_{agua} y registrar la temperatura del agua en el tanque.
15. Repetir el paso de (13) al menos tres veces para un mismo valor de ΔP .

16. Abrir la válvula de la bomba secundaria y prender la misma para retornar el agua al tanque principal cuando ocurran las condiciones nombradas en el paso (1).
17. Repetir las operaciones de la (13) hasta la (16) barriendo todo el intervalo de ΔP registrado por el medidor de presión diferencial.
18. Tabular todos los valores obtenidos y determinar el caudal de agua que circula por la placa orificio según la ecuación [16].
19. Graficar los valores obtenidos de caudal vs. ΔP para la placa orificio y realizar un ajuste potencial que garantice que la curva pase por el origen de coordenadas y satisfaga el comportamiento descrito por la ecuación [17].

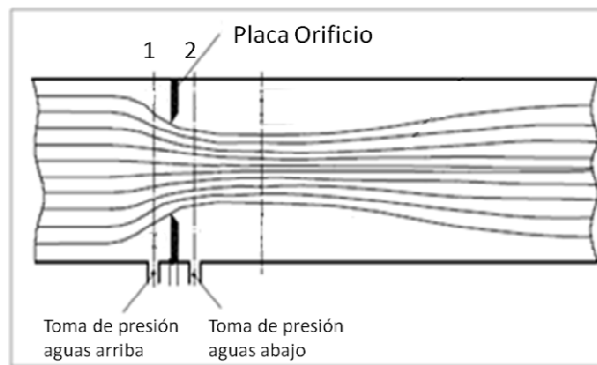


Figura 13. Esquema de un porta placa orificio.

Para el volumen de control señalado entre las secciones 1 y 2 (Figura 13), aplicando el principio de conservación de energía y ecuación de continuidad, y suponiendo que el flujo unidimensional, isotérmico, no viscoso, con densidad constante y despreciando los efectos de elevación (Manual del Ingeniero Mecánico, 1999), se tiene la tasa de flujo volumétrico en función de la caída de presión como:

$$(177)$$

Como se puede ver, el caudal es función de una constante K por la caída de presión elevada a la 0.5, es por ello que se debiera esperar este comportamiento en el ajuste potencial de las curvas de calibración de las placas orificio.

El procedimiento de calibración se debe realizar para cada una de las placas orificio de agua. En el caso de la placa orificio de $\frac{1}{2}$ pulgada (placa de menor diámetro de orificio), se utilizó el tanque aforado de menores dimensiones para bajos caudales, dejando así el tanque aforado de mayores dimensiones para altos caudales de dicha placa, así como para las placas de $\frac{3}{4}$ y 1 pulgada de diámetro. En la Figura 14, se presentan las curvas características para el juego de placas orificio.

La determinación de la incertidumbre asociada al flujo volumétrico de líquido representa uno de los parámetros esenciales que afectan de manera directa la caída de presión por fricción. Esta incertidumbre requiere de la determinación de mediciones directas e indirectas para el cálculo del caudal de agua y está fundamentada en el Apéndice A.

Los datos obtenidos experimentalmente y las ecuaciones correspondientes a cada placa orificio con sus respectivas incertidumbres asociadas y los errores se presentan en las Tablas A.1, Tabla A.2, Tabla A.3 y Tabla A.4. Adicionalmente, en las Figura A.1, Figura A.2 y Figura A.3 se muestran las curvas características para cada una de las placas orificio.

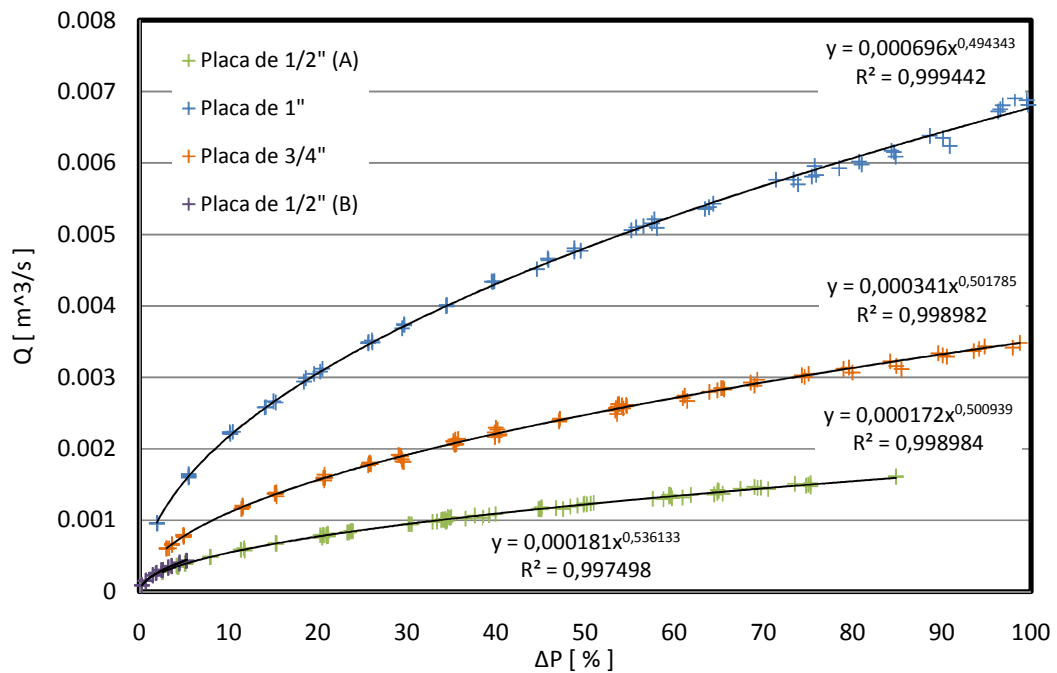


Figura 14. Curvas de calibración de las placas orificio.

3.3.2. MEDIDORES DE CAUDAL DE LOS FLUIDOS DE OPERACIÓN

Se llevó a cabo la instalación de un medidor de presión diferencial digital marca ABB con un intervalo de 2.5-250 kPa (0.36-36.26 psig) y una precisión de ± 0.10 kPa de la medición, el cual fue seleccionado y adquirido anterior a este trabajo y con el fin de sustituir el uso, tanto del medidor de presión diferencial digital marca ABB antes instalado de 0.4-40 kPa con una precisión de ± 0.016 kPa para bajos y medianos caudales de la placa de 0.0127 m (1/2 pulgada) como del medidor de presión diferencial de mercurio para registrar la caída de presión generada con la placa de 0.019 m (3/4 pulgadas) de diámetro. El equipo está conectado a las tomas de presión del porta placas orificio instalado en la tubería de suministro de líquido, como se muestra en la Figura 15.

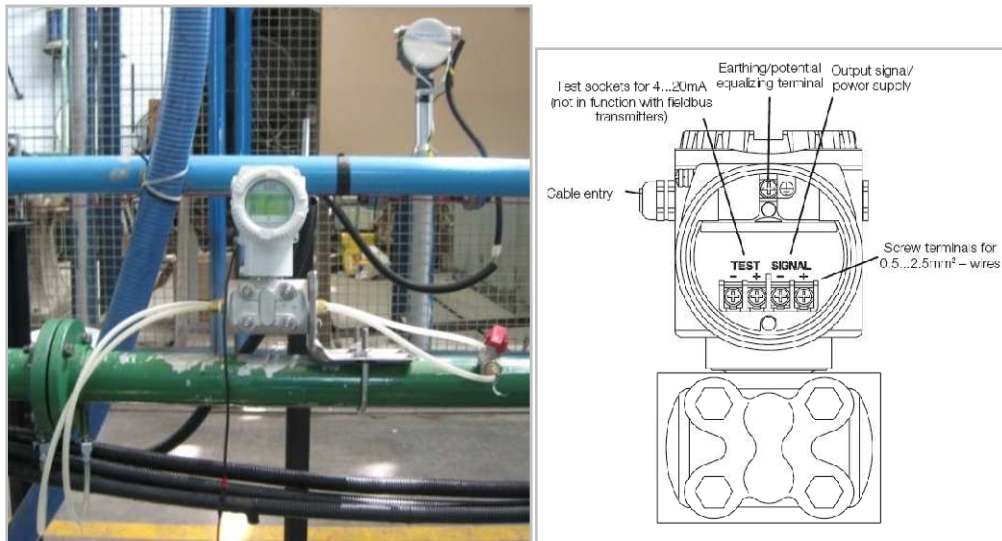


Figura 15. Medidor de presión diferencial (Izquierda) y diagrama de conexiones eléctricas (Derecha).

El suministro de aire al circuito experimental se realiza mediante dos secciones de tubería de diferentes diámetros dependiendo del caudal requerido para obtener los patrones de flujo y gradiente de presión asociados. La tubería de suministro de 0.0254 m (1 pulgada) utilizada para bajos caudales de gas cuenta con un medidor de caudal de aire tipo Vortex marca ABB, (Figura 16), con un intervalo de 12-82 m³/h y una precisión de ± 0.82 m³/h.



Figura 16. Medidor de Flujo (Vortex 1 pulgada de diámetro).

Adicionalmente, se llevó a cabo la instalación y puesta punto de un equipo de medición de flujo volumétrico tipo Vortex, marca ABB, el cual fue seleccionado y adquirido anterior a este trabajo (Ver Figura 17). Dicho equipo se utilizó en este trabajo para medir el flujo de gas en la línea de de suministro de aire de 50,08 mm (2 pulgadas) en un rango de medición de 40-500 m³/h con una precisión de ± 5 m³/h. Ambos medidores de flujo volumétrico tienen su certificados de calibración dado por el fabricante.



Figura 17. Vortex de 2 pulgadas.

Es importante destacar que anteriormente se utilizaba un manómetro diferencial de mercurio acoplado a la placa orificio de 0,0127 m (½ pulgada) en la línea de suministro de aire de 50.08 mm (2 pulgadas) de diámetro (Figura 18).

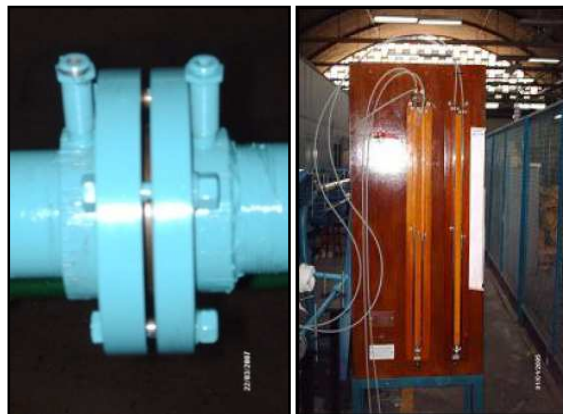


Figura 18. Porta placa orificio de la línea de aire de 2 pulgadas y manómetro diferencial de mercurio.

3.3.3. MEDIDORES DE PRESION LOCAL Y DIFERENCIAL

Los equipos de medición de presión utilizados en este trabajo para la determinación de caída de presión en el circuito experimental de flujo bifásico corresponden a dos indicadores de presión local marca ABB con un intervalo de 0.07-2400 kPa (0.010-348.1 psig) con una precisión de $\pm 1,8$ kPa, y un medidor de presión diferencial marca ABB con un intervalo de 0.4-40 kPa (0.058-5.80 psig) con una precisión de $\pm 0,016$ kPa, los cuales se instalaron y conectaron a las tomas de presión ubicadas en la sección de prueba y cuya selección y procura es anterior a este trabajo. Los medidores de presión local y diferencial se muestran en la Figura 19.

La instalación de los conductos de distribución de fluido hacia dichos equipos se llevó a cabo mediante el uso de una tubería y accesorios de cobre de 6.35 mm ($\frac{1}{4}$ de pulgada), una manguera flexible transparente de 6.35 mm ($\frac{1}{4}$ de pulgada) y conexiones rápidas que se acoplan a las tomas de presión del circuito. En la Figura 20 se presenta un diagrama de dicho sistema.



Figura 19. Medidor de presión local 1 y 2 y medidor de presión diferencial.

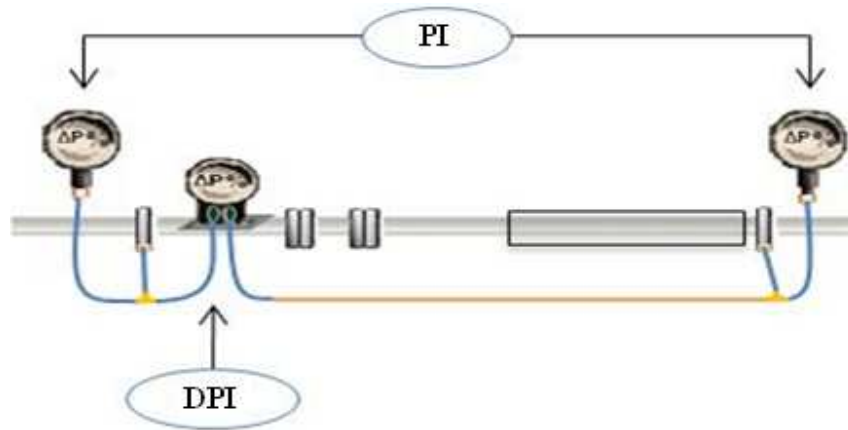


Figura 20. Diagrama de conexiones de los medidores de presión local y diferencial.

Adicionalmente, a los medidores de presión diferencial se les instaló un sistema de purga que consiste en una válvula de cierre rápido, la cual conecta la toma de presión de alta y de baja a fin de eliminar las burbujas de aire dentro del sistema y garantizar que siempre se encuentre líquido dentro de los conductos de distribución de fluido hacia los medidores, como se muestra en la Figura 21.



Figura 21. Sistema de purga del medidor de presión diferencial.

3.3.4. COMPONENTES PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES

3.3.4.1. CAJA DE VISUALIZACIÓN

Para conocer más acerca de la construcción de la caja de visualización, se puede hacer referencia a los trabajos de Toro y Suárez (2007) y Haoulo (2007).

Anteriormente, la caja de visualización tenía alrededor de sus paredes externas superior, inferior y posterior, una cartulina de color blanco y dos paneles de color negro en la parte frontal que servían como filtro para dirigir la luz emitida por la fuente de iluminación. Aun así, el efecto obtenido en las imágenes registradas se logra mejorar colocando unos filtros de anime comprimido recubiertos por cartulina blanca en la pared superior e inferior de la caja rectangular y cambiando los paneles de color negro de la parte frontal unos nuevos para mejorar el reflejo de luz y la calidad de la imagen (Figura 22).

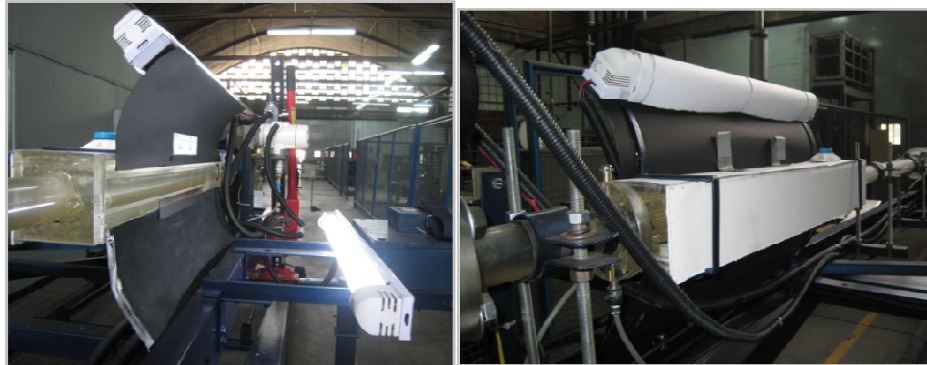


Figura 22. Caja de visualización.

3.3.4.2. VIDEOCÁMARA

Para realizar la captura de imágenes y apreciar posteriormente el flujo de fases en alta definición, se adquirió para este trabajo una videocámara Handycam Sony digital HD modelo HDR-SR7E con una capacidad de 60GB capaz de registrar hasta 3 imágenes fijas con una resolución hasta 6 mega pixel mientras se filma el video deseado.

Anteriormente, se contaba con una videocámara convencional de buena calidad (Handycam modelo: DCR-HC21, MINI DV con digital video cassette, CCD de 680 k pixel), pero sin las características de nueva generación necesarias para la filmación como la que se cuenta actualmente. La comparación de las imágenes registradas se muestra en la Figura 23.

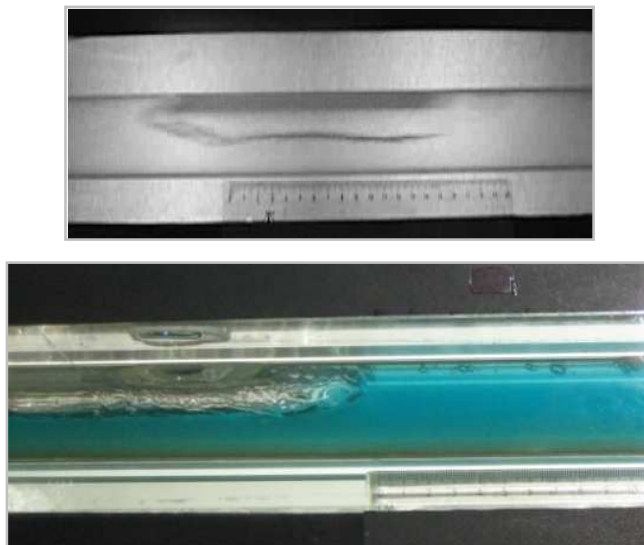


Figura 23. Patrones de flujo registrados. DCR-HC21 (Arriba), HDR-SR7E (Abajo).



Figura 24. Videocámara instalada.

El banco de ensayos tiene anexa una plataforma sobre la cual es montada la videocámara, de manera que independientemente de la inclinación del circuito siempre estará alineada con la caja de visualización y la fuente de iluminación como se muestra en la Figura 24.

3.3.4.3. FUENTE DE ILUMINACIÓN

La escasa iluminación en la zona de visualización donde está ubicada la videocámara no permite obtener claramente la configuración de las fases dentro de la tubería de acrílico, por lo que es necesario utilizar una fuente de iluminación para alcanzar una imagen clara y con el contraste de luz necesario para poder registrar el fenómeno en estudio.

En estudios anteriores de patrones de flujo en el banco de ensayos, la fuente de iluminación consistía en una configuración de dos bombillos de halógeno de luz amarilla, de 110 voltios y 50 vatios de potencia, montados en una caja rectangular de madera ubicada en la parte posterior de la caja de visualización. El efecto de la luz amarilla no permitía observar con claridad la interfase agua-aire (Figura 25) y la videocámara no registraba correctamente el contraste de luz.

Una solución a éste problema consistió en tinter el agua con 50 ml de colorante artificial azul en los 520 l de capacidad del tanque principal (0.0096% v/v o 96 ppmv), pudiendo de esta manera visualizar claramente la interfase de los fluidos. En cuanto a la fuente de iluminación se seleccionaron dos bombillos tubulares de halógeno de luz blanca con una potencia de 17 vatios cada uno y dispuestos como se muestra en la Figura 25.



Figura 25. Disposición del sistema de iluminación. Sistema anterior (Izquierda), Sistema Mejorado (Derecha).

3.4. REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DEL BANCO DE ENSAYOS

3.4.1. SECCION DE MEZCLA Y.

Las especificaciones de diseño del mezclador de fluidos suministrados al sistema de flujo bifásico son de gran importancia para poder propiciar los patrones de flujo que se desean registrar en las pruebas experimentales, es por ello que en la construcción del mismo se tiene que tomar en cuenta los parámetros indicados por Gómez (2005) y Haoulo (2007) con respecto a las limitaciones longitudinales del banco de ensayos, como lo son, construir la sección de mezcla en forma de “Y” con la menor separación entre las ramas de tubería y agregar una placa separadora en la zona inicial del mezclador, entre otros.

Sin embargo, la sección de mezcla con la que se contaba para realizar las pruebas experimentales en los anteriores trabajos de investigación (Figura 26), estaba conectada a las mangueras de suministro de agua y aire por medio de abrazaderas convencionales y cuando se operaba el banco de ensayos se interrumpía la continuidad del flujo ocasionando el desprendimiento de las uniones entre mangueras y tuberías.

El sistema de unión de bridas es empleado en el rediseño y fabricación de la nueva sección de mezcla, así como el biselado del extremo de la placa separadora de manera que se propicie la estratificación y la turbulencia al mezclarse los fluidos sea lo menor posible, evitando vibraciones no deseadas en el circuito. La sección de mezcla con bridas en sus extremos se muestra en la Figura 26 y sus planos se presentan en la Figura A. 4. El diseño de las bridas de unión se basó en la norma ASME 16.5.



Figura 26. Sección de mezcla (Haoulo, 2007) (Izquierda), Sección de mezcla con uniones mediante bridas (Derecha).

3.4.2. SECCIÓN DE DESVÍO DE FLUJO BIFÁSICO

En flujo bifásico las velocidades de las fases generalmente no son iguales y la determinación de la fracción volumétrica de líquido es de gran importancia para entender el comportamiento del flujo dentro de la tubería.

En este sentido, para llevar a cabo la medición de la fracción volumétrica de líquido, el flujo suministrado a la sección de mezcla es desviado mediante la instalación de la sección de retorno “T” ubicada entre la sección de mezcla y la válvula 1, como se muestra en la Figura 27 y cuya construcción e instalación corresponde al trabajo desarrollado por Leyton y Hernández (2008).



Figura 27. Sección de desvío de flujo bifásico.

3.4.3. SISTEMA DE UNIÓN DE MANGUERAS Y TUBERÍAS

El diseño y fabricación del sistema de acople tubería- manguera y tubería-tubería es objetivo de este trabajo y se desarrolló en base a la norma ASME 16.5. En el Figura A. 5 se muestran al detalle los planos de estos sistemas de acople.

La razón de construcción de este tipo de unión es generar mayor continuidad en el flujo, dado que anteriormente las conexiones con abrazaderas convencionales eran débiles y las fuerzas de roce interfaciales entre la manguera y el acrílico eran tan bajas que provocaban deslizamiento entre los elementos conllevando a un colapso del sistema.

El sistema de unión tubería-manguera consta de una brida de acrílico soldada en el extremo de la tubería y una brida de aluminio conectada a la manguera Spiraflex de 0.0508 m (2 pulgadas) de diámetro a través de un niple combinado. Dicho sistema es empleado en la sección de mezcla con las mangueras de suministro de agua y aire, así como en la sección de entrada y salida de flujo descendente, como se muestra en la Figura 28.

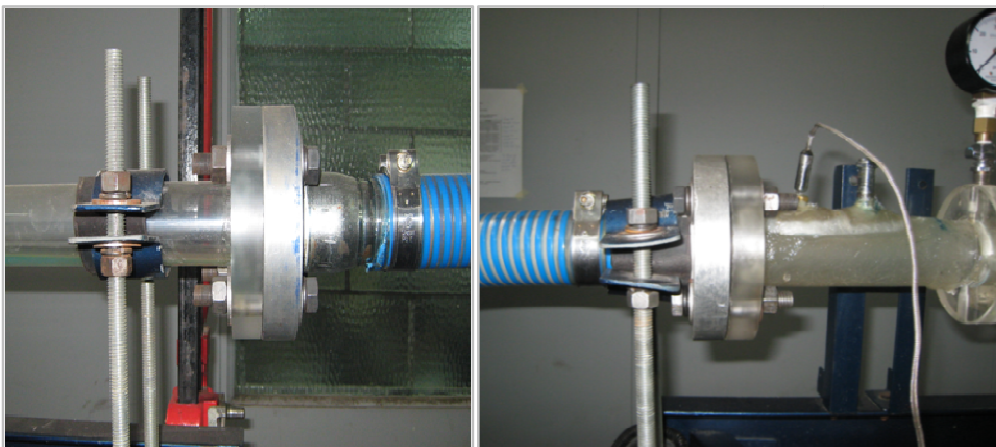


Figura 28. Sistema de acople en la sección de entrada y salida de flujo descendente.

El sistema de unión con bridas tubería-tubería es similar al anterior, pero con ambas bridas de acrílico soldadas a la tubería, enfrentadas a tope y apernadas entre sí

mediante 4 tornillos de 0.0127 m (½ pulgada) de diámetro. Este acople es empleado entre la sección de mezcla “Y” y la sección de desvío de flujo bifásico, así como en varios tramos a lo largo de la tubería recta de la sección de flujo ascendente (Figura 29).

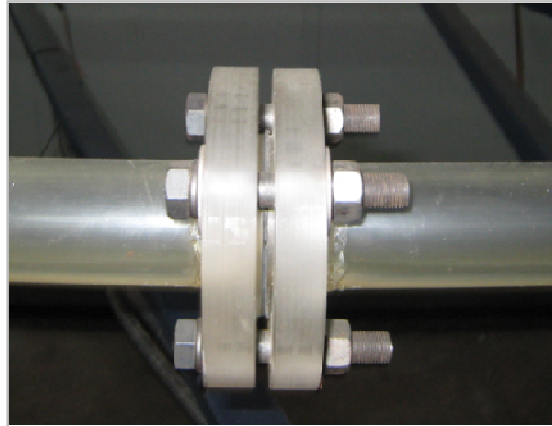


Figura 29. Sistema de acople tubería-tubería.

Por otro lado, se llevó a cabo el diseño y fabricación de las bridas requeridas para la instalación del Vortex de la línea de aire de 0.0508 m (2 pulgadas) de diámetro (Figura 30), las cuales se fabricaron de Acero AISI 1020 y siguiendo las especificaciones mostradas en el catálogo del equipo como se muestra en la Tabla A. 7.



Figura 30. Bridas del Vortex de 2 pulgadas.

3.5. SÍNTESIS DE LAS MODIFICACIONES Y MEJORAS REALIZADAS

Se especificaron los detalles relacionados con la instalación del medidor de flujo volumétrico para altos caudales en la línea de suministro de aire de 0.0508 m (2 pulgadas) de diámetro que requirió la fabricación de bridas con el dimensionamiento sugerido por el catálogo del equipo. Por otro lado se cuenta con otro medidor de caudal de aire de 0,0254 m (1 pulgada) de diámetro para bajos caudales, el cual fue instalado en un trabajo previo.

Se especificaron con detalle, la instalación y calibración del juego de placas orificio en el porta placas de la línea de suministro para evaluar el caudal de líquido que genera una caída de presión registrada por el medidor de presión diferencial.

El sistema de acoples entre manguera-tubería y tubería-tubería fue modificado, el cual consta de bridas unidas por pernos para sustituir las anteriores uniones mediante abrazaderas convencionales que no garantizaban la correcta sujeción cuando el banco se ensayos operaba a su condición máxima de operación.

La determinación de la caída de presión experimental en la sección de prueba se realizó mediante la instalación de un medidor de presión diferencial y dos medidores de presión local en el circuito de flujo, el cual se niveló a partir de un nivelador laser que garantice la horizontalidad de la tubería.

Finalmente, las características dimensionales y operacionales para flujo monofásico se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Características del Banco Experimental.

Dimensional	
Diámetro de la tubería	0.0381 m (1 ½")
Longitud de desarrollo	2.37 m (62.2 D)
Longitud de Prueba	2.77 m (72.7 D)
Material de la Tubería	Acrílico transparente
Condiciones de Operación Flujo Monofásico	
Líquido	Agua
Gas	Aire
Caudal máximo de líquido [m ³ /s]x10 ³ (gal/min)	3.79 (60.07)
Caudal mínimo de líquido [m ³ /s]x10 ³ (gal/min)	0.090 (1.43)
Caudal máximo de gas [m ³ /s]x10 ³ (pie ³ /min)	48.6 (102.98)
Caudal mínimo de gas [m ³ /s]x10 ³ (pie ³ /min)	3.3 (6.99)
Rango de velocidades de líquido [m/s]	0.079 - 3.324
Rango de velocidades de gas [m/s]	2.895 - 42.628
Visualización de desarrollo y prueba	Ascendente y descendente
Cubrimiento ángulos de Inclinación	Desde -90° hasta + 90°
Presión máxima [kPa] (psig)	413,69 (60)
Temperatura máxima [° C]	60

CAPÍTULO IV: ENSAYOS EXPERIMENTALES.

4.1 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL INTERVALO DE OPERACIÓN DEL BANCO EN FLUJO BIFÁSICO

La matriz experimental de flujo bifásico está dividida en cuatro zonas. El trazado de este mapa es realizado en función de los equipos de medición necesarios para alcanzar las condiciones de caudal de agua y aire requerido para cada experimento.

Las velocidades superficiales de agua se determinaron a partir de los ajustes potenciales desarrollados en la calibración del juego de placas orificio y las velocidades superficiales de aire se estimaron de acuerdo al intervalo de operación de los medidores de flujo volumétrico de aire. En este sentido, cuando fluyen simultáneamente ambas fases en el circuito experimental, se evidencia una disminución en las velocidades superficiales máximas en comparación con las que se pudiese lograr si se operara con flujo monofásico, esto debido al incremento en la presión de operación y las capacidades de flujo de cada sistema.

En la Figura 31, se presenta la matriz experimental de flujo bifásico subdividida en regiones de acuerdo a los equipos que son necesarios utilizar para llevar a cabo los experimentos.

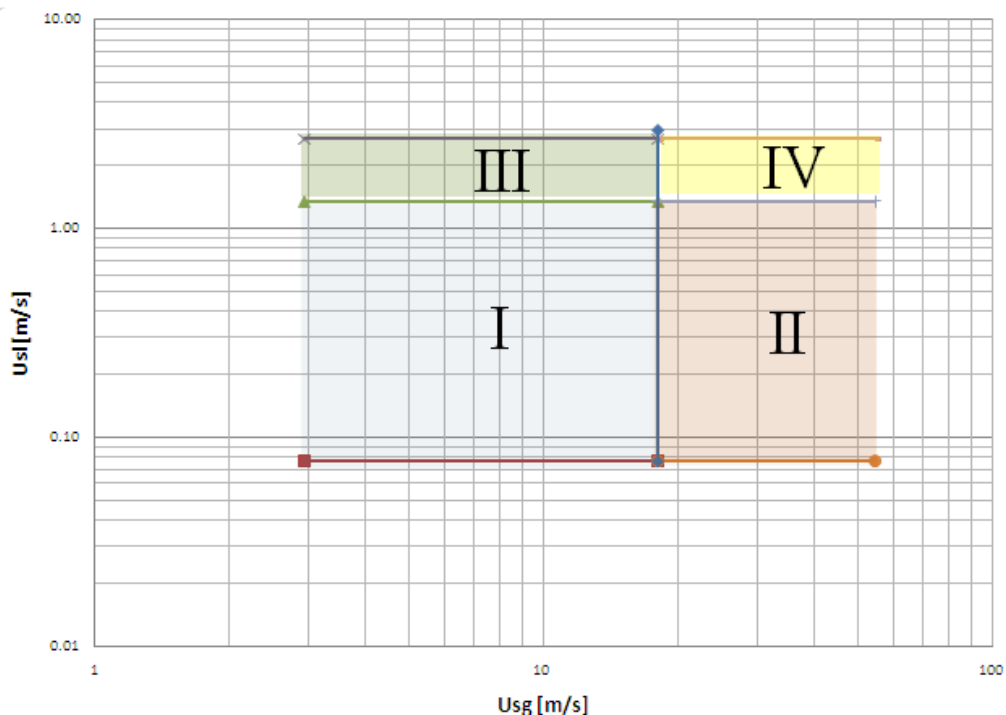


Figura 31. Zonas de trazado del mapa de patrones de flujo

El trazado de las cuatro zonas del mapa experimental consiste en mantener líneas horizontales de caudal de líquido constante y aumentando de forma gradual el caudal de gas, para cubrir todo el intervalo de velocidades superficiales de cada fase. En el primer cuadrante, se emplea la placa orificio de menor diámetro interno (½ pulgada) y el medidor de flujo volumétrico (Vortex de 1 pulgada) necesario para bajos caudales de aire. En el segundo cuadrante, se emplea el medidor volumétrico de altos caudales de aire (Vortex de 2 pulgadas) y se mantiene la misma placa orificio (½ pulgada) utilizada en el primer cuadrante. En el tercer cuadrante, donde se manejan altos caudales de agua se utiliza la placa orificio de ¾ pulgada de diámetro y el medidor de flujo volumétrico de 1 pulgada. De manera similar, en el cuarto cuadrante se hace uso del medidor de flujo volumétrico de 2 pulgadas y se mantiene la placa orificio de ¾ pulgada de diámetro utilizada en el tercer cuadrante.

En la Tabla 5, se muestra el intervalo de velocidades superficiales de agua y aire para cada cuadrante del mapa experimental de patrones de flujo.

Tabla 5. Intervalo de velocidades superficiales de agua y aire para flujo bifásico.

Cuadrante	I	II	III	IV
U_{sl} (m/s)	0.077-1.355	0.077-1.356	1.356 - 2.939	1.356 - 2.940
U_{sg} (m/s)	2.924 - 17.981	17.981 – 30.456	2.924 - 17.981	17.981 - 30.456

4.2. PUESTA A PUNTO DEL CIRCUITO EN FLUJO MONOFASICO, REGIMEN TURBULENTO

Para poner a punto el banco experimental y verificar los diferentes instrumentos de medición, se realizaron pruebas en flujo monofásico líquido en régimen turbulento. Así mismo, los datos experimentales obtenidos comprenden 43 puntos de caída de presión por fricción en régimen monofásico líquido (agua), donde la metodología empleada consistió en recorrer todo el intervalo de caudales de agua en flujo turbulento con números de Reynolds mayores a 15000 para garantizar que el flujo estuviese totalmente desarrollado.

Se determinó la caída de presión por fricción generada en la sección de prueba de 2.77 m mediante los medidores de presión local, el medidor de presión diferencial y un manómetro diferencial de mercurio, los cuales se instalaron de tal manera que se logró registrar simultáneamente dicho parámetro a fin de tener mayor confianza y precisión en los valores de caída de presión. Es importante destacar que los medidores de presión local, registraron valores que se encuentran fuera de su intervalo de apreciación, es por ello que no se tomaron en cuenta para el cálculo de caída de presión.

Se llevó a cabo la comparación entre los datos de caída de presión obtenidos experimentalmente por el medidor de presión diferencial y el manómetro de columna de mercurio en la Figura A. 7 y se determinó que existe una diferencia porcentual absoluta promedio entre ambos medidores del 7% (Tabla A.8).

A partir de dichos resultados arrojados por el medidor de presión diferencial digital, se compararon dichos valores con los esperados según la ecuación de Darcy

Weisbach:

$$h_l = f \frac{Z V^2}{D 2g} \quad (18)$$

Donde, el factor de fricción f fue el calculado a partir de la ecuación [15] de Zigrang y Sylvester (1985), suponiendo tubería lisa ($\epsilon=0$) de acuerdo a las recomendaciones tomadas del trabajo desarrollado por Tovar y Ibarra (2006). En este sentido, se determinó que el error porcentual absoluto promedio de la caída presión registrada por el medidor de presión diferencial digital con respecto a la ecuación de Darcy Weisbach suponiendo tubería lisa fue del 24.45%. (Tabla A.8 y Figura A.6).

La calibración del banco consistió en minimizar las fuentes de incertidumbres que afectan principalmente la determinación de caída de presión, como fue la medición del caudal, la longitud equivalente de la tubería y la rugosidad equivalente.

Un aspecto adicional que se tomó en cuenta, fue la determinación de la temperatura promedio en el cálculo de las propiedades termofísicas del agua, para ello se sabe que la máxima variación de temperatura en los experimentos fue de 1°C. En este sentido se realizó un análisis en la Tabla A. 9 asumiendo un caso hipotético donde exista una variación de $\pm 5^\circ\text{C}$ con respecto a la temperatura de operación promedio de los experimentos, con el fin observar cómo se vería afectada la caída de presión. Así el efecto de la temperatura en la caída de presión arrojó una variación máxima de 2.46%

En este mismo orden de ideas, para determinar el efecto del caudal en el cálculo de caída de presión, se utilizó el valor máximo de incertidumbre (0.00004 m³/s) reportado en el método de calibración, el cual puede afectar el cálculo final de caída de presión hasta en un 9.46% (Ver Tabla A.9).

En vista de los resultados obtenidos por los efectos combinados de temperatura y caudal, los cuales no justifican 24.45% de error entre la caída de presión experimental y la calculada teóricamente mediante la ecuación de Darcy Weisbach, se determinó la rugosidad equivalente que debería tener tubería del

circuito experimental para minimizar dicho error.

En este sentido, la evaluación de la rugosidad equivalente se realizó mediante un proceso iterativo usando el *Método de Optimización No Lineal* de Microsoft® Excel minimizando la desviación estándar de los residuales, dado por el error (E_4) y se determinó que la rugosidad equivalente de la tubería es 0.0000589 m (0.000193 pies), disminuyendo así el error porcentual absoluto promedio de 24.45% a 6.48% (Ver Tabla A.8).

Este valor obtenido de rugosidad de 0.0000589 m, es mayor que la especificada para tuberías de nuevas de acrílico, la cual es 0.0000152 m (0.00005 pies) según (Westaway, 1981), esto debido a los efectos de envejecimiento, uso y deterioro del acrílico en el tiempo. Adicionalmente, este valor de rugosidad equivalente mantiene implícito los efectos de pérdida de presión generada en las conexiones tubería-tubería debido a que se mantuvo constante la longitud real de la zona de prueba en los cálculos de caída de presión.

4.3. PROTOCOLO EXPERIMENTAL PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE GRADIENTE DE PRESIÓN DE FLUJO BIFÁSICO GAS-LÍQUIDO

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

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

4. Instalar la placa orificio requerida por el experimento para la determinación de la tasa de flujo volumétrico de agua.
5. Abrir la válvula de suministro de aire hacia las válvulas de cierre de rápido y cerciorarse que éstas mantengan una presión aproximada a 40 psig y posicionarlas de tal forma que permita el flujo a través del circuito de tuberías y mantener cerrada la válvula de desvío de flujo bifásico.
6. Activar los interruptores de alimentación de corriente hacia la bomba y del sistema de levantamiento, el cual suministra energía a todos los equipos de medición del banco, dichos interruptores están ubicados dentro del Laboratorio de Transferencia de Calor.
7. Proceder al encendido de la bomba asegurándose que la válvula de suministro y la válvula de retorno de líquido estén cerradas y que la válvula de retorno del banco este totalmente abierta.
8. Realizar la purga de los equipos de medición de presión, para ello es necesario abrir la válvula de suministro y permitir pasar un flujo de líquido que ocupe toda el área trasversal de la tubería y evitar que exista presencia de aire en las mangueras y tuberías de los medidores de presión locales y diferenciales.
9. Variar los caudales tanto de aire como de agua para un determinado experimento, de tal manera que se logre recorrer la matriz experimental manteniendo velocidades superficiales de líquido constante y aumentando progresivamente las velocidades superficiales de aire, garantizando que las condiciones del flujo se encuentren estabilizadas durante todo el tiempo de duración de dicha prueba.
10. Registrar y tabular los valores experimentales asociados al flujo volumétrico de agua, flujo volumétrico de aire, temperatura ambiental, temperaturas y presiones de entrada y salida del circuito, presiones locales y presión diferencial de la zona de prueba. En paralelo se lleva cabo la filmación del patrón de flujo obtenido en la zona de visualización.
11. Repetir los pasos (9) y (10) tantas veces como experimentos sean llevados a cabo, verificando que no existan burbujas de aire atrapado en los sistemas de

purga de los medidores de presión.

En la Figura 3, presentada en el Capítulo III, se identifican los componentes del banco experimental para la mejor implantación del protocolo descrito.

4.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.4.1. BASE DE DATOS EXPERIMENTAL DE CAÍDA DE PRESIÓN.

Los experimentos se realizaron en la sección de flujo ascendente del circuito experimental en posición horizontal. El tramo de tuberías de acrílico utilizado para realizar estas pruebas tiene un diámetro interno de 0,0381 m (1½ pulgada), en el cual la zona de desarrollo del flujo es de 2.37 m de longitud (62.2 D) y la sección de prueba es de 2.77 m de longitud (72.7 D). La temperatura y presión promedio de operación de los experimentos fue de 31.45 °C y 203.76 kPa abs respectivamente

Las pruebas realizadas de flujo bifásico para tuberías horizontales generaron 213 puntos experimentales de caída de presión, de los cuales 55 son de flujo anular, 4 de flujo burbuja dispersa, 39 de flujo tapón, 9 de flujo estratificado y 106 de patrones de flujo en transición. En la Tabla 6 se presenta la cantidad de datos experimentales por patrón de flujo así como las transiciones observadas.

Tabla 6. Cantidad de datos por patrón de flujo.

PATRÓN	PUNTOS
AN	55
BD	4
SL	39
SL-AN	62
SL-BD	29
SW	9
SW-AN	3
SW-SL	12
TOTAL	213

Adicionalmente, en la Tabla 7 se presenta un resumen de los intervalos de las variables medidas en los experimentos.

Tabla 7. Intervalo de valores obtenidos en los experimentos de flujo bifásico.

Parámetro	$\Delta P/\Delta Z$ [Pa/m]	U_{sl} [m/s]	U_{sg} [m/s]	$P_{operación}$ [kPa abs]	$T_{operación}$ [°C]
Promedio	3782.3	0.940	11.336	204	31.5
Mínimo	33.5	0.080	2.936	116	26.6
Mediana	3021.6	0.679	9.150	189	31.8
Máximo	13178.9	2.532	30,456	416	34.7

El mapa de patrones de flujo asociado a los datos de puntos obtenidos experimentalmente se presenta en la Figura 32.

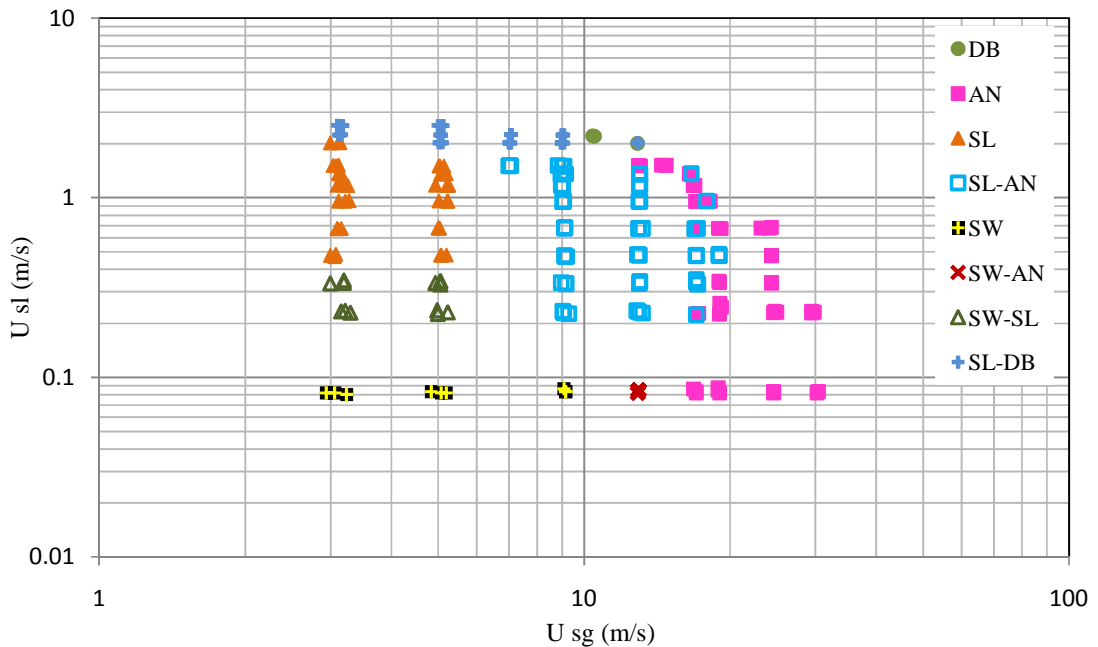


Figura 32. Mapa de patrón de flujo para $\theta=0^\circ$.

En la Figura 32 se puede observar que, para una velocidad superficial de agua de 0.08 m/s aproximadamente y velocidades superficiales de aire entre 3-9 m/s aire se propicia la estratificación de las fases. A medida que se incrementa progresivamente el caudal de aire manteniendo el caudal de agua constante, se comienza a perturbar la interfaz entre los fluidos y a aumentar la presión de operación, redistribuyendo de esta manera la fase líquida hacia las paredes de la tubería obteniéndose así la

transición hacia flujo anular. Cuando la velocidad superficial de agua alcanza los 17 m/s la película de líquido ocupa toda la periferia de la tubería y se observa bien definido el flujo anular.

Para el intervalo de velocidades superficiales de agua comprendido entre 0.45-2 m/s, con velocidades superficiales de aire entre 3-5 m/s, se observa flujo tapón, y al incrementar la velocidad superficial de aire se genera la transición hacia flujo anular. En velocidades superficiales de aire mayores a 20 m/s aproximadamente se observa bien desarrollado el flujo anular. Es importante destacar que para estas condiciones de operación se tienen los valores máximos de presión de operación en el sistema.

En el intervalo de 2.2-2.5 m/s de velocidades superficiales de líquido se observan transiciones de flujo tapón a burbuja dispersa para velocidades de aire menores a 9 m/s. El flujo burbuja dispersa se logra visualizar claramente para una velocidad superficial de aire de 11 m/s aproximadamente. A partir de este punto, un incremento en la velocidad de aire trae como consecuencia una disminución en el caudal de agua, es por ello que para cubrir esta zona es necesario suministrar un mayor flujo de agua. Tomando en consideración las limitaciones de bombeo, no se cuenta con el caudal de agua requerido para contrarrestar este efecto y no es posible conseguir puntos en dicha zona.

En las Figuras 33-44, se presentan los 213 experimentos de caída de presión por unidad de longitud versus la velocidad superficial de gas para diferentes intervalos de velocidades superficiales de líquido.

En un intervalo de velocidades superficiales de agua entre 0.082-0.086 m/s (Figura 33) se observa que para velocidades superficiales de aire entre 3.2 y 30.2 m/s se obtienen caídas de presión entre 33.5 a 2634 Pa/m. Al aumentar la velocidad superficial de agua entre 0.223 y 0.259 m/s (Figura 34) para la misma distribución de puntos en el intervalo de velocidades de aire se registraron caídas de presión entre 208 y 4240 Pa/m.

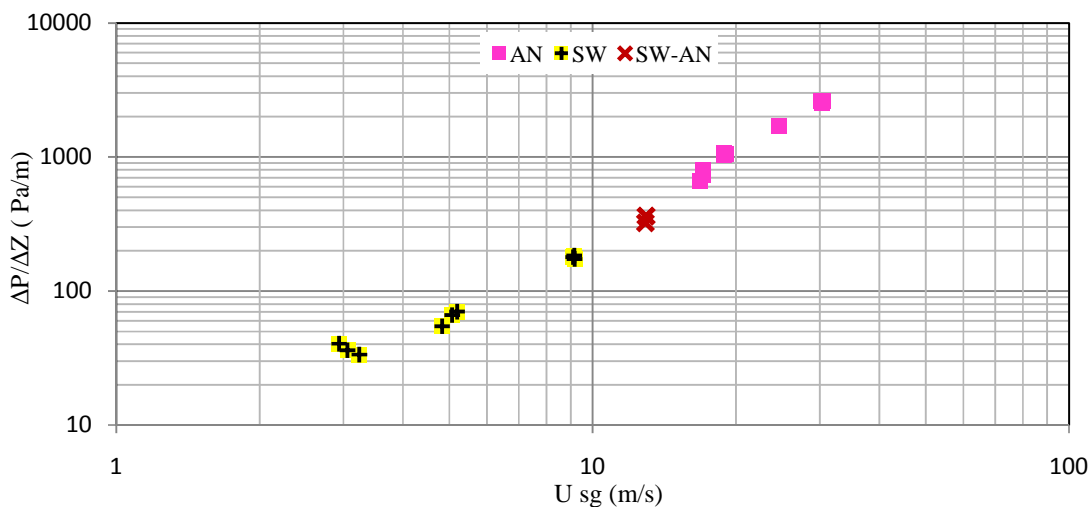


Figura 33 Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 0.082- 0.086 m/s.

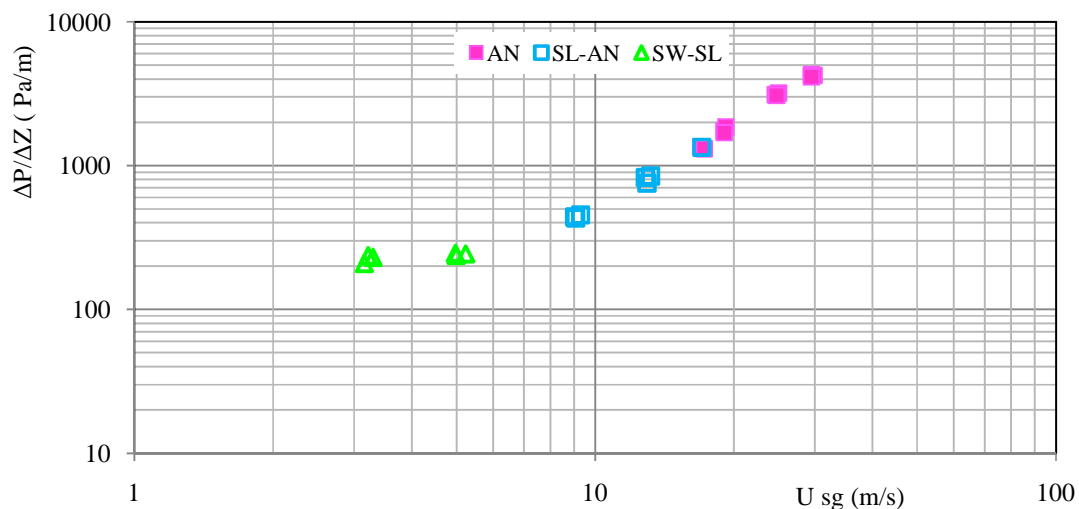


Figura 34. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 0.223- 0.259 m/s.

En la Figura 35, para una banda de velocidades superficiales de agua entre 0.330-0.352 m/s e intervalos de velocidades superficiales de aire entre 2.9-24.3 m/s, se obtienen caídas de presión por unidad de longitud entre 280-2642 Pa/m. Un aumento de la velocidad superficial de líquido entre 0.470-0.485 m/s, manteniendo la

velocidad de aire constante (Figura 36) representa un incremento en la caída de presión de un 50% aproximadamente (con respecto a la Figura 35).

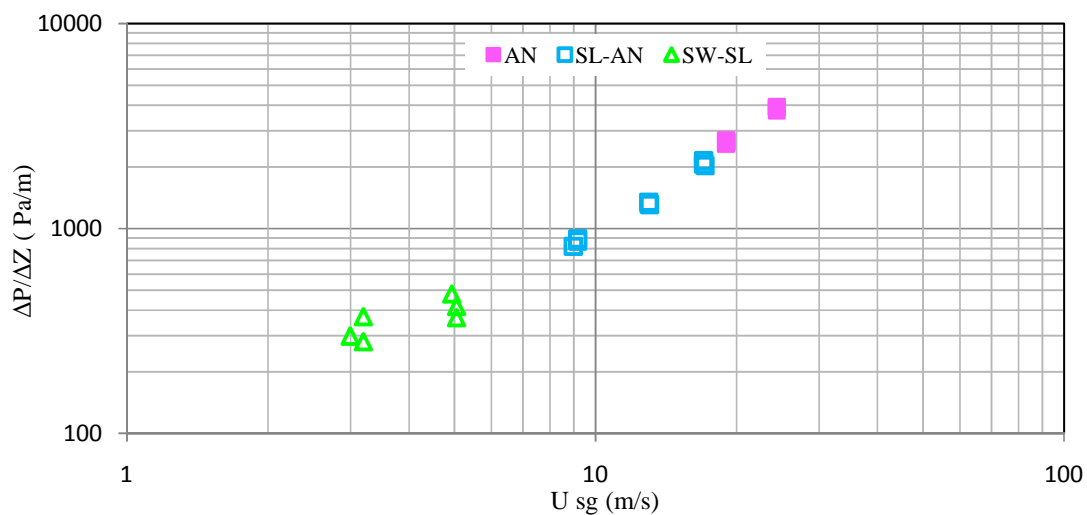


Figura 35. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 0.330- 0.352 m/s.

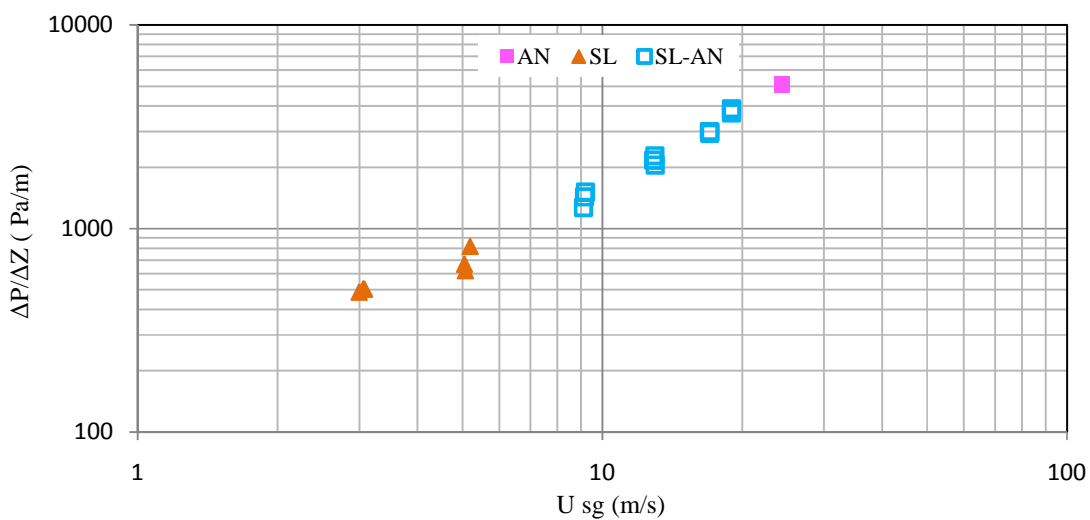


Figura 36. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 0.470- 0.485 m/s.

En la banda de velocidades superficiales de agua entre 0.673-0.685 m/s (Figura 37) se observa que, para velocidades superficiales de aire entre 3-23.1 m/s se

obtienen caídas de presión por unidad de longitud entre 837 y 6569 Pa/m. Al aumentar la velocidad superficial de agua a 0.959 m/s aproximadamente (Figura 38) y manteniendo constante el intervalo de velocidades de aire se registraron caídas de presión de casi el doble (con respecto a la Figura 37).

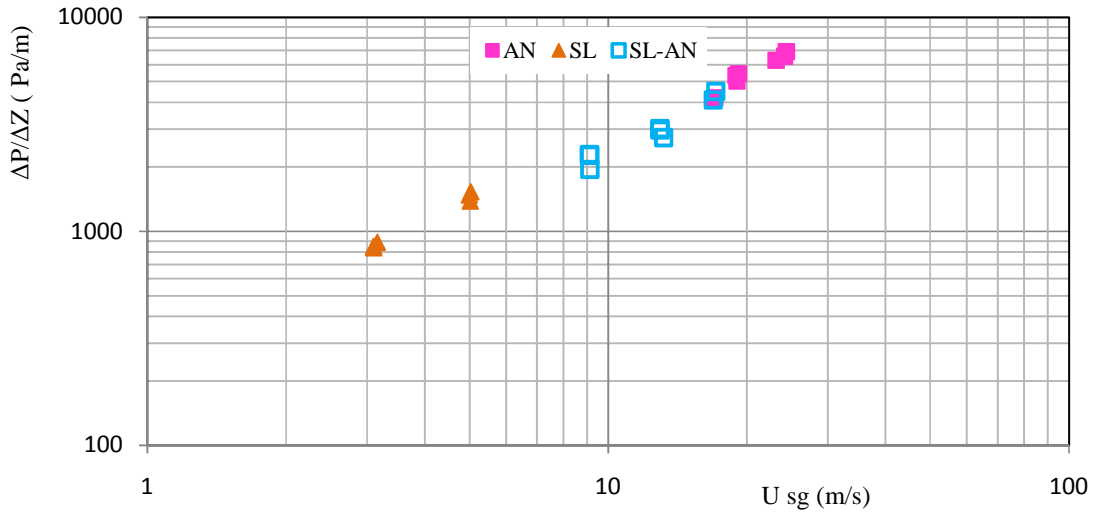


Figura 37. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 0.673- 0.685 m/s.

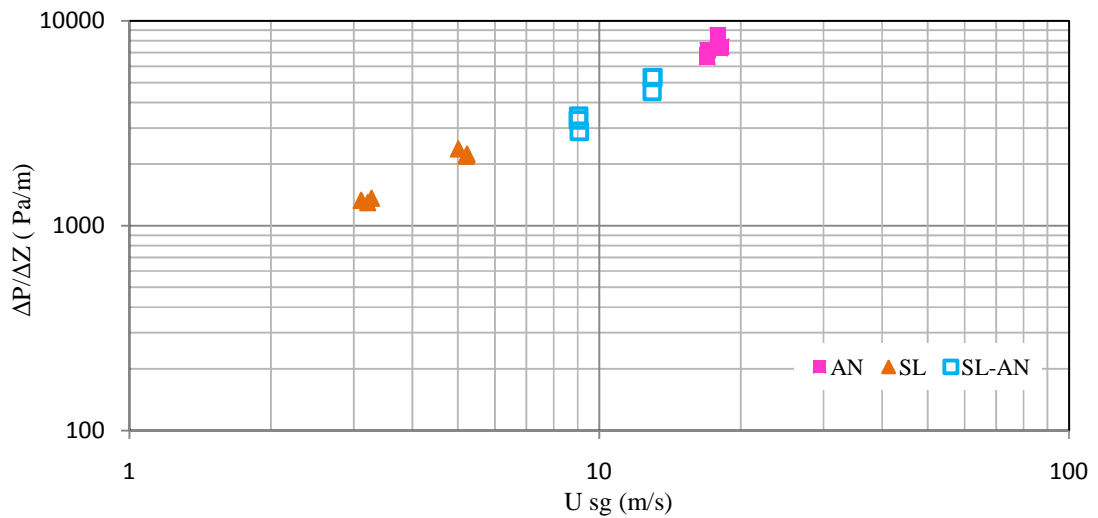


Figura 38. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 0.953- 0.965 m/s.

Para velocidades superficiales de agua entre 1.170 y 1.180 m/s (Figura 39) se observa que, velocidades superficiales de aire entre 3.1 y 16.8 m/s registran caídas de presión entre 1959 y 8632 Pa/m. Un incremento en un 15% aproximadamente de la velocidad superficial de agua (con respecto a la Figura 39), representa caídas de presión entre 2574 y 10158 Pa/m (Figura 40).

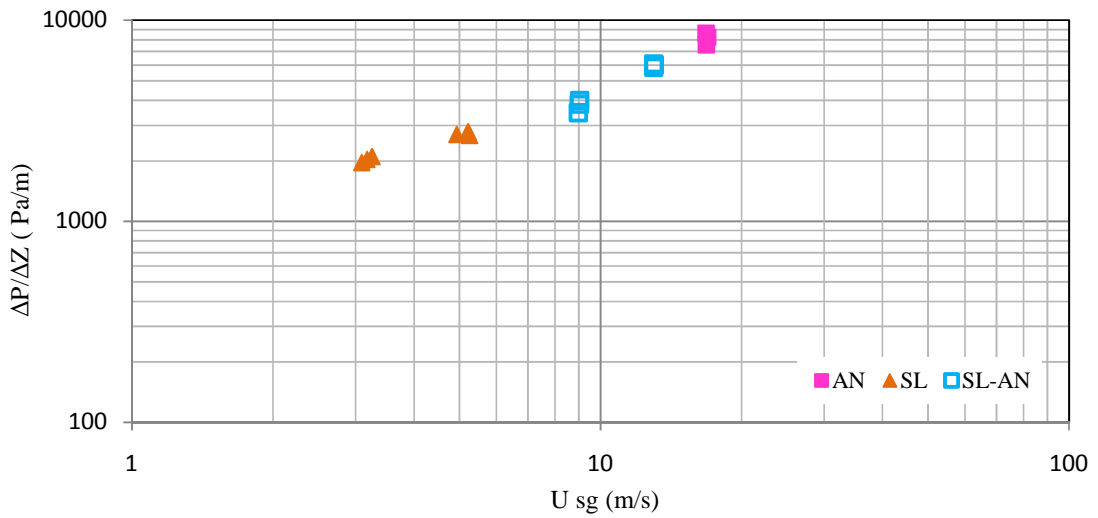


Figura 39. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 1.180- 1.170 m/s.

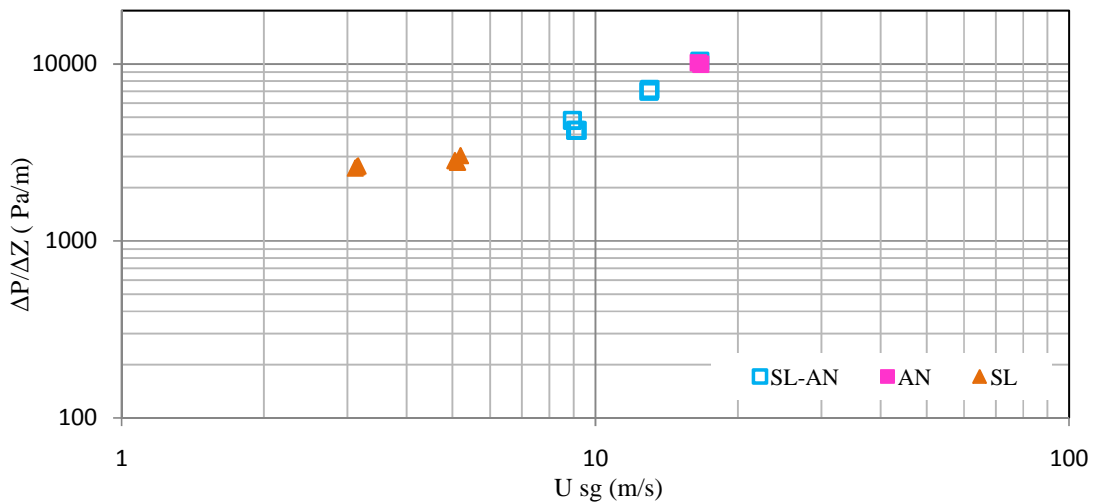


Figura 40. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 1.366- 1.353 m/s.

En un intervalo de velocidades superficiales de agua entre 1.502 y 1.522 m/s (Figura 41) se observa que, para velocidades de aire entre 3.1 y 14.7 m/s se obtienen caídas de presión entre 2957 y 10820 Pa/m. Un aumento en la velocidad superficial de agua a 2,006 m/s (Figura 42), manteniendo la misma velocidad de aire, propicia la formación de flujo burbuja dispersa y el incremento de la caída de presión en un 40% aproximadamente (con respecto a la Figura 41).

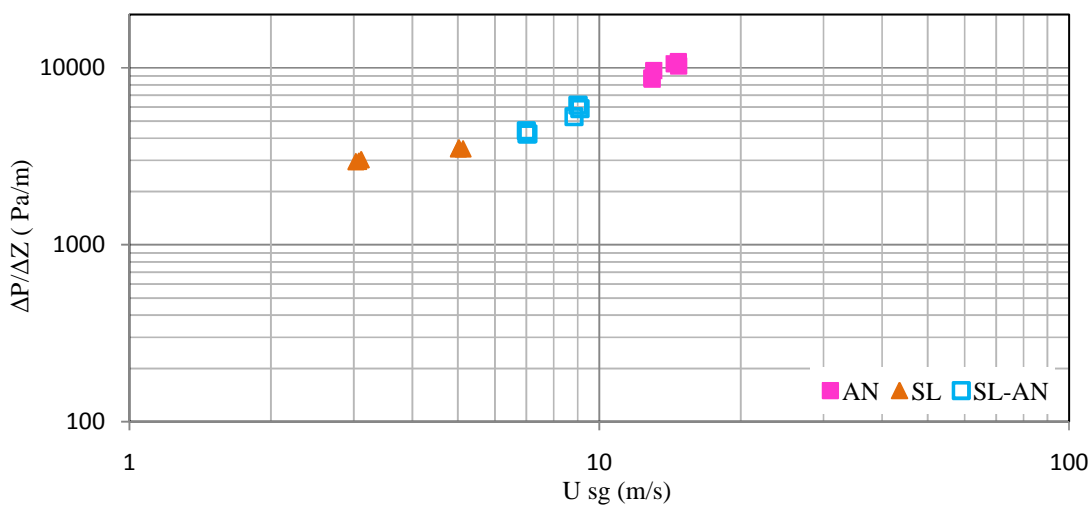


Figura 41. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 1.502- 1.522 m/s.

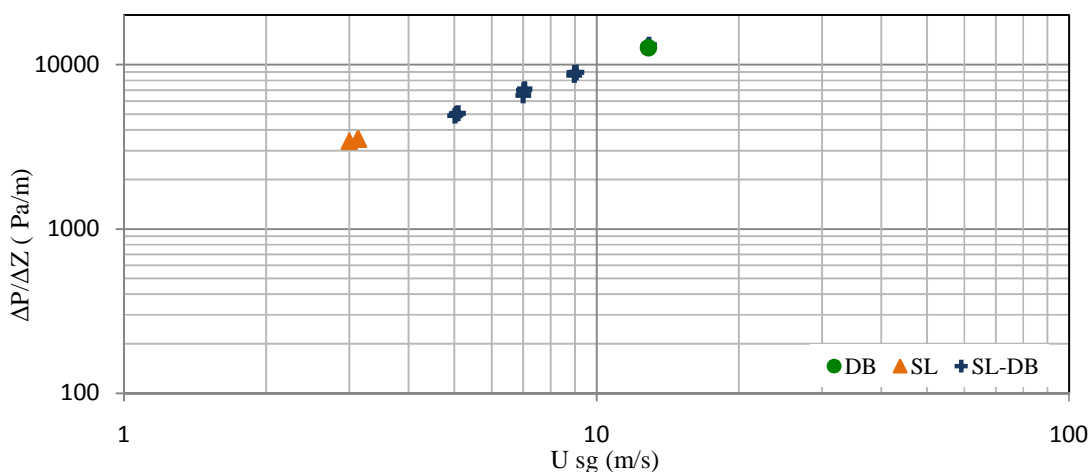


Figura 42. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para U_{sl} entre 2.006- 2.028 m/s.

En la Figura 43 se observa un punto de flujo burbuja dispersa con una caída de presión de 10944 Pa/m y varias transiciones a flujo tapón. A partir de una velocidad superficial de aire mayor a 5 m/s aproximadamente y con velocidades superficiales de agua entre 2.518 y 2.532 m/s, no se consiguen puntos de datos (Figura 44). La caída de presión en los puntos es ligeramente mayor en un 16 % con relación a los datos obtenidos en la Figura 43.

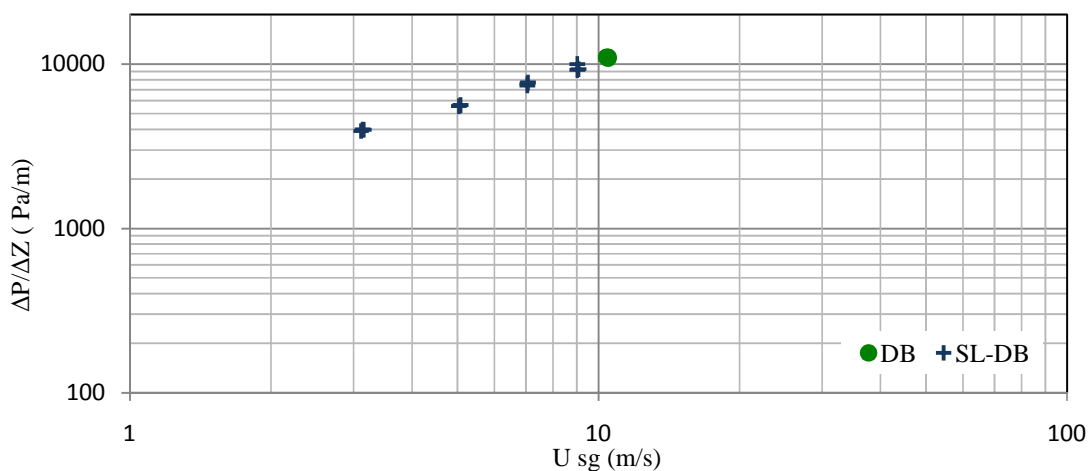


Figura 43. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para usl entre 2.199- 2.245 m/s.

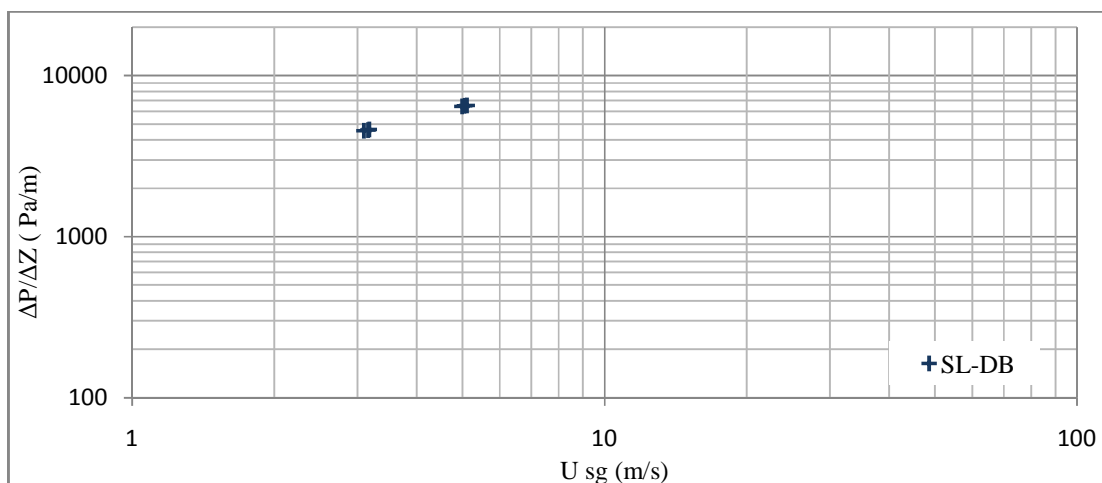


Figura 44. Datos de caída de presión experimental por unidad de longitud vs velocidad superficial de gas para Usl entre 2.518- 2.532 m/s.

En general, en el comportamiento de las Figuras 33-44, se observa que para bajas velocidades superficiales de agua y de aire respectivamente se propicia la estratificación del flujo, esto debido a la poca interferencia existente entre las fases al fluir por la tubería, así de esta manera la caída de presión por unidad de longitud registrada para estos puntos está en el orden de 36 y 178 Pa/m. El flujo anular es encontrado en puntos con velocidades superficiales de aire de 20.5 m/s en promedio y velocidades de agua entre 0.082 y 1.522 m/s. Estas velocidades de líquido representan un amplio intervalo con respecto a todos los datos obtenidos. El registro de mayor caída de presión está asociado a los puntos donde se observó flujo burbuja dispersa y su transición de flujo tapón.

Adicionalmente, en la Figura 45, la base de datos se presenta en un gráfico 3D, donde se aprecia de manera más ilustrativa el comportamiento de la caída de presión en función de las velocidades superficiales de agua y aire.

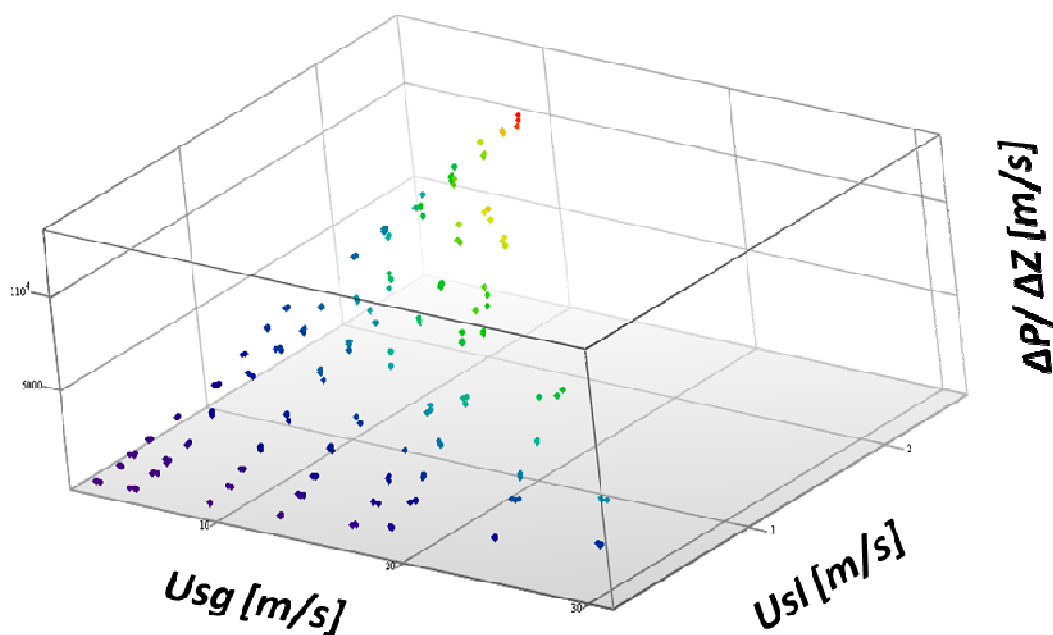


Figura 45. Visualizaciones en 3D de la base datos Experimental.

El comportamiento observado de caída de presión experimental refleja que, de manera general un incremento en la velocidad superficial de líquido, manteniendo la velocidad superficial de gas constante, genera un incremento en el caída de presión. Por otro lado, un aumento en la velocidad superficial de gas, manteniendo constante la velocidad superficial del agua, genera también un incremento en la caída de presión experimental pero menos significativo que en el caso anterior.

Debido a que la caída de presión registrada representa un promedio de 20 mediciones por cada experimento, un aspecto importante es destacar el comportamiento y la fluctuación de la caída de presión de acuerdo a cada patrón de flujo asociado. En este sentido, se determinó el porcentaje por exceso y por defecto de cada uno de estos valores con respecto al promedio para evaluar el comportamiento típico de cada patrón de flujo. En la Figura 46, se representa un experimento típico de flujo anular, tapón, estratificado y burbuja dispersa, donde se graficó el porcentaje de variación por exceso y por defecto con respecto a la caída de presión promedio vs. Número de mediciones realizadas.

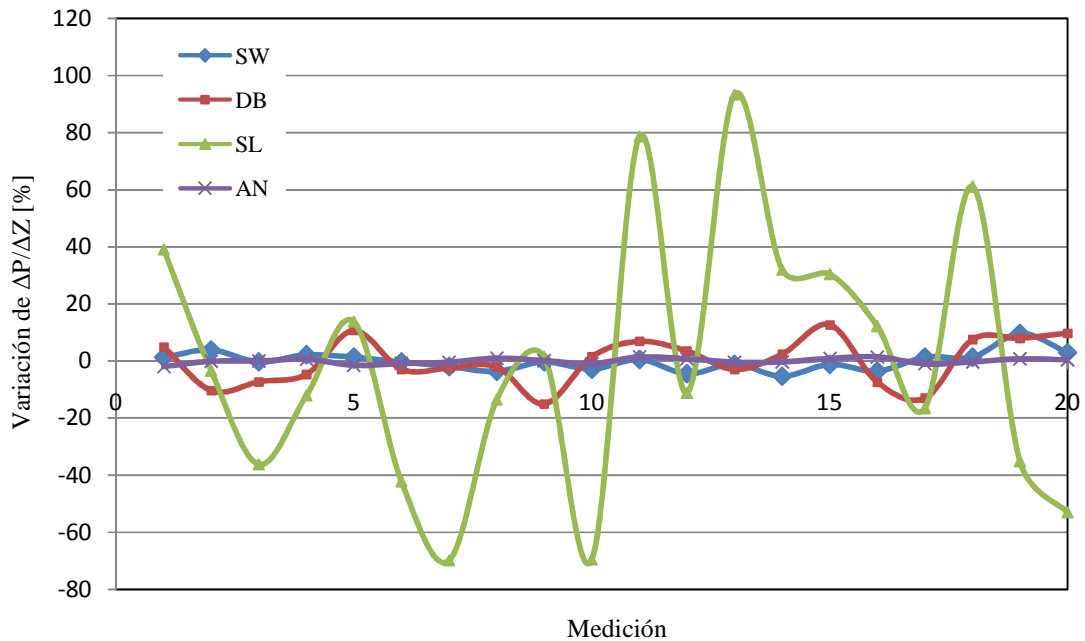


Figura 46. Porcentaje de variación con respecto al promedio de la caída de presión característica de cada patrón de flujo vs. Número de mediciones realizadas.

En la Figura 46, se muestra la naturaleza intermitente del flujo bifásico ya que existen picos y valles de presión cuyos órdenes de magnitud están asociados al comportamiento dinámico de cada patrón de flujo. Estos picos y valles de presión se interpretan como variaciones relativas de cada medición con respecto al valor promedio de caída de presión para un determinado patrón de flujo.

En la Figura 46, se aprecia que tanto el flujo anular como el estratificado son los patrones de flujo con menor fluctuación con respecto al flujo burbuja dispersa y tapón. Este último representa el patrón que posee la mayor variación con respecto al valor promedio representativo del experimento. En la Tabla 8, se cuantifican las condiciones de operación del flujo y los porcentajes máximos y mínimos respecto al promedio de un experimento característico de cada patrón de flujo.

Tabla 8. Porcentaje de variación con respecto al promedio de caída de presión para un patrón de flujo característico

Patrón	U_{sl} [m/s]	U_{sg} [m/s]	$\Delta P/\Delta Z$ [pa/m]	T [°C]	% Max Exceso	% Max Defecto
SW	0.083	9.17	173.8	29.1	9.68	5.28
SL	0.480	5.195	814.5	33	93.42	69.86
AN	0.083	30.456	2634	30.1	1.47	1.92
DB	2.207	10.489	10846	30.15	12.74	15.06

El flujo anular tiene la menor fluctuación de los puntos respecto del promedio con un 1.47% de variación máxima por exceso y un 1.92% por defecto. Seguidamente, en el flujo estratificado ondulado se obtuvo una variación máxima de 9.68% y 5.28% por exceso y defecto, respectivamente.; el flujo burbuja dispersa con un 12.74% por exceso y un 15.06% por defecto con respecto al promedio y finalmente el flujo tapón con una variación de hasta 93.42%.

La naturaleza turbulenta del flujo bifásico debido a la interacción de las fases en la tubería generan variaciones significativas en la medición de la caída de presión, en este sentido en flujo anular se evidencia la menor fluctuación de caída de presión con respecto al promedio, mientras que para flujo tapón se tiene el comportamiento donde existen las mayores variaciones de las mediciones respecto al promedio.

El flujo estratificado es propiciado por bajas velocidades superficiales de agua y aire respectivamente, donde la caída de presión obtenida por unidad de longitud es en promedio la menor en relación a los otros patrones de flujo, esto debido a la configuración geométrica de las fases dentro de la tubería y a que no existen perturbaciones importantes en la interfase, lo cual se traduce en pequeñas variaciones porcentuales de caída de presión por respecto al promedio.

En flujo anular las altas velocidades superficiales de aire generan una distribución de las fases donde un núcleo de aire fluye dentro de una película de líquido por las paredes de la tubería. Por lo anteriormente expuesto, se logró

evidenciar que debido a la estabilidad de este tipo de flujo, no existieron variaciones de caída presión mayor al 1.92% con respecto al promedio.

En flujo tapón se registró un porcentaje de caída de presión de hasta un 93.42% por exceso y 70% por defecto respecto al promedio. Este patrón representa la mayor fluctuación de caída de presión debido a la naturaleza intermitente del flujo.

El flujo burbuja dispersa en las condiciones de operación del banco experimental, ocurre a altas velocidades superficiales de agua y bajas velocidades superficiales de aire, donde la fluctuación de la caída de presión máxima con respecto al promedio se estimó en 15.06%, encontrándose este valor entre el obtenido para flujo estratificado y flujo tapón. Este resultado es contrario a lo esperado debido a la similitud de este patrón con el flujo monofásico, lo cual puede atribuirse a la presencia del efecto de transición en la banda de flujo tapón a burbuja dispersa.

4.4.2. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LOS MODELOS SELECCIONADOS.

A partir de los 213 puntos experimentales, se evalúa la precisión en el cálculo de caída de presión de las correlaciones y modelos seleccionados: Modelo homogéneo de Wallis (1969), Correlación de Lockhart y Martinelli (1949), Beggs y Brill (1973) y Dukler *et al.* (1964), Modelo mecanicista de Xiao *et al.* (1990) y Gómez *et al.* (2000) y las 4 correlaciones desarrolladas por García (2004). En la Tabla 9, se muestran las correlaciones y modelos seleccionados, así como sus acrónimos correspondientes.

La evaluación de la precisión de las correlaciones y modelos frente a los datos experimentales obtenidos se jerarquiza en base al error porcentual absoluto promedio E_2 . En la Tabla 10, también se incluyen los parámetros estadísticos E_1 , E_3 y E_4 , que corresponden al error porcentual promedio, la desviación estándar del error porcentual promedio y la desviación estándar del valor calculado menos el valor experimental dividido entre el valor experimental.

Tabla 9. Acrónimos de los modelos y correlaciones seleccionados.

Modelos y Correlaciones	Acrónimo
Lockhart y Martinelli (1949)	<i>LMC</i>
Dukler <i>et al.</i> (1964)	<i>DUC</i>
Wallis (1969)	<i>WHM</i>
Beggs y Brill (1973)	<i>BBC</i>
Xiao <i>et al.</i> (1990)	<i>XMM</i>
Gómez <i>et al.</i> (2000)	<i>GMM</i>
Correlación universal de factor de fricción	<i>FFUC</i>
Correlación de factor de fricción por patrón de flujo	<i>FFPC</i>
Correlaciones mejoradas de factor de fricción, por García (2004)	<i>FFIUC</i>
Correlaciones mejoradas de factor de fricción por patrón de flujo, por García (2004)	<i>FFIPC</i>

Tabla 10. Evaluación de la precisión de los modelos y correlaciones seleccionados contra la data experimental de 213 puntos obtenida en el banco de ensayos

Modelo o correlación	Parámetros estadísticos			
	E1 [%]	E2 [%]	E3 [%]	E4 [%]
<i>LMC</i>	5.68	17.85	35.79	36.24
<i>DUC</i>	-11.60	22.09	23.33	26.06
<i>WHM</i>	-6.48	22.88	31.37	32.03
<i>XMM</i>	6.41	26.54	56.97	57.33
<i>FFIPC</i>	-28.96	33.41	24.12	37.74
<i>GMM</i>	28.41	35.36	35.81	45.76
<i>FFIUC</i>	-35.27	39.45	25.51	43.59
<i>FFPC</i>	-37.52	40.98	21.54	43.34
<i>FFUC</i>	-43.78	47.48	24.45	50.24
<i>BBC</i>	58.46	58.46	46.10	74.56

La correlación de Lockhart y Martinelli (1949) obtuvo el mejor desempeño con un 17.85% en caída de presión; seguidamente se ubica la correlación de Dukler *et al.* (1964) con un error absoluto promedio de 22.09%, y en tercer lugar el modelo

homogéneo de Wallis (1969) con un 22.88%. En general, la correlación de Beggs y Brill (1973) es la que representa el máximo error absoluto promedio con un 58.46%.

Es notable destacar que entre las 7 correlaciones seleccionadas, Lockhart y Martinelli (1949) obtiene la mejor precisión y la de Beggs y Brill (1973) presenta la peor evaluación. También vale la pena destacar que más de la mitad de las correlaciones y modelos seleccionados presentaron errores promedio mayores al 30%.

El modelo homogéneo de Wallis (1969) tiene mejor precisión que los modelos mecanicistas de Xiao *et al.* (1990) y Gómez *et al.* (2000) con errores absolutos promedios de 22.88%, 26.54% y 35.36%, respectivamente. Considerando la tendencia de preferencia de los modelos mecanicistas para la predicción de caída de presión, los errores obtenidos por los modelos mecanicistas son relativamente elevados.

En la Figura 47 se muestra gráficamente la distribución de los 213 puntos obtenidos comparando la caída de presión por unidad de longitud calculada vs. Experimental.

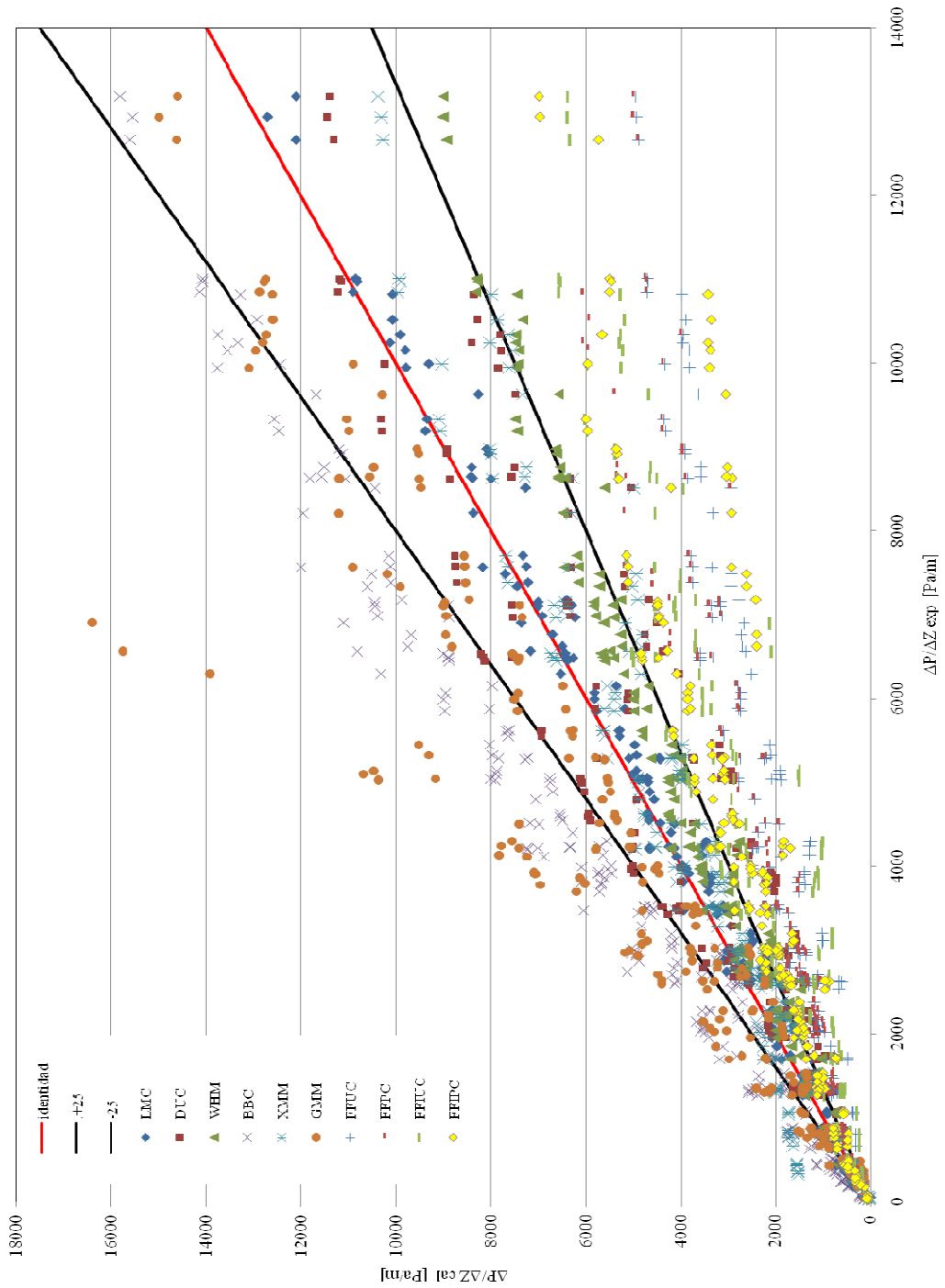


Figura 47. Comparación de la precisión de los modelos o correlaciones contra los 213 puntos de datos experimentales por patrón de flujo

SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

Las modificaciones realizadas a los sistemas de acople entre manguera-tubería y tubería-tubería permitieron garantizar la continuidad del flujo en el banco de ensayos al estar sometido a las condiciones máximas de operación. En este sentido se eliminaron las fugas y desprendimiento de las mangueras.

En cuanto al suministro de aire, la instalación del medidor de flujo volumétrico de gas en la tubería de 50.80 mm (2 pulgadas) de diámetro reemplazó el uso del porta placa orificio y los medidores diferenciales. En los ensayos experimentales de flujo bifásico se obtuvo que, de acuerdo a las capacidades del sistema de suministro de aire al circuito experimental, solo se pudo alcanzar el 30% aproximadamente de la capacidad máxima de medición de dicho equipo.

El medidor de presión diferencial instalado en el sistema de flujo volumétrico de líquido permitió llevar a cabo la calibración del conjunto de placas orificio para todo el intervalo de caudal de líquido obtenido tanto en flujo monofásico como en flujo bifásico.

Los datos obtenidos por los medidores de presión local instalados en el circuito no se utilizaron para determinar la caída de presión por fricción en la sección de prueba puesto dichos valores están por debajo del rango de apreciación del equipo.

El método de calibración dinámico es muy sensible a la pericia del observador, puesto que depende visualmente del nivel de líquido y el oleaje en el tanque para llevar a cabo el accionamiento y detención del cronómetro. El efecto del oleaje puede ser disminuido considerablemente colocando el nivel de referencia inicial cerca de un 40% de la altura del tanque aforado.

La nivelación de las tuberías mediante el nivel laser permitió establecer una correcta disposición horizontal del circuito experimental, de manera que el efecto de

la caída de presión por fricción fuese afectado en la menor medida posible debido al efecto de elevación de la tubería.

En cuanto al intervalo de operación del circuito en flujo monofásico líquido, se registraron velocidades de agua entre 0.079 y 3.324 m/s. Para el intervalo de operación en flujo bifásico se alcanzaron velocidades superficiales de agua entre 0.080 y 2.532 m/s y velocidades superficiales de aire entre 2.936 y 30.456 m/s. En este sentido, los intervalos máximos de velocidades de ambas fases cuando fluyen simultáneamente por la tubería disminuyen debido al incremento en la presión de operación en la tubería. De esta manera, las modificaciones realizadas permitieron incrementar el intervalo de operación del banco experimental.

La calibración en régimen monofásico líquido se llevó a cabo para evaluar la precisión de los instrumentos instalados en el banco de ensayos para la determinación de caída de presión. Evaluando las fuentes de incertidumbre asociadas al cálculo de caída de presión se determinó la rugosidad equivalente que debería tener la tubería para disminuir el error E_4 (desviación estándar de los residuales) mediante un proceso iterativo usando el *Método de Optimización No Lineal* de Microsoft® Excel. De los resultados obtenidos, se puede inferir que existe un envejecimiento de la tubería, el cual puede estar vinculado a un proceso de erosión como consecuencia del transporte de partículas en el aire. Adicionalmente, la interacción de las fases puede promover el desgaste de la tubería.

El protocolo experimental para la obtención de los datos se basó en constituir una matriz de velocidades superficiales de agua y aire de acuerdo a las capacidades máximas y mínimas de los equipos de medición. Dicha matriz se recorrió mediante líneas de velocidad superficial de líquido constante e incrementando progresivamente la velocidad superficial del aire.

Se realizaron y procesaron 213 datos de caída de presión de flujo bifásico de aire y agua para flujo horizontal, de los cuales se realizó el mapa de patrones de flujo asociado y se observaron 55 de flujo anular, 39 de flujo tapón, 9 de flujo estratificado

y 4 de flujo burbuja dispersa. Se observó que un incremento de la velocidad superficial de líquido genera un aumento en el gradiente de presión más significativo que el obtenido al aumentar la velocidad superficial de gas.

La naturaleza fluctuante de algunos patrones de flujo bifásico genera variaciones significativas en la medición de caída de presión, por ello es necesario reportar un valor promedio de dicho parámetro. Este promedio está en base a un número determinado de mediciones, las cuales permiten garantizar que la caída de presión de un experimento es independiente del número de mediciones realizadas. El flujo tapón representa la mayor fluctuación de caída de presión debido su naturaleza intermitente. Para el flujo burbuja dispersa la fluctuación de la caída de presión con respecto al promedio se estimó en 12.74%, el cual es elevado con respecto a lo esperado considerando su similitud con el flujo monofásico, esto puede atribuirse a la banda de transición de flujo tapón a burbuja dispersa a pesar de que visualmente se observó dicho patrón.

La base de datos experimental obtenida se procesó a fin de ejecutar los algoritmos programados de los modelos y correlaciones seleccionadas, donde se determinó que, la correlación de Lockhart y Martinelli (1949) obtuvo el mejor desempeño con un error absoluto promedio de 17,85% en caída de presión y la correlación de Beggs y Brill (1973) obtuvo el peor desempeño con un 58.46% de precisión frente a los datos experimentales. El modelo homogéneo de Wallis (1969) presentó mejor desempeño en cuanto a la determinación de la caída de presión por unidad de longitud con respecto a los modelos mecanicistas de Xiao *et al* (1990) y Gómez *et al* (2000).

RECOMENDACIONES

Utilizar medidores de presión local con mayor precisión para el rango de operación establecido en las pruebas experimentales, y así obtener mediciones confiables pudiendo comparar con los registros obtenidos por el medidor de presión diferencial instalado en el circuito experimental. De igual manera, es recomendable emplear un medidor de presión diferencial con menor rango de operación al instalado en el circuito, de manera que se puedan obtener registros de gradiente de presión para patrones de flujo estratificado, el cual se desarrolla con velocidades superficiales de líquido bajas.

En vista de la gran cantidad de puntos de transición obtenidos en la realización de las pruebas experimentales (106 datos), los cuales ocupan zonas importantes en la matriz experimental obtenida, es recomendable hacer un estudio minucioso acerca de las transiciones entre los patrones de flujo, tomando en cuenta que cada patrón observado es subjetivo al investigador y que una comprensión de su comportamiento conduce a generar criterios de transición más confiables. Adquiriendo un sistema de adquisición de datos se puede registrar la caída de presión y a su vez determinar el patrón de flujo asociado con mejor precisión.

Por aspectos de seguridad y mantenimiento es recomendable cercar el perímetro del banco de ensayos, colocando una reja con una puerta de acceso en la zona de entrada, para así poder dejar los equipos de medición permanentemente instalados, sin que corran peligro de ser dañados.

Diseñar un espacio físico para que los usuarios protejan su integridad física en caso que ocurra un accidente como desprendimiento de mangueras, ruptura de tuberías o colapso del sistema en general.

Seguir con el estudio de este trabajo, para grandes inclinaciones hasta llegar a la posición vertical.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ansari, A., Sylvester, N., Sarica, C., Shoham, O., Brill, J., 1994. A comprehensive mechanistic model for upward two-phase flow in wellbores. *SPE Production & Facilities J.*, 142-152
- ASME b16.5 a, 1998. Pipe Flanges and Flanged Fittings NPS ½ Through NPS 24.
- Avallone, E., Baumeister, T., 1999. Manual del Ingeniero Mecánico (2). Mexico: Mc Graw-Hill.
- Barnea, D., 1987. A unified model for predicting flow pattern transitions in the whole range of pipe inclination. *Int. J. Multiphase Flow* 13(1), 1-12
- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y., 1980. Flow pattern characterization in two-phase flow by electrical conductance probe. *Int. J. Multiphase Flow* 6, 387-397.
- Baxendell, P. B., Thomas, R., 1961. The Calculation of Pressure Gradients in High-rate Flowing Wells. *Journal of Pet. Tech.*, (1)1023-1028
- Beattie, D., Whalley, P.D., 1982. A simple two-phase frictional pressure drop calculation method. *Int. J. Multiphase Flow* 8(1), 83-87
- Beggs, H., Brill, J., 1973. A study of two-phase flow in inclined pipes. *J. Pet. Tech.* 25(5), 607-617.
- Cengel, Y., Boles, M. 2003. Termodinámica. Mexico: Mc Graw Hill.
- Chen, I., Yang, K., Wang, C., 2002. An empirical correlation for two-phase frictional performance in small diameter tubes. *Int. J. Heat Mass Transfer* 45(17), 3667-3671
- Chen, J., Spedding, P, 1981. An extensión of the Lockhart Martinelli theory of two-phase pressure drop and holdup. *Int. J. Multiphase Flow* 7 (6), 659-675

- Cicchitti, A, Lombardi, C., Silvestri, M., Soldaini, G., Zavattareui, R., 1960. Two-phase cooling experiments: pressure drop, heat transfer and burn out measurements. *Energ. Nucl.* 7(6), 407-425
- Cravino, A., Pérez, Al., 2007. *Evaluación de Modelos Homogéneos de Correlación y Mecanicistas en la Predicción de la Caída de Presión de Flujo Bifásico de Gas y de Líquido en Tuberías Verticales.*, UCV, Caracas
- Dukler, A.E., Wicks III, M., Cleveland, R., 1964. Frictional pressure drop in two-phase flow: B. An approach through similarity analysis. 10 (1), 44-51
- Eaton, B., Andrews, D., Knowles, C., Silberberg, I., Brown, K., 1967. The prediction of flow patterns, liquid holdup and pressure losses occurring during continuous two-phase flow in horizontal pipelines. *Trans. AIME*, 815
- Fenyés de Kunckel, H., Angel, M., Juzga, J., Walker, W. (1990) Laboratorio introductorio de física. Caracas: Editorial Innovación Tecnológica
- García, F., 2004. Factor de Fricción para Flujo Bifásico de Gas y Líquido en Tuberías Horizontales para Régimen Laminar y Turbulento. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de Venezuela.
- García, F., García, R., Padrino, J. C., Mata, C., Trallero, J., Joseph, D., 2003. Power law and composite power law friction factor correlations for laminar and turbulent gas-liquid flow in horizontal pipelines. *Int. Journal Multiphase Flow* 29(10), 1605-1624
- Gómez, Y. 2005. *Diseño de un Banco de Ensayos para el Estudio de Flujo Bifásico Isotérmico de Gas y de Líquido en Tuberías.* Ing. Mecánico, UCV, Caracas
- Haoulo, M, 2007. *Estudio Experimental de Patrones de Flujo Bifásico Gas-Líquido en Tuberías Horizontales y ligeramente Inclinadas.* Trabajo de Grado, M.

- Sc. Ing. Mecánica, Tutor: García, F., Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UCV
- Hart, J., Hamersma, P., Fortuin, J., 1989. Correlations predicting frictional pressure drop and liquid holdup during horizontal gas-liquid pipe flow with a small liquid holdup. *Int. J. Multiphase Flow* 15(6), 947-964
- Hoogendoorn, C., 1959. Gas-liquid flow in horizontal pipes. *Chem. Eng. Sci.* 9(1), 205-217
- ISO 5167-1:2003 (E). Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full- General principles and requirements
- ISO 5167-2:2003 (E). Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full- Orifice plates
- ISO 8316:1987 (E). Measurement of liquid flow in closed conduits-Method by collection of the liquid in a volumetric tank.
- Kadambi, V., 1981. Void Fraction and Pressure Drop in Two-phase Stratified Flow,
- Lockhart, R., Martinelli, R., 1949. Proposed correlation of data for isothermal two-phase two component flow in pipes. *Chem. Eng. Prog.* 45(1), 39-48
- Müller-Steinhagen, H., Heck, K., 1986. A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes. *Chem. Eng. Process.* 20, 297-308
- Oliemans, R., 1976. Two phase flow in gas-transmission pipelines. *ASME paper* 76-Pet-25, presented at Pet. Div. ASME meeting, Mexico
- Ouyang, L., 1998. *Single phase and multiphase fluid flow in horizontal wells*. Ph.D. Dissertation Thesis. Department of Petroleum Engineering. School of Earth Sciences. Stanford University. Stanford, CA., 248

- Poettman, F. H., Carpenter, P. G., 1952. The Multiphase Flow of Gas, Oil and Water Through Vertical Flow Strings with Application to the Design of Gas-Lift Installations, *Drilling and Production Practice API*, 257-317
- Reid, R., Reynolds, A., Diglio, A., Spiewak, I., Klipstein, D., 1957. Two-phase pressure drops in large-diameter pipes. *AIChE J.* 3(3), 321-324
- Ros, N., 1961. Simultaneous flow of gas and liquid as encountered in well tubing. *J. Pet. Technology*, 1037-1049
- Shoham, O., 2001. *Two-phase flow modeling*. The University of Tulsa. Department of Petroleum Engineering, June 2001
- Streeter, V., 1972. *Mecánica de fluidos*. Madrid: Mc Graw-Hill
- Taitel, Y., 1994. Advances in two phase flow modeling. In *The University of Tulsa Centennial Petroleum Engineering Symposium*, Tulsa, Oklahoma, University of Tulsa, 20. SPE 27959
- Taitel, Y., Barnea, D., Dukler, A., 1980. Modeling flow pattern transition for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. *AIChE J.* 26(3), 345-354
- Toro, T., Suárez, L., 2007. *Estudio Experimental de Patrones de Flujo Bifásico Aire – Agua en Tuberías Horizontales e Inclinadas*, Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela
- Tovar, K., Ibarra, R., 2006. *Rediseño y construcción de un banco de ensayos para el estudio de flujo de gas y/o de líquido en tuberías.*, UCV, Caracas.
- Mikaty, M., Padrón, M., Figuera, L., Instructivo para la presentación de Trabajos de Pregrado, Postgrado, Doctorado y Trabajos de Ascenso, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Comisión de Bibliotecas. Caracas, 2005.
- Wallis, G., 1969. *One dimensional two-phase flow.*, New York city, New York, EUA, McGraw-Hill.

Xiao, J., Shoham, O., Brill, J., 1990. A comprehensive mechanistic model for two-phase flow in pipelines. En The 65th SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA. *Paper SPE 20631*. 167-180. September 23-26.

APÉNDICES

Apéndice A.

Determinación de los errores e incertidumbres de las mediciones de flujo volumétrico de líquido

Mediciones Directas:

Una vez determinadas las variables de medición directa, como lo son: el perímetro y espesor de los tanques, el perímetro de la manguera de suministro, los tiempos de llenado para un ΔH_{agua} y el ΔP en el medidor de presión diferencial, es necesario indicar la incertidumbre o error que acompaña dichos valores numéricos, el cual está relacionado con la dispersión de las diferentes medidas alrededor del valor medio calculado.

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

El error máximo corresponde a la semiamplitud de la distribución, y se calcula como el promedio de la diferencia entre el mayor y el menor valor obtenido. Este tipo de error se utilizó para estimar la incertidumbre asociada a la repetitividad de cada conjunto de puntos obtenidos en la calibración, tanto para el tiempo de llenado como para la caída de presión en el medidor de presión diferencial.

$$\Delta X_{Max} = \frac{\Delta X_{Max} - \Delta X_{Min}}{2} \quad (18)$$

La desviación promedio es el promedio de las diferencias de cada una de las mediciones con respecto al valor medio obtenido. Esta indicación de la incertidumbre

se puede utilizar cuando el número de mediciones no es muy grande, ya que al haber relativamente pocas mediciones el error calculado por métodos estadísticos no es confiable.

$$\overline{\Delta X} = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{X} - X_i|}{n} \quad (19)$$

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

$$X = \bar{x} \pm \overline{\Delta x} \quad \text{cuando} \quad \overline{\Delta x} > \Delta x_{apr} \quad (20)$$

$$X = \bar{x} \pm \Delta x_{apr} \quad \text{cuando} \quad \overline{\Delta x} < \Delta x_{apr} \quad (21)$$

Este tipo de error se utilizó para la determinación de las incertidumbres de los perímetros de los tanques, en los cuales se realizaron alrededor de 10 mediciones.

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

$$e_{\bar{\sigma}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (22)$$

Donde:

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

$n =$ número de mediciones realizadas.

El error estándar del promedio es la indicación más generalmente aceptada de la incertidumbre de una serie de mediciones, siempre que el valor de n sea al menos 10 medidas como mínimo, aunque para que los resultados estadísticos se puedan

aplicar con mayor confianza, el número de medidas debe ser del orden de $n=100$. Así, el resultado final de la medición se indica como el valor promedio, más o menos el error estándar:

$$X = \bar{x} \pm \bar{e}_{\bar{x}} \quad (23)$$

Este tipo de error se utilizó para reportar las incertidumbres totales correspondientes al tiempo de llenado y a la caída de presión en el medidor de presión diferencial.

En la Tabla A. 5 se muestra el resumen de las incertidumbres relacionadas con las mediciones directas, las cuales son el punto de partida para la determinación de la incertidumbre asociada al caudal de líquido.

Mediciones indirectas:

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

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

$$\Delta Y = \frac{d f(x)}{dx} \Delta X \quad (24)$$

Donde:

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

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

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

$$\Delta Z = \left| \frac{d f(x)}{dx} \right| |\Delta X| + \left| \frac{d f(y)}{dy} \right| |\Delta X| + \left| \frac{d f(z)}{dz} \right| |\Delta X| \quad (25)$$

$\Delta Z =$ Incertidumbre de la medición indirecta

En este sentido la determinación de la incertidumbre asociada al volumen y caudal se llevó a cabo según las siguientes relaciones:

$$\Delta V = H \Delta A + A \Delta H \quad (26)$$

Donde:

$\Delta V =$ Incertidumbre del volumen de agua

$H =$ Altura de nivel del Agua

$A =$ Área neta del tanque de calibración

$$\Delta Q = \frac{\Delta V}{t} + \frac{V}{t^2} \Delta t \quad (27)$$

Donde:

$\Delta Q =$ Incertidumbre del caudal de agua

$V =$ Volumen de Agua

$t =$ tiempo de llenado

En la Tabla A. 6 se presenta un resumen con las incertidumbres asociadas a las mediciones indirectas.

Calibración de las placas orificio.

La calibración del set de placas orificio se muestra en el Capítulo III. La placa orificio de ½” se calibró dividiendo el rango de caudales registrados en 2 secciones (A y B).

Tabla A. 1 % de error para la placa de ½”(B).

Placa de 1/2" (B)												
	Tiempo	Incertidumbre de Tiempo	Volumen de agua	Incertidumbre de Volumen	Caudal	Incertidumbre de Caudal [Ec. 27]	Incertidumbre de Caudal	ΔP		ΔH	Caudal numérico	Error relativo (φ)
	[s]	[s]	[m ³]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[KPa]	[%]	[m]	[m ³ /s]	[%]
1	58.40	0.01	0.0050	0.0002	0.000086	0.000004	4	0.70	0.28	0.05	0.00009	-6.81
2	54.49	0.01	0.0050	0.0002	0.000092	0.000004	4	0.68	0.27	0.05	0.00009	2.25
3	58.63	0.01	0.0050	0.0002	0.000085	0.000004	4	0.65	0.26	0.05	0.00009	-3.06
4	57.35	0.01	0.0050	0.0002	0.000087	0.000004	4	0.65	0.26	0.05	0.00009	-0.82
5	32.27	0.01	0.0050	0.0002	0.00016	0.00001	4	1.78	0.71	0.05	0.00015	2.81
6	33.90	0.01	0.0050	0.0002	0.00015	0.00001	4	1.73	0.69	0.05	0.00015	-0.55
7	33.21	0.01	0.0050	0.0002	0.00015	0.00001	4	1.70	0.68	0.05	0.00015	2.26
8	33.32	0.01	0.0050	0.0002	0.00015	0.00001	4	1.73	0.69	0.05	0.00015	1.17
9	43.58	0.01	0.0100	0.0002	0.00023	0.00000	2	3.75	1.5	0.1	0.00023	1.98
10	43.86	0.01	0.0100	0.0002	0.00023	0.00000	2	3.73	1.49	0.1	0.00022	1.71
11	44.12	0.01	0.0100	0.0002	0.00023	0.00000	2	3.73	1.49	0.1	0.00022	1.12
12	37.70	0.01	0.0100	0.0002	0.00027	0.00001	2	4.80	1.92	0.1	0.00026	3.22
13	39.03	0.01	0.0100	0.0002	0.00026	0.00001	2	4.60	1.84	0.1	0.00025	2.05
14	38.92	0.01	0.0100	0.0002	0.00026	0.00001	2	4.50	1.8	0.1	0.00025	3.48
15	32.63	0.01	0.0100	0.0002	0.00031	0.00001	2	6.65	2.66	0.1	0.00031	0.24
16	32.98	0.01	0.0100	0.0002	0.00030	0.00001	2	6.38	2.55	0.1	0.00030	1.42
17	33.05	0.01	0.0100	0.0002	0.00030	0.00001	2	6.10	2.44	0.1	0.00029	3.51
18	29.28	0.01	0.0100	0.0002	0.00034	0.00001	2	8.13	3.25	0.1	0.00034	0.33
19	30.07	0.01	0.0100	0.0002	0.00033	0.00001	2	8.05	3.22	0.1	0.00034	-1.87
20	29.57	0.01	0.0100	0.0002	0.00034	0.00001	2	7.98	3.19	0.1	0.00034	0.34
21	28.12	0.01	0.0100	0.0002	0.00036	0.00001	2	9.13	3.65	0.1	0.00036	-1.86
22	28.28	0.01	0.0100	0.0002	0.00035	0.00001	2	9.00	3.6	0.1	0.00036	-1.71
23	27.79	0.01	0.0100	0.0002	0.00036	0.00001	2	8.90	3.56	0.1	0.00036	0.65
24	24.48	0.01	0.0100	0.0002	0.00041	0.00001	2	11.28	4.51	0.1	0.00041	0.65
25	25.40	0.01	0.0100	0.0002	0.00039	0.00001	2	11.18	4.47	0.1	0.00040	-2.59
26	25.54	0.01	0.0100	0.0002	0.00039	0.00001	2	11.15	4.46	0.1	0.00040	-3.01
27	23.17	0.01	0.0100	0.0002	0.00043	0.00001	2	13.33	5.33	0.1	0.00044	-2.82
28	22.95	0.01	0.0100	0.0002	0.00044	0.00001	2	13.15	5.26	0.1	0.00044	-1.15
29	23.40	0.01	0.0100	0.0002	0.00043	0.00001	2	13.03	5.21	0.1	0.00044	-2.58

Promedio % error [E1]
Promedio % error absoluto [E2]
Minimo % error [φ]
Maximo % error [φ]
E3
E4

3
3
2
4

0.01
2.00
0.24
6.81
2.45
2.45

Tabla A. 2 Datos de Calibración para la placa de 1/2”(A).(Continuación)

Placa de 1/2" (A)												
	Tiempo	Incertidumbre de Tiempo	Volumen de agua	Incertidumbre de Volumen	Caudal	Incertidumbre de Caudal [Ec. 27]	Incertidumbre de Caudal	ΔP		ΔH	Caudal numérico	Error relativo (φ)
	[s]	[s]	[m ³]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[KPa]	[%]	[m]	[m ³ /s]	[%]
51	22.05	0.01	0.0234	0.0006	0.00106	0.00003	2	93.95	37.58	0.1	0.00106	0.17
52	22.63	0.01	0.0234	0.0006	0.00104	0.00003	2	96.33	38.53	0.1	0.00107	-3.75
53	21.89	0.01	0.0234	0.0006	0.00107	0.00003	2	98.05	39.22	0.1	0.00108	-1.25
54	21.54	0.01	0.0234	0.0006	0.00109	0.00003	2	99.88	39.95	0.1	0.00109	-0.56
55	20.28	0.01	0.0234	0.0006	0.00116	0.00003	2	111.93	44.77	0.1	0.00116	-0.23
56	20.26	0.01	0.0234	0.0006	0.00116	0.00003	2	112.24	44.90	0.1	0.00116	-0.27
57	20.09	0.01	0.0234	0.0006	0.00117	0.00003	2	112.38	44.95	0.1	0.00116	0.53
58	20.32	0.01	0.0234	0.0006	0.00115	0.00003	2	112.71	45.09	0.1	0.00116	-0.78
59	19.86	0.01	0.0234	0.0006	0.00118	0.00003	2	112.79	45.12	0.1	0.00116	1.49
60	20.05	0.01	0.0234	0.0006	0.00117	0.00003	2	116.75	46.7	0.1	0.00118	-1.21
61	20.28	0.01	0.0234	0.0006	0.00116	0.00003	2	118.81	47.525	0.1	0.00119	-3.28
62	19.64	0.01	0.0234	0.0006	0.00119	0.00003	2	120.78	48.31	0.1	0.00120	-0.84
63	19.43	0.01	0.0234	0.0006	0.00121	0.00003	2	122.80	49.12	0.1	0.00121	-0.60
64	19.25	0.01	0.0234	0.0006	0.00122	0.00003	2	124.59	49.835	0.1	0.00122	-0.39
65	18.97	0.01	0.0234	0.0006	0.00124	0.00003	2	124.73	49.89	0.1	0.00122	1.04
66	19.15	0.01	0.0234	0.0006	0.00122	0.00003	2	125.40	50.16	0.1	0.00123	-0.19
67	19.00	0.01	0.0234	0.0006	0.00123	0.00003	2	126.51	50.61	0.1	0.00123	0.15
68	18.86	0.01	0.0234	0.0006	0.00124	0.00003	2	127.40	50.96	0.1	0.00124	0.54
69	18.04	0.01	0.0234	0.0006	0.00130	0.00003	2	144.00	57.6	0.1	0.00131	-1.16
70	18.1	0.01	0.0234	0.0006	0.00129	0.00003	2	146.90	58.76	0.1	0.00133	-2.51
71	17.27	0.01	0.0234	0.0006	0.00136	0.00003	2	148.46	59.39	0.1	0.00133	1.67
72	17.63	0.01	0.0234	0.0006	0.00133	0.00003	2	148.58	59.43	0.1	0.00133	-0.41
73	17.39	0.01	0.0234	0.0006	0.00135	0.00003	2	148.75	59.50	0.1	0.00134	0.92
74	17.43	0.01	0.0234	0.0006	0.00134	0.00003	2	148.96	59.59	0.1	0.00134	0.62
75	17.43	0.01	0.0234	0.0006	0.00134	0.00003	2	148.99	59.60	0.1	0.00134	0.58
76	17.9	0.01	0.0234	0.0006	0.00131	0.00003	2	149.28	59.71	0.1	0.00134	-2.20
77	17.76	0.01	0.0234	0.0006	0.00132	0.00003	2	152.28	60.91	0.1	0.00135	-2.41
78	17.34	0.01	0.0234	0.0006	0.00135	0.00003	2	154.63	61.85	0.1	0.00136	-0.76
79	17.19	0.01	0.0234	0.0006	0.00136	0.00003	2	161.20	64.48	0.1	0.00139	-2.00
80	16.94	0.01	0.0234	0.0006	0.00138	0.00003	2	162.06	64.83	0.1	0.00139	-0.75
81	16.49	0.01	0.0234	0.0006	0.00142	0.00003	2	162.15	64.86	0.1	0.00139	1.90
82	16.61	0.01	0.0234	0.0006	0.00141	0.00003	2	162.38	64.95	0.1	0.00140	1.12
83	17.13	0.01	0.0234	0.0006	0.00137	0.00003	2	163.54	65.42	0.1	0.00140	-2.38
84	16.30	0.01	0.0234	0.0006	0.00144	0.00004	2	168.54	67.42	0.1	0.00142	1.10
85	15.97	0.01	0.0234	0.0006	0.00147	0.00004	2	172.41	68.97	0.1	0.00144	2.03
86	16.14	0.01	0.0234	0.0006	0.00145	0.00004	2	173.30	69.32	0.1	0.00144	0.73
87	16.08	0.01	0.0234	0.0006	0.00146	0.00004	2	174.31	69.73	0.1	0.00145	0.78
88	16.33	0.01	0.0234	0.0006	0.00144	0.00004	2	176.26	70.51	0.1	0.00145	-1.30
89	15.54	0.01	0.0234	0.0006	0.00151	0.00004	2	183.76	73.51	0.1	0.00148	1.54
90	15.79	0.01	0.0234	0.0006	0.00148	0.00004	2	186.90	74.76	0.1	0.00150	-0.90
91	15.66	0.01	0.0234	0.0006	0.00150	0.00004	2	187.53	75.01	0.1	0.00150	-0.20
92	15.43	0.01	0.0234	0.0006	0.00152	0.00004	2	188.15	75.26	0.1	0.00150	1.07
93	15.89	0.01	0.0234	0.0006	0.00147	0.00004	2	188.19	75.28	0.1	0.00150	-1.88
94	14.59	0.01	0.0234	0.0006	0.00161	0.00004	2	212.08	84.83	0.1	0.00160	0.71
95	14.53	0.01	0.0234	0.0006	0.00161	0.00004	2	212.09	84.84	0.1	0.00160	1.12

Promedio % error [E1]
Promedio % error absoluto [E2]
Minimo % error [φ]
Maximo % error [φ]
E3
E4

1
3
2
5

-0.32
1.23
0.01
4.67
1.53
1.57

Tabla A. 3 Datos de calibración para la placa de 3/4".

Placa de 3/4"												
	Tiempo	Incertidumbre de Tiempo	Volumen de agua	Incertidumbre de Volumen	Caudal	Incertidumbre de Caudal [Ec. 27]	Incertidumbre de Caudal	ΔP		ΔH	Caudal numérico	Error relativo (φ)
	[s]	[s]	[m ³]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[KPa]	[%]	[m]	[m ³ /s]	[%]
1	17.53	0.01	0.0117	0.0005	0.00067	0.00003	4	9.10	3.64	0.05	0.00065	2.59
2	17.92	0.01	0.0117	0.0005	0.00065	0.00003	4	9.06	3.63	0.05	0.00065	0.63
3	17.93	0.01	0.0117	0.0005	0.00065	0.00003	4	9.08	3.63	0.05	0.00065	0.50
4	19.38	0.01	0.0117	0.0005	0.00060	0.00003	4	8.30	3.32	0.05	0.00062	-2.83
5	19.27	0.01	0.0117	0.0005	0.00061	0.00003	4	7.61	3.05	0.05	0.00060	2.09
6	19.26	0.01	0.0117	0.0005	0.00061	0.00003	4	7.59	3.04	0.05	0.00059	2.31
7	19.53	0.01	0.0117	0.0005	0.00060	0.00003	4	7.58	3.03	0.05	0.00059	1.02
8	15.01	0.01	0.0117	0.0005	0.00078	0.00003	4	12.49	5.00	0.05	0.00076	2.24
9	14.86	0.01	0.0117	0.0005	0.00079	0.00004	4	12.49	5.00	0.05	0.00076	3.21
10	14.98	0.01	0.0117	0.0005	0.00078	0.00003	4	12.48	4.99	0.05	0.00076	2.48
11	15.36	0.01	0.0117	0.0005	0.00076	0.00003	4	12.36	4.95	0.05	0.00076	0.46
12	14.79	0.01	0.0117	0.0005	0.00079	0.00004	4	12.25	4.90	0.05	0.00076	4.59
13	15.04	0.01	0.0117	0.0005	0.00078	0.00003	4	12.26	4.91	0.05	0.00076	2.93
14	14.89	0.01	0.0117	0.0005	0.00079	0.00004	4	12.31	4.93	0.05	0.00076	3.70
15	9.95	0.01	0.0117	0.0005	0.00118	0.00005	4	28.94	11.58	0.05	0.00116	1.20
16	9.95	0.01	0.0117	0.0005	0.00118	0.00005	4	28.91	11.57	0.05	0.00116	1.24
17	9.77	0.01	0.0117	0.0005	0.00120	0.00005	4	28.94	11.58	0.05	0.00116	2.99
18	9.73	0.01	0.0117	0.0005	0.00120	0.00005	4	28.76	11.51	0.05	0.00116	3.68
19	10.12	0.01	0.0117	0.0005	0.00116	0.00005	4	28.55	11.42	0.05	0.00116	0.19
20	10.08	0.01	0.0117	0.0005	0.00116	0.00005	4	28.60	11.44	0.05	0.00116	0.50
21	17.54	0.01	0.0234	0.0006	0.00134	0.00003	2	38.38	15.35	0.1	0.00134	-0.33
22	16.91	0.01	0.0234	0.0006	0.00139	0.00003	2	38.31	15.33	0.1	0.00134	3.35
23	16.93	0.01	0.0234	0.0006	0.00138	0.00003	2	38.25	15.30	0.1	0.00134	3.31
24	17.15	0.01	0.0234	0.0006	0.00137	0.00003	2	38.15	15.26	0.1	0.00134	2.19
25	17.08	0.01	0.0234	0.0006	0.00137	0.00003	2	38.01	15.21	0.1	0.00133	2.76
26	16.99	0.01	0.0234	0.0006	0.00138	0.00003	2	37.91	15.17	0.1	0.00133	3.40
27	14.72	0.01	0.0234	0.0006	0.00159	0.00004	2	52.01	20.81	0.1	0.00156	1.92
28	14.32	0.01	0.0234	0.0006	0.00164	0.00004	2	51.84	20.74	0.1	0.00156	4.74
29	15.06	0.01	0.0234	0.0006	0.00156	0.00004	2	51.81	20.73	0.1	0.00156	-0.15
30	14.66	0.01	0.0234	0.0006	0.00160	0.00004	2	51.65	20.66	0.1	0.00156	2.66
31	14.76	0.01	0.0234	0.0006	0.00159	0.00004	2	51.50	20.60	0.1	0.00155	2.14
32	13.12	0.01	0.0234	0.0006	0.00179	0.00004	2	64.88	25.95	0.1	0.00174	2.33
33	12.97	0.01	0.0234	0.0006	0.00181	0.00004	2	64.60	25.84	0.1	0.00174	3.65
34	13.04	0.01	0.0234	0.0006	0.00180	0.00004	2	64.35	25.74	0.1	0.00174	3.32
35	13.09	0.01	0.0234	0.0006	0.00179	0.00004	2	64.38	25.75	0.1	0.00174	2.93
36	13.27	0.01	0.0234	0.0006	0.00177	0.00004	2	64.14	25.66	0.1	0.00173	1.78
37	12.91	0.01	0.0234	0.0006	0.00182	0.00004	2	74.03	29.61	0.1	0.00186	-2.69
38	12.85	0.01	0.0234	0.0006	0.00182	0.00004	2	73.75	29.50	0.1	0.00186	-2.02
39	12.63	0.01	0.0234	0.0006	0.00186	0.00005	2	73.56	29.43	0.1	0.00186	-0.14
40	12.38	0.01	0.0234	0.0006	0.00189	0.00005	2	73.39	29.36	0.1	0.00186	1.95
41	12.30	0.01	0.0234	0.0006	0.00191	0.00005	2	73.08	29.23	0.1	0.00185	2.80
42	12.23	0.01	0.0234	0.0006	0.00192	0.00005	2	72.69	29.08	0.1	0.00185	3.61
43	11.32	0.01	0.0234	0.0006	0.00207	0.00005	2	88.54	35.42	0.1	0.00204	1.50
44	11.33	0.01	0.0234	0.0006	0.00207	0.00005	2	88.31	35.33	0.1	0.00204	1.54
45	11.16	0.01	0.0234	0.0006	0.00210	0.00005	2	88.14	35.26	0.1	0.00203	3.11
46	11.11	0.01	0.0234	0.0006	0.00211	0.00005	2	87.95	35.18	0.1	0.00203	3.65
47	10.97	0.01	0.0234	0.0006	0.00214	0.00005	2	89.39	35.76	0.1	0.00205	4.08
48	11.36	0.01	0.0234	0.0006	0.00206	0.00005	2	88.84	35.54	0.1	0.00204	0.98
49	11.01	0.01	0.0234	0.0006	0.00213	0.00005	2	88.54	35.42	0.1	0.00204	4.19
50	11.40	0.01	0.0234	0.0006	0.00206	0.00005	2	88.49	35.40	0.1	0.00204	0.83

Tabla A. 3 Datos de calibración para la placa de 3/4". (Continuación)

Placa de 3/4"												
	Tiempo	Incertidumbre de Tiempo	Volumen de agua	Incertidumbre de Volumen	Caudal	Incertidumbre de Caudal [Ec. 27]	Incertidumbre de Caudal	ΔP		ΔH	Caudal numérico	Error relativo (φ)
	[s]	[s]	[m ³]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[KPa]	[%]	[m]	[m ³ /s]	[%]
51	10.63	0.01	0.0234	0.0006	0.00220	0.00005	2	100.99	40.40	0.1	0.00218	1.19
52	10.73	0.01	0.0234	0.0006	0.00218	0.00005	2	100.84	40.34	0.1	0.00218	0.33
53	10.33	0.01	0.0234	0.0006	0.00227	0.00006	2	100.38	40.15	0.1	0.00217	4.27
54	10.21	0.01	0.0234	0.0006	0.00230	0.00006	2	99.89	39.96	0.1	0.00217	5.61
55	10.83	0.01	0.0234	0.0006	0.00216	0.00005	2	99.70	39.88	0.1	0.00216	-0.02
56	10.52	0.01	0.0234	0.0006	0.00223	0.00006	2	99.55	39.82	0.1	0.00216	2.91
57	9.68	0.01	0.0234	0.0006	0.00242	0.00006	2	117.94	47.18	0.1	0.00235	2.73
58	9.77	0.01	0.0234	0.0006	0.00240	0.00006	2	117.78	47.11	0.1	0.00235	1.90
59	9.83	0.01	0.0234	0.0006	0.00238	0.00006	2	117.63	47.05	0.1	0.00235	1.36
60	13.39	0.01	0.0352	0.0006	0.00263	0.00005	2	134.49	53.80	0.15	0.00252	4.19
61	8.94	0.01	0.0234	0.0006	0.00262	0.00007	3	134.18	53.67	0.1	0.00251	4.16
62	9.43	0.01	0.0234	0.0006	0.00249	0.00006	2	133.90	53.56	0.1	0.00251	-0.99
63	9.12	0.01	0.0234	0.0006	0.00257	0.00006	2	133.59	53.44	0.1	0.00251	2.45
64	9.25	0.01	0.0234	0.0006	0.00253	0.00006	2	133.41	53.37	0.1	0.00251	1.12
65	13.59	0.01	0.0352	0.0006	0.00259	0.00005	2	134.10	53.64	0.15	0.00251	2.90
66	22.56	0.01	0.0586	0.0007	0.00260	0.00003	1	136.61	54.65	0.25	0.00254	2.38
67	22.83	0.01	0.0586	0.0007	0.00257	0.00003	1	135.68	54.27	0.25	0.00253	1.56
68	22.41	0.01	0.0586	0.0007	0.00261	0.00003	1	136.45	54.58	0.25	0.00253	3.11
69	22.46	0.01	0.0586	0.0007	0.00261	0.00003	1	135.34	54.14	0.25	0.00252	3.27
70	22.72	0.01	0.0586	0.0007	0.00258	0.00003	1	134.01	53.61	0.25	0.00251	2.64
71	17.54	0.01	0.0469	0.0007	0.00267	0.00004	1	153.56	61.43	0.2	0.00269	-0.60
72	17.08	0.01	0.0469	0.0007	0.00274	0.00004	1	152.88	61.15	0.2	0.00268	2.26
73	17.31	0.01	0.0469	0.0007	0.00271	0.00004	1	152.33	60.93	0.2	0.00268	1.12
74	16.76	0.01	0.0469	0.0007	0.00280	0.00004	1	159.75	63.90	0.2	0.00274	1.95
75	16.44	0.01	0.0469	0.0007	0.00285	0.00004	1	163.58	65.43	0.2	0.00277	2.67
76	16.55	0.01	0.0469	0.0007	0.00283	0.00004	1	163.95	65.58	0.2	0.00278	1.91
77	16.46	0.01	0.0469	0.0007	0.00285	0.00004	1	163.09	65.24	0.2	0.00277	2.70
78	16.62	0.01	0.0469	0.0007	0.00282	0.00004	1	162.00	64.80	0.2	0.00276	2.08
79	15.80	0.01	0.0469	0.0007	0.00297	0.00004	1	173.26	69.31	0.2	0.00286	3.72
80	16.26	0.01	0.0469	0.0007	0.00288	0.00004	1	172.43	68.97	0.2	0.00285	1.16
81	16.01	0.01	0.0469	0.0007	0.00293	0.00004	1	171.40	68.56	0.2	0.00284	2.97
82	15.37	0.01	0.0469	0.0007	0.00305	0.00004	1	187.65	75.06	0.2	0.00297	2.51
83	15.60	0.01	0.0469	0.0007	0.00300	0.00004	1	186.49	74.60	0.2	0.00296	1.36
84	15.47	0.01	0.0469	0.0007	0.00303	0.00004	1	185.73	74.29	0.2	0.00296	2.39
85	15.28	0.01	0.0469	0.0007	0.00307	0.00004	1	199.96	79.99	0.2	0.00307	-0.06
86	14.94	0.01	0.0469	0.0007	0.00314	0.00005	1	198.88	79.55	0.2	0.00306	2.44
87	15.03	0.01	0.0469	0.0007	0.00312	0.00005	1	197.46	78.99	0.2	0.00305	2.20
88	15.05	0.01	0.0469	0.0007	0.00311	0.00005	1	213.71	85.49	0.2	0.00317	-1.89
89	14.83	0.01	0.0469	0.0007	0.00316	0.00005	1	212.19	84.88	0.2	0.00316	-0.04
90	14.55	0.01	0.0469	0.0007	0.00322	0.00005	1	210.55	84.22	0.2	0.00315	2.26
91	14.26	0.01	0.0469	0.0007	0.00329	0.00005	1	226.41	90.57	0.2	0.00327	0.65
92	14.18	0.01	0.0469	0.0007	0.00331	0.00005	1	225.20	90.08	0.2	0.00326	1.48
93	14.05	0.01	0.0469	0.0007	0.00334	0.00005	1	224.03	89.61	0.2	0.00325	2.64
94	13.65	0.01	0.0469	0.0007	0.00343	0.00005	1	237.0375	94.82	0.2	0.00334	2.63
95	13.786667	0.01	0.0469	0.0007	0.00340	0.00005	1	235.475	94.19	0.2	0.00333	2.01
96	13.91	0.01	0.0469	0.0007	0.00337	0.00005	1	233.925	93.57	0.2	0.00332	1.46
97	16.83	0.01	0.0586	0.0007	0.00348	0.00004	1	246.8875	98.755	0.25	0.00341	2.00
98	17.14	0.01	0.0586	0.0007	0.00342	0.00004	1	244.9125	97.965	0.25	0.00340	0.60

Promedio % error [E1]
Promedio % error absoluto [E2]
Mínimo % error [φ]
Máximo % error [φ]
E3
E4

1
1
1
4

1.97
2.21
0.02
5.61
1.57
2.53

Tabla A. 4 Datos de calibración para la placa de 1”.

Placa de 1"												
	Tiempo	Incertidumbre de Tiempo	Volumen de agua	Incertidumbre de Volumen	Caudal	Incertidumbre de Caudal [Ec. 27]	Incertidumbre de Caudal	ΔP		ΔH	Caudal numérico	Error relativo (φ)
	[s]	[s]	[m ³]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[KPa]	[%]	[m]	[m ³ /s]	[%]
1	24.36	0.01	0.0234	0.0006	0.000962	0.00002	2	4.85	1.94	0.1	0.00096	-0.28
2	24.53	0.01	0.0234	0.0006	0.000955	0.00002	2	4.89	1.955	0.1	0.00097	-1.37
3	24.39	0.01	0.0234	0.0006	0.000961	0.00002	2	4.94	1.975	0.1	0.00097	-1.27
4	24.63	0.01	0.0234	0.0006	0.000952	0.00002	2	4.96	1.985	0.1	0.00098	-2.53
5	14.44	0.01	0.0234	0.0006	0.001623	0.00004	2	13.79	5.515	0.1	0.00162	0.36
6	14.67	0.01	0.0234	0.0006	0.001598	0.00004	2	13.79	5.515	0.1	0.00162	-1.19
7	14.25	0.01	0.0234	0.0006	0.001645	0.00004	2	13.80	5.52	0.1	0.00162	1.63
8	14.53	0.01	0.0234	0.0006	0.001613	0.00004	2	13.84	5.535	0.1	0.00162	-0.44
9	52.45	0.01	0.1172	0.0009	0.002234	0.00002	1	25.30	10.12	0.5	0.00218	2.30
10	52.76	0.01	0.1172	0.0009	0.002221	0.00002	1	25.30	10.12	0.5	0.00218	1.71
11	53.03	0.01	0.1172	0.0009	0.002210	0.00002	1	25.48	10.19	0.5	0.00219	0.87
12	52.32	0.01	0.1172	0.0009	0.002240	0.00002	1	26.15	10.46	0.5	0.00222	0.93
13	45.43	0.01	0.1172	0.0009	0.002580	0.00002	1	35.08	14.03	0.5	0.00257	0.54
14	45.34	0.01	0.1172	0.0009	0.002585	0.00002	1	35.44	14.175	0.5	0.00258	0.23
15	43.99	0.01	0.1172	0.0009	0.002664	0.00002	1	37.55	15.02	0.5	0.00265	0.40
16	44.27	0.01	0.1172	0.0009	0.002647	0.00002	1	38.13	15.25	0.5	0.00267	-0.99
17	39.85	0.01	0.1172	0.0009	0.002940	0.00002	1	46.14	18.455	0.5	0.00294	0.09
18	39.21	0.01	0.1172	0.0009	0.002988	0.00002	1	46.60	18.64	0.5	0.00295	1.21
19	46.10	0.01	0.1406	0.0010	0.003050	0.00002	1	49.00	19.6	0.6	0.00303	0.77
20	38.03	0.01	0.1172	0.0009	0.003082	0.00003	1	50.63	20.25	0.5	0.00308	0.19
21	37.56	0.01	0.1172	0.0009	0.003120	0.00003	1	51.30	20.52	0.5	0.00310	0.77
22	33.72	0.01	0.1172	0.0009	0.003476	0.00003	1	64.08	25.63	0.5	0.00346	0.57
23	33.55	0.01	0.1172	0.0009	0.003493	0.00003	1	64.15	25.66	0.5	0.00346	1.01
24	33.32	0.01	0.1172	0.0009	0.003517	0.00003	1	65.11	26.045	0.5	0.00348	0.95
25	33.58	0.01	0.1172	0.0009	0.003490	0.00003	1	65.30	26.12	0.5	0.00349	0.05
26	38.14	0.01	0.1406	0.0010	0.003687	0.00003	1	73.60	29.44	0.6	0.00370	-0.38
27	37.58	0.01	0.1406	0.0010	0.003742	0.00003	1	74.19	29.675	0.6	0.00372	0.70
28	37.69	0.01	0.1406	0.0010	0.003731	0.00003	1	74.24	29.695	0.6	0.00372	0.38
29	35.17	0.01	0.1406	0.0010	0.003998	0.00003	1	86.04	34.415	0.6	0.00400	0.01
30	35.02	0.01	0.1406	0.0010	0.004016	0.00003	1	86.10	34.44	0.6	0.00400	0.41
31	35.16	0.01	0.1406	0.0010	0.003999	0.00003	1	86.13	34.45	0.6	0.00400	-0.01
32	32.38	0.01	0.1406	0.0010	0.004343	0.00003	1	98.81	39.525	0.6	0.00428	1.43
33	32.43	0.01	0.1406	0.0010	0.004336	0.00003	1	99.18	39.67	0.6	0.00429	1.09
34	32.35	0.01	0.1406	0.0010	0.004347	0.00003	1	99.49	39.795	0.6	0.00430	1.18
35	31.13	0.01	0.1406	0.0010	0.004517	0.00003	1	111.44	44.575	0.6	0.00454	-0.58
36	30.16	0.01	0.1406	0.0010	0.004663	0.00004	1	114.54	45.815	0.6	0.00461	1.24
37	30.29	0.01	0.1406	0.0010	0.004642	0.00004	1	114.73	45.89	0.6	0.00461	0.71
38	29.52	0.01	0.1406	0.0010	0.004763	0.00004	1	121.90	48.76	0.6	0.00475	0.30
39	29.24	0.01	0.1406	0.0010	0.004809	0.00004	1	121.94	48.775	0.6	0.00475	1.23
40	29.47	0.01	0.1406	0.0010	0.004772	0.00004	1	123.68	49.47	0.6	0.00478	-0.23
41	27.78	0.01	0.1406	0.0010	0.005063	0.00004	1	137.89	55.155	0.6	0.00505	0.30
42	27.56	0.01	0.1406	0.0010	0.005102	0.00004	1	139.28	55.71	0.6	0.00507	0.58
43	27.48	0.01	0.1406	0.0010	0.005118	0.00004	1	141.38	56.55	0.6	0.00511	0.15
44	27.26	0.01	0.1406	0.0010	0.005158	0.00004	1	143.68	57.47	0.6	0.00515	0.14
45	26.97	0.01	0.1406	0.0010	0.005214	0.00004	1	144.40	57.76	0.6	0.00516	0.95
46	27.62	0.01	0.1406	0.0010	0.005092	0.00004	1	145.06	58.025	0.6	0.00518	-1.65
47	26.25	0.01	0.1406	0.0010	0.005357	0.00004	1	158.53	63.41	0.6	0.00541	-0.96
48	26.12	0.01	0.1406	0.0010	0.005383	0.00004	1	159.69	63.875	0.6	0.00543	-0.82
49	25.89	0.01	0.1406	0.0010	0.005432	0.00004	1	160.94	64.375	0.6	0.00545	-0.30
50	24.39	0.01	0.1406	0.0010	0.005766	0.00004	1	178.46	71.385	0.6	0.00573	0.56

Tabla A. 4 de Datos de calibración para la placa de 1". (Continuación)

Placa de 1"												
	Tiempo	Incertidumbre de Tiempo	Volumen de agua	Incertidumbre de Volumen	Caudal	Incertidumbre de Caudal [Ec. 27]	Incertidumbre de Caudal	ΔP		ΔH	Caudal numérico	Error relativo (φ)
	[s]	[s]	[m ³]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[KPa]	[%]	[m]	[m ³ /s]	[%]
51	24.39	0.01	0.1406	0.0010	0.005766	0.00004	1	183.41	73.365	0.6	0.00581	-0.79
52	24.67	0.01	0.1406	0.0010	0.005701	0.00004	1	184.65	73.86	0.6	0.00583	-2.29
53	24.20	0.01	0.1406	0.0010	0.005812	0.00004	1	188.55	75.42	0.6	0.00589	-1.38
54	23.60	0.01	0.1406	0.0010	0.005959	0.00005	1	189.26	75.705	0.6	0.00590	0.95
55	24.11	0.01	0.1406	0.0010	0.005832	0.00004	1	189.78	75.91	0.6	0.00591	-1.35
56	23.72	0.01	0.1406	0.0010	0.005928	0.00005	1	196.19	78.475	0.6	0.00601	-1.36
57	23.36	0.01	0.1406	0.0010	0.006019	0.00005	1	201.84	80.735	0.6	0.00609	-1.24
58	23.50	0.01	0.1406	0.0010	0.005984	0.00005	1	202.50	81	0.6	0.00610	-2.01
59	22.78	0.01	0.1406	0.0010	0.006174	0.00005	1	210.91	84.365	0.6	0.00623	-0.87
60	22.85	0.01	0.1406	0.0010	0.006155	0.00005	1	211.61	84.645	0.6	0.00624	-1.35
61	23.09	0.01	0.1406	0.0010	0.006091	0.00005	1	211.98	84.79	0.6	0.00624	-2.50
62	22.03	0.01	0.1406	0.0010	0.006383	0.00005	1	221.63	88.65	0.6	0.00638	0.01
63	18.44	0.01	0.1172	0.0009	0.006355	0.00005	1	225.31	90.125	0.5	0.00643	-1.26
64	18.78	0.01	0.1172	0.0009	0.006239	0.00005	1	227.21	90.885	0.5	0.00646	-3.55
65	17.43	0.01	0.1172	0.0009	0.006725	0.00006	1	240.75	96.3	0.5	0.00665	1.13
66	17.35	0.01	0.1172	0.0009	0.006754	0.00006	1	241.34	96.535	0.5	0.00666	1.44
67	17.21	0.01	0.1172	0.0009	0.006809	0.00006	1	242.08	96.83	0.5	0.00667	2.09
68	16.97	0.01	0.1172	0.0009	0.006905	0.00006	1	245.49	98.195	0.5	0.00671	2.78
69	17.04	0.01	0.1172	0.0009	0.006879	0.00006	1	248.76	99.505	0.5	0.00676	1.77
70	17.19	0.01	0.1172	0.0009	0.006817	0.00006	1	249.28	99.71	0.5	0.00676	0.77
Promedio % error [E1]							1				0.06	
Promedio % error absoluto [E2]							1				1.00	
Minimo % error [φ]							1				0.01	
Maximo % error [φ]							2				3.55	
E3											1.24	
E4											1.24	

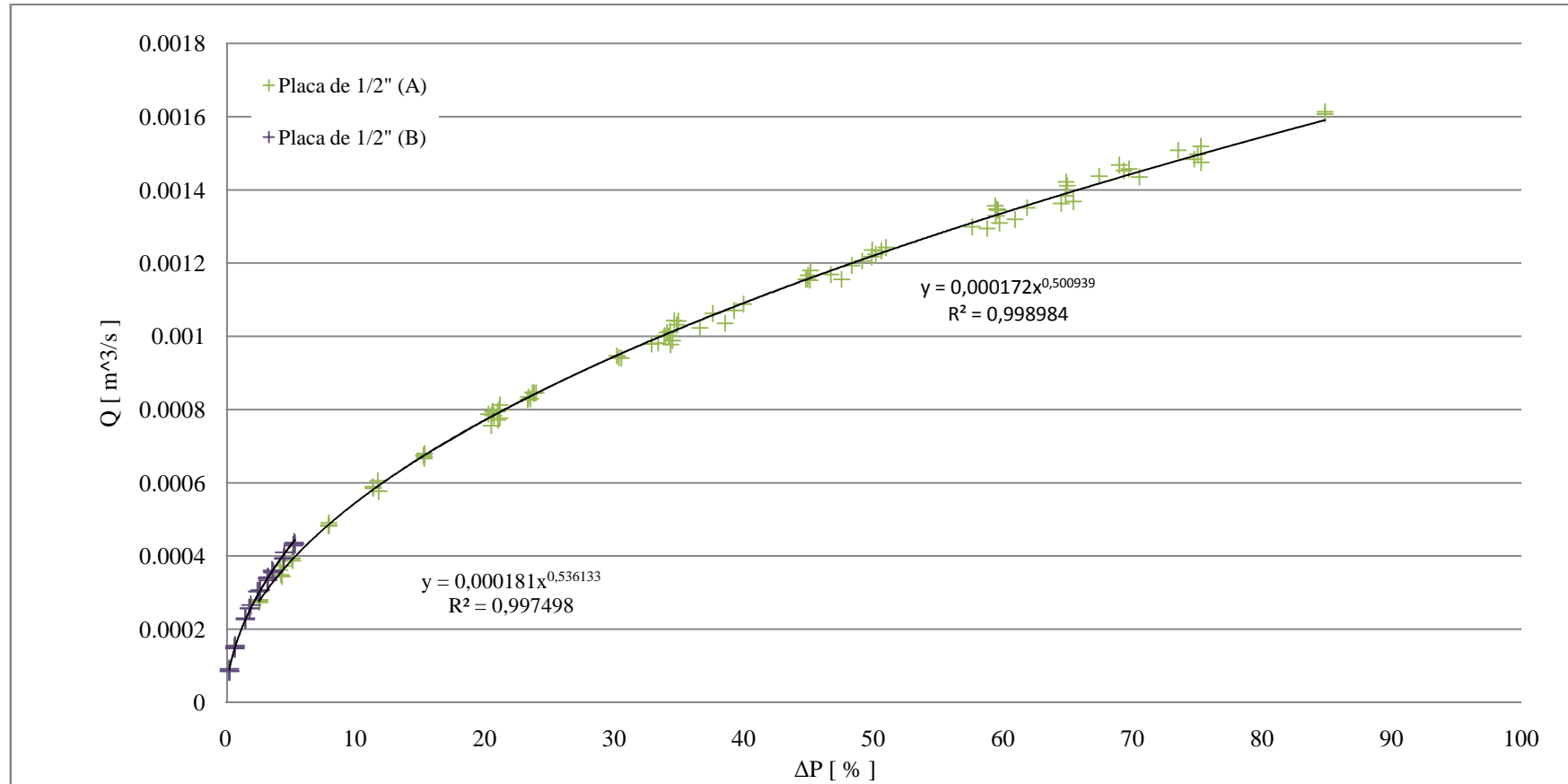


Figura A. 1 Curva de Calibración para la placa orificio de 1/2".

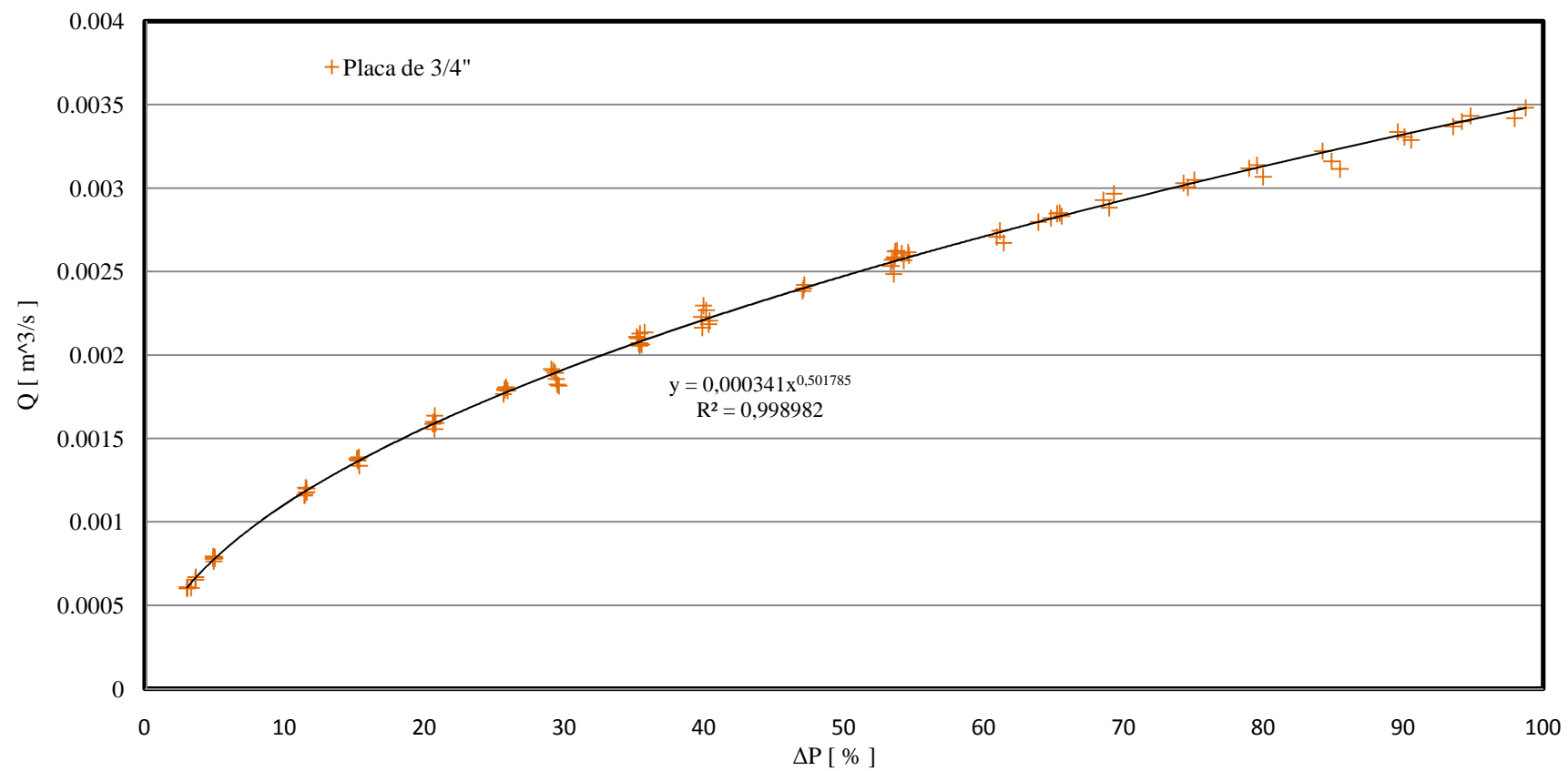


Figura A. 2 Curva de Calibración para la placa orificio de $3/4''$.

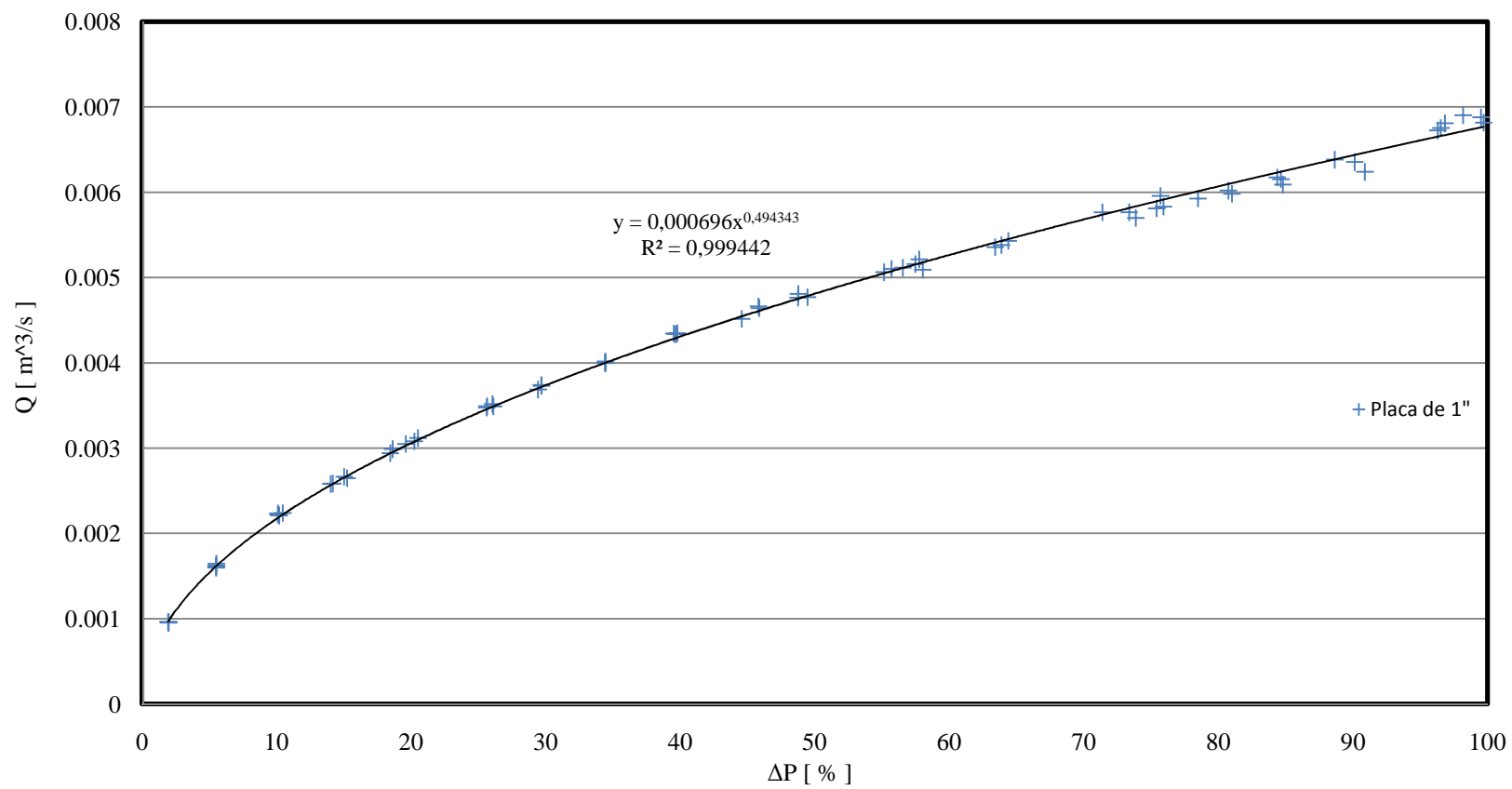


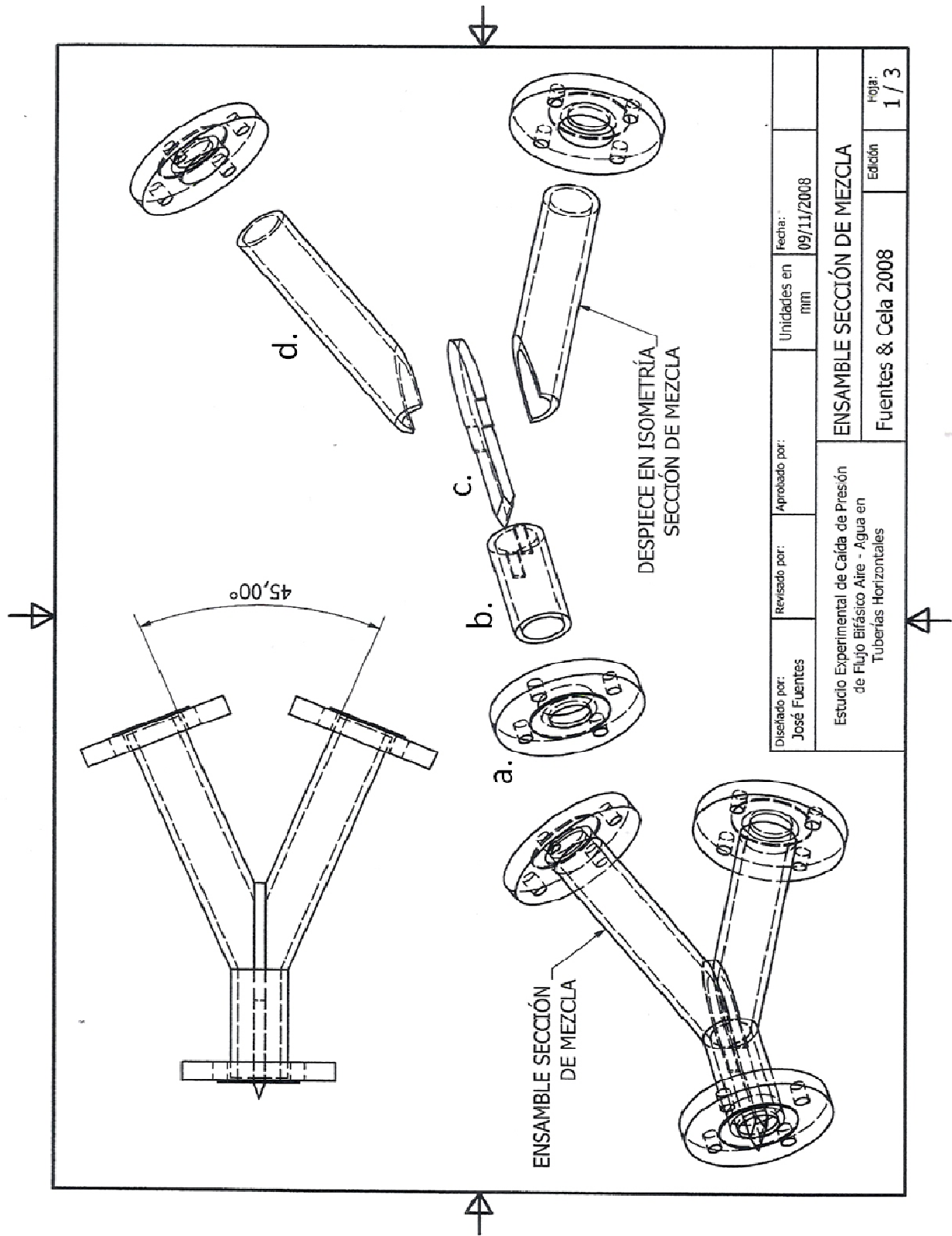
Figura A. 3 Curva de Calibración para la placa orificio de 1\".

Tabla A. 5 Incertidumbres de mediciones directas en la calibración de las placas orificio

Mediciones Directas	Error Máximo Promedio	Desviación Promedio	Desviación Estándar del Promedio	Apreciación Instrumento	n
Tiempo [s]	0.3	0,2	0,3	0,01	76
Altura [m]	na	na	na	0,002	1
Perímetro Tanque Grande [m]	0,003	0,001	0,002	0,001	7
Perímetro Tanque Pequeño [m]	0,0005	0,0005	0,0005	0,001	4
Perímetro Manguera [m]	na	na	na	0,001	1
Espesor Tanque Grande [m]	na	na	na	0,00005	1
Espesor Tanque Pequeño [m]	na	na	na	0,00005	1
Medidor de Presión diferencial [%]	0.3	0,2	0,3	0,06	76

Tabla A. 6 Incertidumbres de mediciones indirectas en la calibración de las placas orificio.

Mediciones Indirectas	Valor	Incertidumbre
Diámetro externo tanque grande [m]	58,428	0,001
Diámetro externo tanque pequeño [m]	37,0672	0,0002
Diámetro interno tanque grande [m]	54,928	0,001
Diámetro interno tanque pequeño [m]	36,1872	0,0003
Diámetro externo manguera [m]	0,0576	0,0003
Área tanque grande [m ²]	0,2370	0,0009
Área tanque pequeño [m ²]	0,1028	0,0001
Área de la manguera [m ²]	0,002607	0,000001
Área neta tanque grande [m ²]	0,2344	0,0009
Área neta tanque pequeño [m ²]	0,1002	0,0001



Disñado por: José Fuentes	Revisado por:	Aprobado por:	Unidades en mm	Fecha: 09/11/2008
Estudio Experimental de Caída de Presión de Flujo Bifásico Aire - Agua en Tuberías Horizontales			ENSAMBLE SECCIÓN DE MEZCLA	
			Edición	Foja: 1 / 3
			Fuentes & Ceta 2008	

Figura A. 4 Planos de la Sección de mezcla

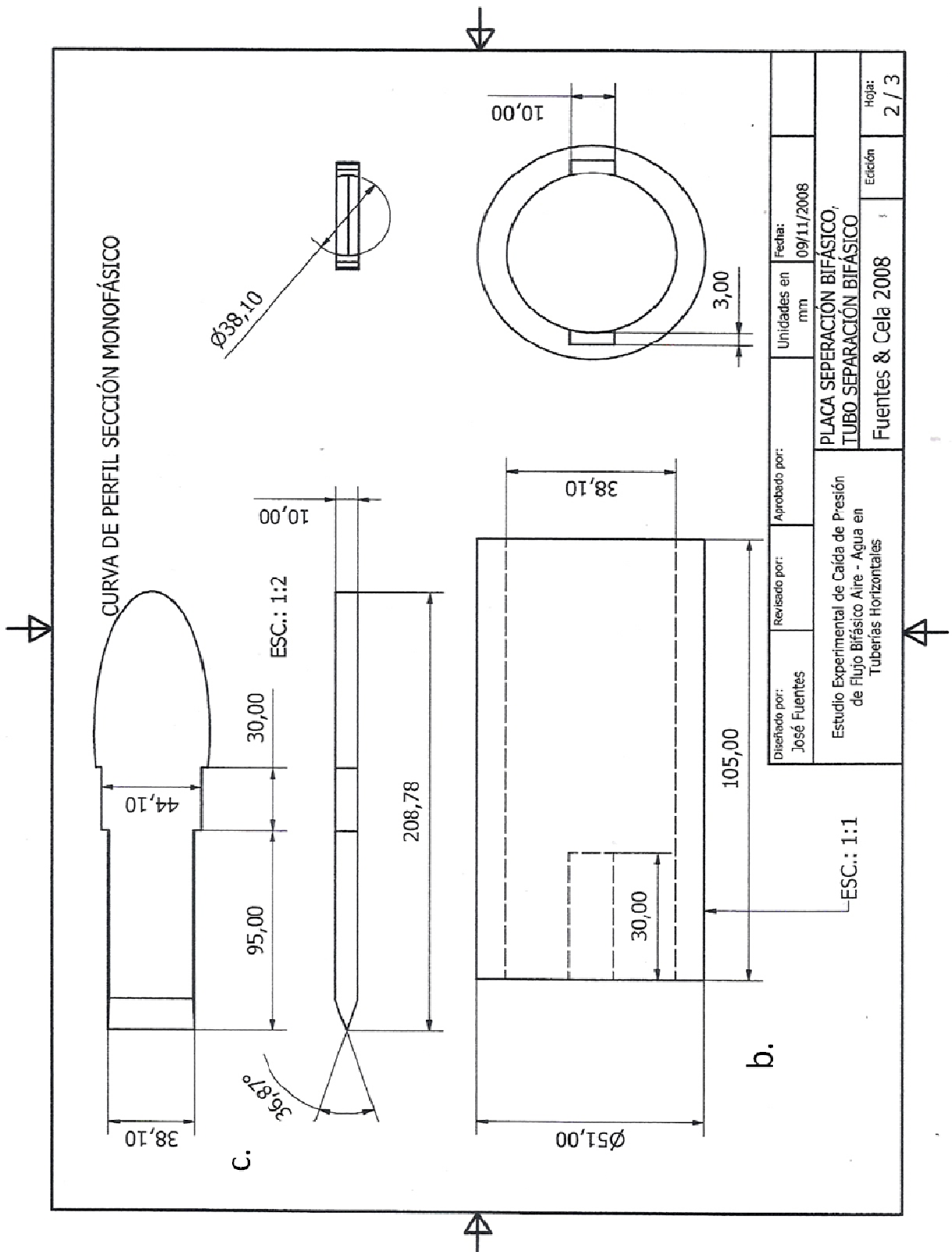
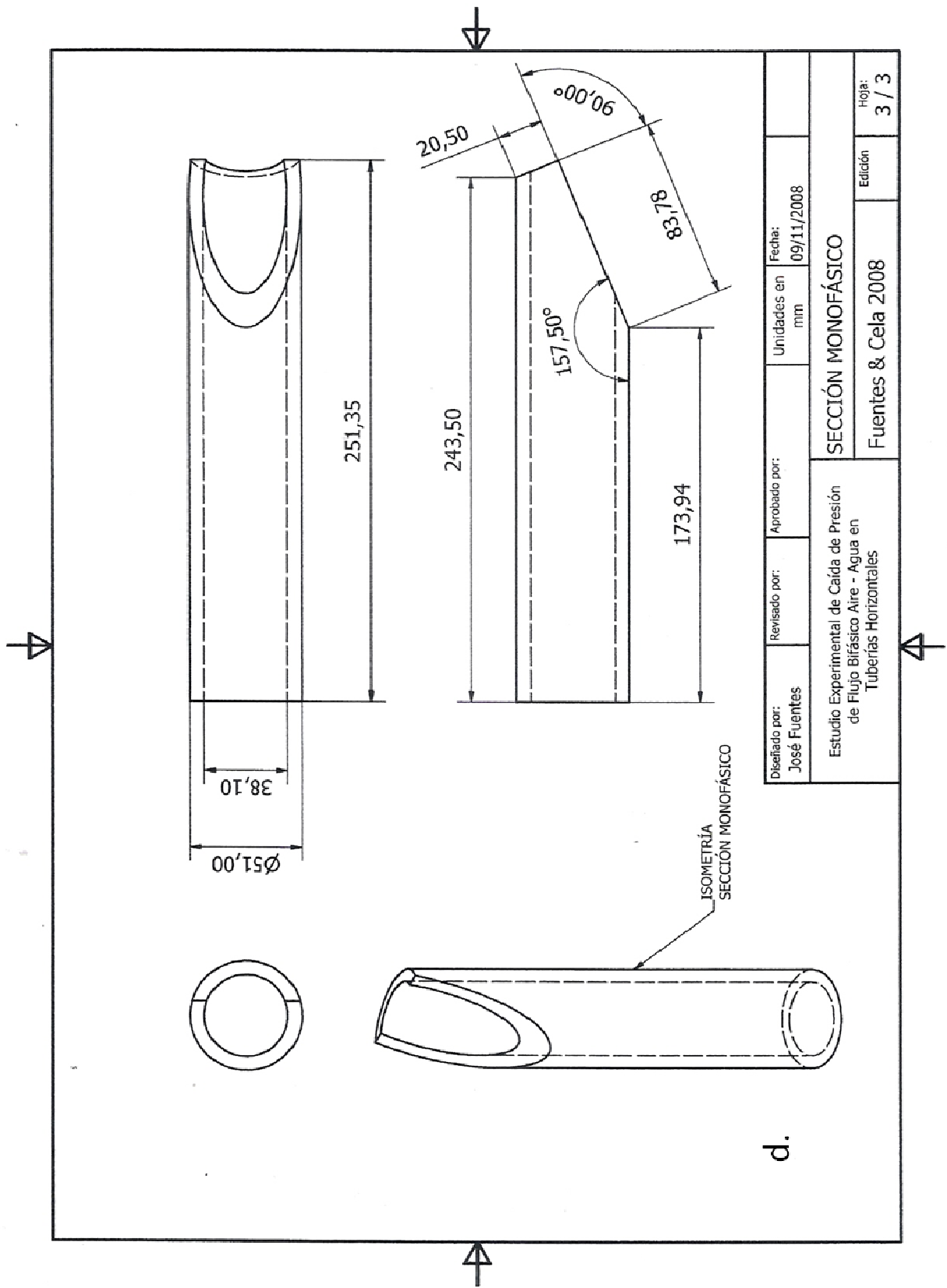


Figura A.4 Planos de la Sección de mezcla (Continuación)



Diseñado por: José Fuentes	Revisado por:	Aprobado por:	Unidades en mm	Fecha: 09/11/2008
Estudio Experimental de Caída de Presión de Flujo Bifásico Aire - Agua en Tuberías Horizontales			SECCIÓN MONOFÁSICO	
			Fuentes & Cella 2008	Edición
			Hója: 3 / 3	

Figura A.4 Planos de la Sección de mezcla (Continuación).

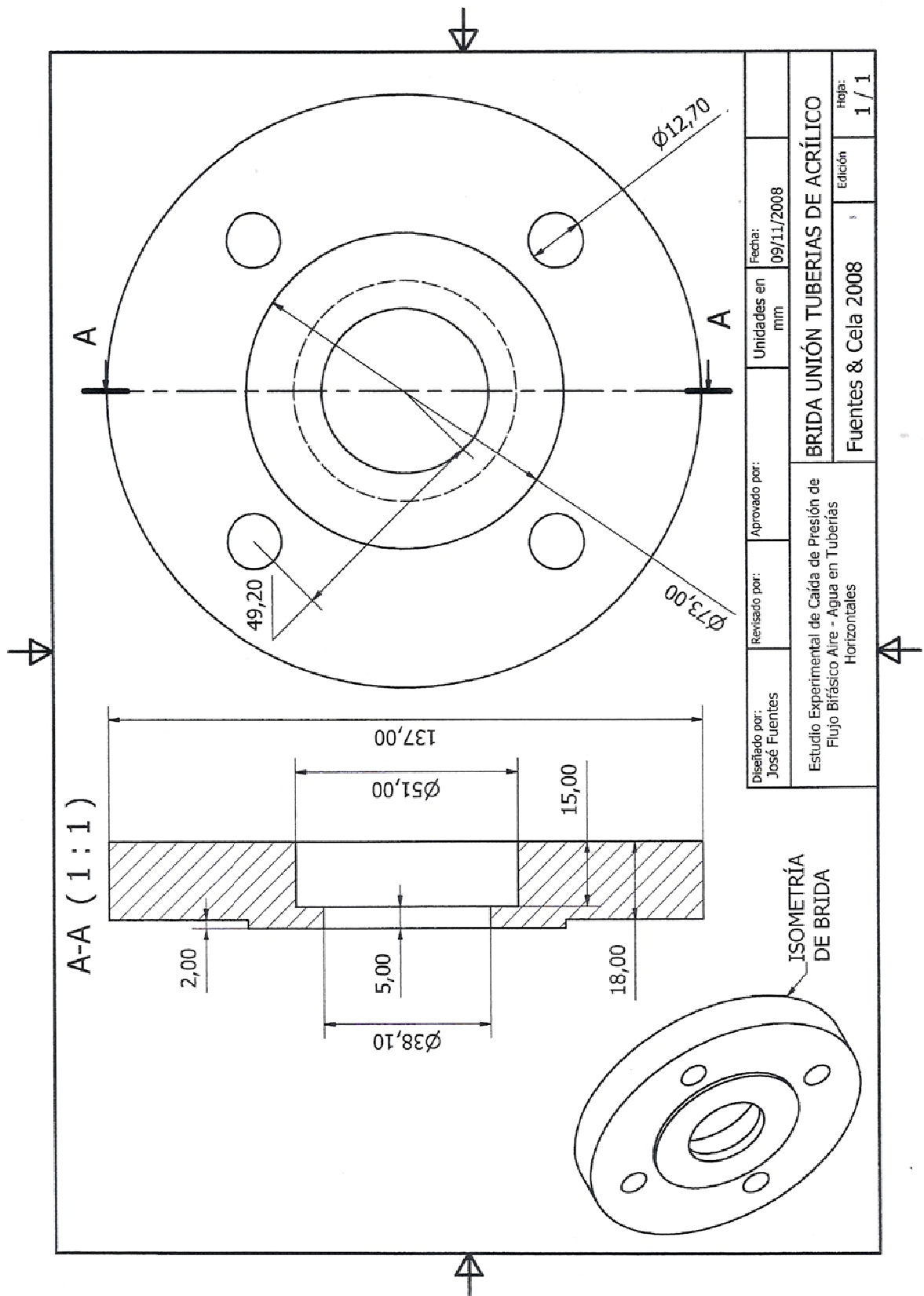


Figura A. 5 Planos de los Sistemas de Acople

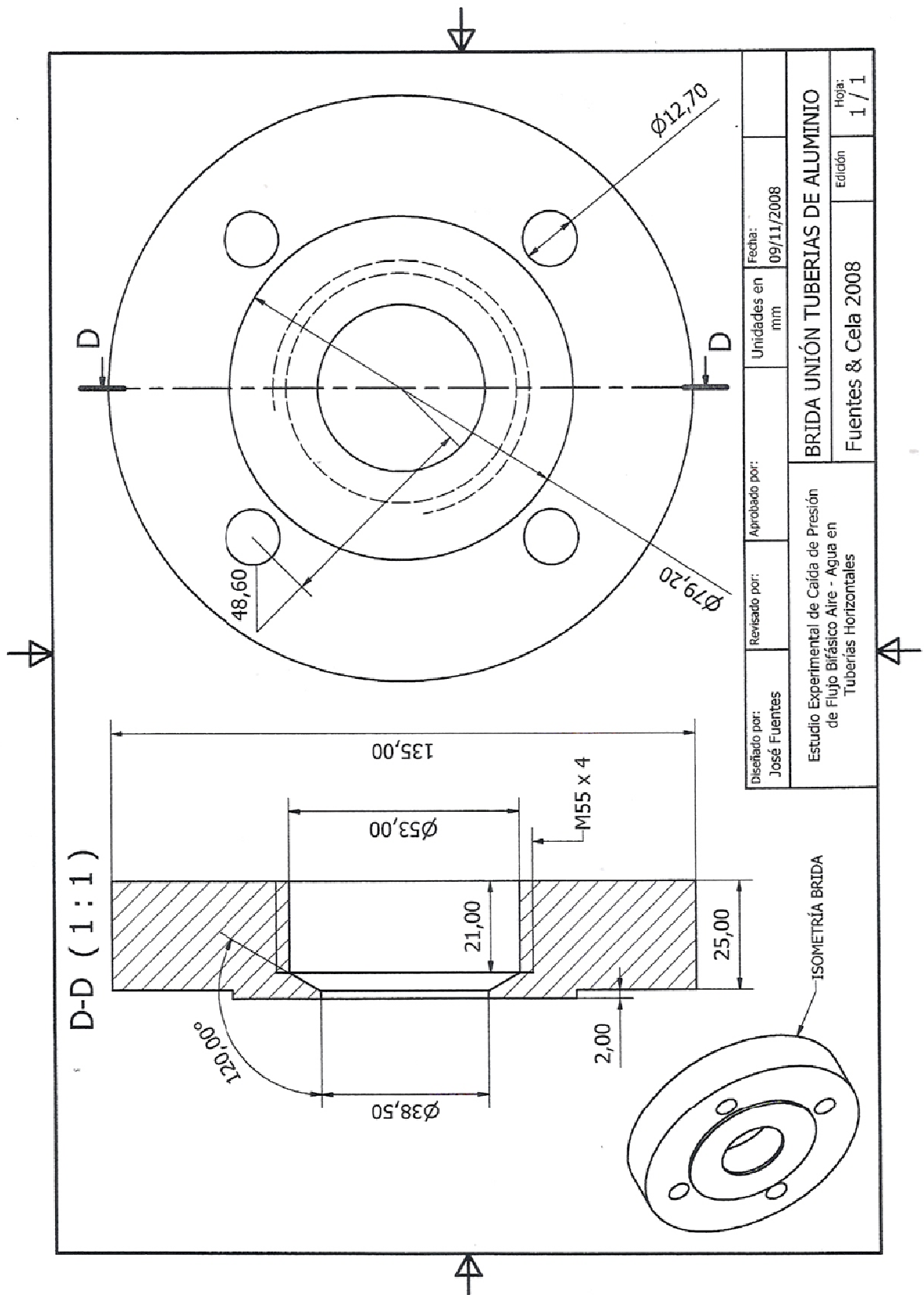


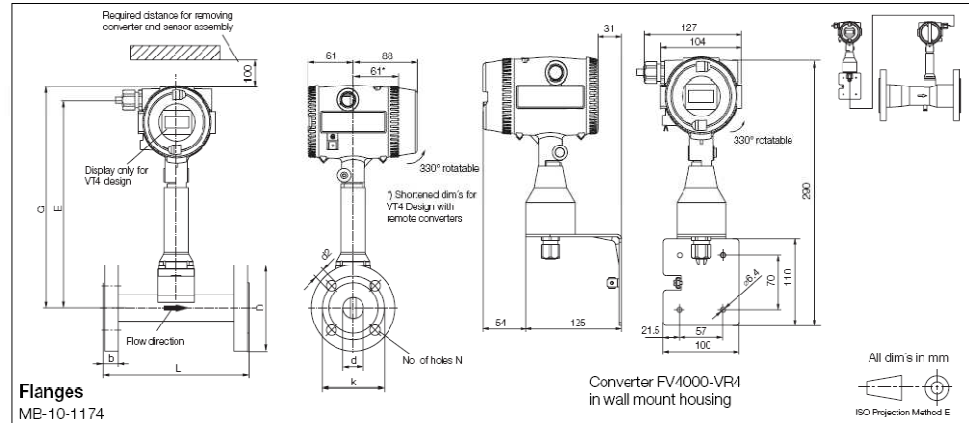
Figura A. 5 Planos de los Sistemas de Acople (Continuación)

Tabla A. 7. Dimensiones de las bridas del vortex de 2 pulgadas.

Vortex/Swirl Flowmeter
FV4000-VT4/VR4 / FS4000-ST4/SR4

D184S035U02

Dimensions FV4000-VT4/VR4 (TRIO-WIRL V), Flanged Design, DIN



Flanges
ME-10-1174

Vortex/Swirl Flowmeter
FV4000-VT4/VR4 / FS4000-ST4/SR4

D184S035U02

Dimensions FV4000-VT4/VR4 (TRIO-WIRL V), Flanged Design, ASME

Meter Size	Pres. Rating		L ¹⁾		E	D	G	k	d2	d	b	N	Weight [kg]
	Class	Schedule	Tmax 280°C	Tmax 400°C									
1/2"	150	40	200	-	296	88.9	315	60.5	15.9	15.7	11.2	4	5.0
	300	40	200			95.2		66.5	15.9		14.2		5.1
	600	40	200			95.3		66.5	15.9		20.6		5.2
	900	40	200			120.6		82.5	22.3		28.8		7.9
1"	150	60	200	205	313	108	332	79.4	15.9	24.3	14.2	4	5.7
	300	60	200	220		124		88.9	19		17.5		6.7
	600	60	220	-		124		88.9	19		23.9		7.3
1-1/2"	900	60	240	-	291	149.3	310	101.6	25.4	38.1	34.8	4	11.2
	150	60	200	220		127		98.4	15.9		17.5		8.5
	300	60	200	230		155.6		114.3	22.6		20.6		10.9
2"	600	60	235	-	291	155.6	310	114.3	22.6	38.1	28.8	4	12.1
	900	60	260	-		177.6		123.9	23.4		36.2		17.0
	150	60	200	220		152.4		120.6	19		19.1		4
2"	300	60	200	235	298	165	317	127	19	49.2	22.4	8	11.7
	600	60	240	-		165		127	19		31.8		13.6
	900	60	300	-		215.9		165.1	25.4		44.5		26.5
3"	150	60	200	240	316	190.5	335	162.4	19	73.7	28.9	4	17.6
	300	60	200	260		209.5		168.3	22.2		28.4		21.7
	600	60	265	-		209.5		168.3	22.2		36.2		25.8
3"	900	60	305	-	316	241.3	335	190.5	25.4	73.7	44.5	8	35.0
	150	60	250	260		228.6		190.5	19		23.9		20.1
	300	60	250	280		254		200	22.2		31.8		28.8
4"	600	60	315	-	325	273.1	344	215.9	25.4	97.2	44.5	8	41.4
	900	60	340	-		292.1		234.9	31.7		50.8		51.4
	150	60	300	310		279.4		241.3	22.2		25.4		32.8
6"	300	60	300	330	352	317.5	371	269.9	22.2	146.4	36.6	12	49.8
	600	60	365	-		355.6		292.1	28.4		54.2		81.6
	900	60	410	-		381		317.5	31.7		62		106.8
8"	150	60	350	370	414	343	433	298.4	22.2	194	28.4	8	20.1
	300	60	350	370		381		330.2	25.4		41.1		20.1
	600	60	415	-		419.1		349.3	31.8		62		12
10"	900	60	470	-	439	439.9	458	393.7	33.1	253	69.9	16	16
	150	40	450	439		406.4		362	25.4		30.2		12
	300	40	450	439		444.5		387.3	28.4		47.7		16
12"	600	60	470	-	464	508	463	431.8	35.1	303.9	69.9	20	16
	150	40	500	464		492.6		431.8	25.4		31.8		12
	300	40	500	464		520.7		450.8	31.7		50.8		16
	600	60	500	-		558.8		489	35.1	288.8	72.9	20	

1) Tolerances: 1/2" to 8" +0/-3 mm; 10" to 12": +0/-5 mm

Fig. 17: Dimensions FV4000-VT4/VR4, Flanges, ASME

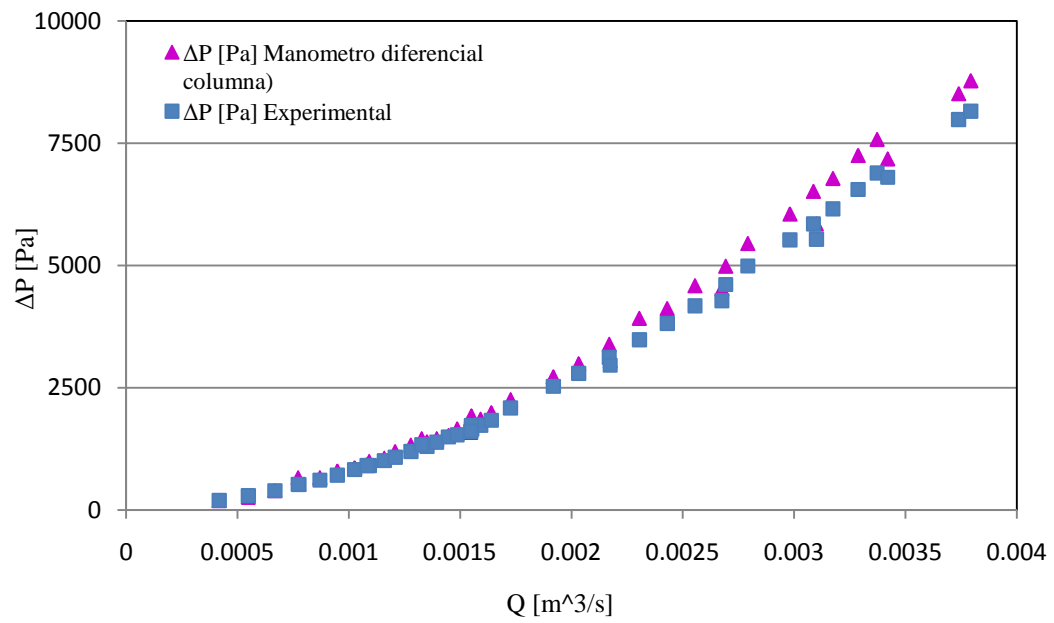


Figura A. 6. Comparación de la caída de presión registrada por el medidor de presión diferencial digital y de columna de mercurio.

Tabla A. 8 Comparación de los resultados experimentales de flujo monofásico líquido para los medidores de presión diferencial en función a la rugosidad equivalente de la tubería.

V[m/s]	Re	ΔP [Pa] (Zigrang y Sylvester, 1985) (ε=0 m)	ΔP [Pa] (Zigrang y Sylvester, 1985) (ε=0.0000589 m)	ΔP [Pa] Experimental (Medidor digital)	ΔP digital [Psi]	ε=(0.0000589 m)				ε=0			
						Error relativo (φ) [%]	E2 [%]	E3 [%]	E4 [%]	Error relativo (φ) [%]	E2 [%]	E3 [%]	E4 [%]
0.367	16443	132.5	146.4	200	0.0290076	26.79	26.79	607.58	717.90	33.76	33.76	76.15	1139.45
0.482	21740	213.4	240.4	300	0.0435114	19.86	19.86	313.87	394.46	28.88	28.88	14.83	834.12
0.586	26847	300.5	344.4	400	0.0580152	13.91	13.91	138.42	193.48	24.87	24.87	0.03	618.52
0.678	36028	974.5	1217.5	1340	0.24076308	9.15	9.15	49.01	83.63	27.28	27.28	5.06	744.14
0.681	31479	476.4	560.1	616	0.07599991	9.07	9.07	47.97	82.28	22.67	22.67	5.58	513.80
0.764	35769	553.8	657.3	720	0.08934341	8.71	8.71	43.10	75.86	23.09	23.09	3.77	533.03
0.832	39375	390.2	453.3	524	0.07716022	13.48	13.48	128.57	181.80	25.54	25.54	0.26	652.22
0.900	42825	635.8	761.1	832	0.10442736	8.52	8.52	40.69	72.65	23.59	23.59	2.08	556.34
0.949	50890	1282.8	1635.9	1732	0.25236612	5.55	5.55	11.59	30.79	25.94	25.94	0.82	672.71
0.958	46059	708.0	854.1	916	0.12067162	6.76	6.76	21.31	45.70	22.71	22.71	5.39	515.65
1.017	49320	843.4	1031.1	1084	0.13285481	4.88	4.88	7.49	23.82	22.20	22.20	8.02	492.74
1.060	52061	931.5	1146.8	1204	0.14735861	4.75	4.75	6.81	22.61	22.64	22.64	5.73	512.43
1.122	55379	785.9	955.1	1016	0.13285481	5.99	5.99	14.82	35.94	22.65	22.65	5.67	512.91
1.164	62798	1555.7	2010.4	2092	0.26686992	3.90	3.90	3.08	15.22	25.63	25.63	0.37	657.09
1.186	58519	1027.5	1273.1	1308	0.15722119	2.67	2.67	0.27	7.11	21.44	21.44	12.86	459.79
1.224	60719	1085.8	1351.2	1392	0.17462575	2.93	2.93	0.62	8.60	22.00	22.00	9.20	483.82
1.270	63217	1214.5	1524.6	1544	0.1897097	1.25	1.25	0.79	1.57	21.34	21.34	13.61	455.39
1.305	65348	1309.2	1652.8	1660	0.2018929	0.43	0.43	2.94	0.19	21.13	21.13	15.17	446.68
1.358	79713	2307.1	3108.9	2964	0.89343408	-4.89	4.89	49.46	23.90	22.16	22.16	8.22	491.15
1.361	74249	678.4	827.3	916	0.25120582	9.68	9.68	56.85	93.79	25.94	25.94	0.83	672.86
1.362	68477	1159.3	1449.6	1500	0.19435092	3.36	3.36	1.48	11.30	22.71	22.71	5.37	515.82
1.397	70477	1369.6	1735.2	1740	0.217557	0.27	0.27	3.50	0.07	21.29	21.29	13.99	453.26
1.439	73042	1441.7	1834.8	1840	0.22393867	0.28	0.28	3.46	0.08	21.65	21.65	11.44	468.59
1.515	82350	374.4	440.5	532	0.23380126	17.20	17.20	226.56	295.72	29.63	29.63	21.14	877.75
1.683	91959	1876.5	2460.3	2532	0.3034195	2.83	2.83	0.47	8.02	25.89	25.89	0.74	670.25
1.783	97895	2078.2	2747.8	2796	0.36723622	1.73	1.73	0.18	2.98	25.67	25.67	0.41	659.08
1.904	105015	2333.6	3115.2	3124	0.40552625	0.28	0.28	3.47	0.08	25.30	25.30	0.07	640.12
1.907	112379	1257.0	1617.6	1612	0.80351052	-0.35	0.35	6.21	0.12	22.02	22.02	9.06	484.90
2.023	111900	2599.6	3500.9	3484	0.45309871	-0.49	0.49	6.92	0.24	25.38	25.38	0.13	644.38
2.132	118765	3117.8	4267.1	4180	0.50531239	-2.08	2.08	17.88	4.34	25.41	25.41	0.15	645.79
2.241	125460	2853.2	3874.8	3820	0.42989263	-1.43	1.43	12.80	2.06	25.31	25.31	0.08	640.49
2.348	138697	3347.2	4647.9	4284	0.95086913	-8.49	8.49	113.19	72.16	21.87	21.87	10.00	478.15
2.363	133773	3418.0	4721.3	4612	0.55404516	-2.37	2.37	20.38	5.62	25.89	25.89	0.74	670.29
2.450	138317	3650.6	5067.1	4992	0.60625884	-1.50	1.50	13.31	2.26	26.87	26.87	3.39	722.10
2.616	148821	4359.6	6153.1	5852	0.66891526	-5.14	5.14	53.14	26.47	25.50	25.50	0.22	650.41
2.708	154977	4580.4	6495.4	6160	0.7240297	-5.44	5.44	57.59	29.64	25.64	25.64	0.38	657.53
2.720	161743	4355.7	6186.8	5540	0.9996019	-11.68	11.68	191.00	136.32	21.38	21.38	13.34	456.99
2.785	159973	4100.1	5752.3	5524	0.62134279	-4.13	4.13	39.41	17.08	25.78	25.78	0.56	664.45
2.884	166148	4875.5	6953.0	6556	0.80118991	-6.06	6.06	67.25	36.68	25.63	25.63	0.36	657.04
2.959	174021	5082.5	7298.8	6892	0.84876238	-5.90	5.90	64.75	34.84	26.26	26.26	1.50	689.34
3.001	179282	5194.2	7492.9	6804	0.98683855	-10.13	10.13	150.55	102.53	23.66	23.66	1.88	559.75
3.281	196535	6095.7	8917.2	7984	1.15798339	-11.69	11.69	191.36	136.63	23.65	23.65	1.90	559.37
3.328	200868	6246.6	9168.6	8156	1.18292993	-12.42	12.42	212.00	154.15	23.41	23.41	2.62	548.05

	ε=(0.0000589 m)	ε=0 m)
E1 [%]	2.14	25.03
E2 [%]	6.63	25.03
E3 [%]	8.45	2.64
E4 [%]	8.72	24.87

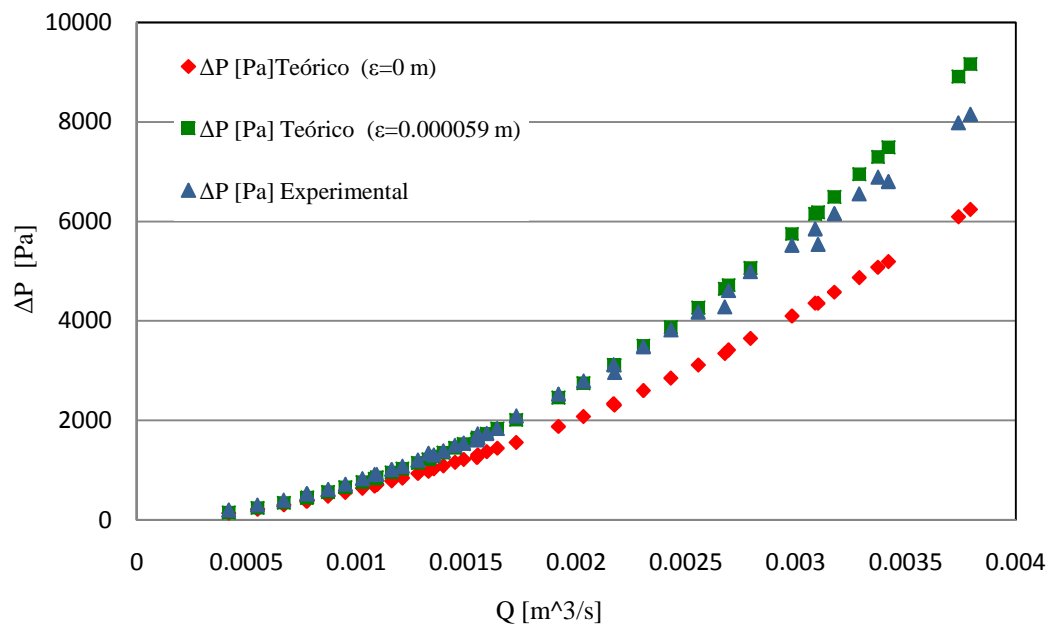


Figura A. 7 Comparación del gradiente de presión registrado por el medidor de presión diferencial y la ecuación de Darcy Weisbach.

Tabla A. 9 Análisis de la influencia de la incertidumbre del caudal y la temperatura en la medición de caída de presión.

Re	Q [m ³ /S]	ΔP [Pa] Teórico	variación de 6% en caudal		incremento en 5°C en temperatura		disminución en 5°C en temperatura	
			ΔPmax [Pa]	Error relativo [%]	ΔP [Pa]	Error relativo [%]	ΔP [Pa]	Error relativo [%]
19311	0.00042	127.0	140.7	9.72	123.8	-2.59	130.5	2.68
25363	0.00055	205.1	227.3	9.76	200.1	-2.52	210.7	2.61
30875	0.00067	290.2	321.7	9.78	283.2	-2.47	297.8	2.56
35705	0.00077	375.2	416.0	9.80	366.3	-2.44	385.0	2.53
35848	0.00078	377.9	418.9	9.80	368.9	-2.44	387.7	2.53
40204	0.00087	463.0	513.4	9.81	452.1	-2.41	474.9	2.50
43831	0.00095	539.6	598.4	9.82	527.0	-2.39	553.3	2.48
47415	0.00103	620.4	688.1	9.83	606.0	-2.38	636.1	2.46
49983	0.00108	681.3	755.7	9.84	665.6	-2.37	698.5	2.45
50453	0.00109	692.8	768.4	9.84	676.8	-2.36	710.2	2.45
53568	0.00116	770.6	854.8	9.85	752.9	-2.35	789.9	2.44
55833	0.00121	829.5	920.2	9.85	810.5	-2.34	850.2	2.43
59081	0.00128	917.4	1017.7	9.86	896.5	-2.33	940.1	2.42
61311	0.00133	980.0	1087.2	9.86	957.7	-2.32	1004.2	2.41
62431	0.00135	1012.1	1122.8	9.86	989.1	-2.32	1037.0	2.40
64440	0.00140	1070.8	1188.1	9.87	1046.6	-2.31	1097.1	2.40
66880	0.00145	1144.2	1269.5	9.87	1118.4	-2.30	1172.2	2.39
68704	0.00149	1200.5	1332.0	9.87	1173.5	-2.30	1229.8	2.38
71507	0.00155	1289.2	1430.5	9.88	1260.3	-2.29	1320.6	2.38
71639	0.00155	1293.5	1435.3	9.88	1264.5	-2.29	1325.0	2.38
71696	0.00155	1295.3	1437.3	9.88	1266.3	-2.29	1326.8	2.38
Promedio			9.84			-2.37		2.46

APÉNDICES

Apéndice A.

Determinación de los errores e incertidumbres de las mediciones de flujo volumétrico de líquido

Mediciones Directas:

Una vez determinadas las variables de medición directa, como lo son: el perímetro y espesor de los tanques, el perímetro de la manguera de suministro, los tiempos de llenado para un ΔH_{agua} y el ΔP en el medidor de presión diferencial, es necesario indicar la incertidumbre o error que acompaña dichos valores numéricos, el cual está relacionado con la dispersión de las diferentes medidas alrededor del valor medio calculado.

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

El error máximo corresponde a la semiamplitud de la distribución, y se calcula como el promedio de la diferencia entre el mayor y el menor valor obtenido. Este tipo de error se utilizó para estimar la incertidumbre asociada a la repetitividad de cada conjunto de puntos obtenidos en la calibración, tanto para el tiempo de llenado como para la caída de presión en el medidor de presión diferencial.

$$\Delta X_{Max} = \frac{\Delta X_{Max} - \Delta X_{Min}}{2} \quad (1)$$

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

$$\overline{\Delta X} = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{X} - X_i|}{n} \quad (2)$$

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

$$X = \bar{x} \pm \overline{\Delta x} \quad \text{cuando} \quad \overline{\Delta x} > \Delta x_{apr} \quad (3)$$

$$X = \bar{x} \pm \Delta x_{apr} \quad \text{cuando} \quad \overline{\Delta x} < \Delta x_{apr} \quad (4)$$

Este tipo de error se utilizó para la determinación de las incertidumbres de los perímetros de los tanques, en los cuales se realizaron alrededor de 10 mediciones.

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

$$e_{\bar{\sigma}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (5)$$

Donde:

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

$n =$ número de mediciones realizadas.

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

$$X = \bar{x} \pm \bar{e}_{\bar{x}} \quad (6)$$

Este tipo de error se utilizó para reportar las incertidumbres totales correspondientes al tiempo de llenado y a la caída de presión en el medidor de presión diferencial.

En la Tabla A. 5 se muestra el resumen de las incertidumbres relacionadas con las mediciones directas, las cuales son el punto de partida para la determinación de la incertidumbre asociada al caudal de líquido.

Mediciones indirectas:

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

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

$$\Delta Y = \frac{d f(x)}{dx} \Delta X \quad (7)$$

Donde:

$\Delta Y =$ Incertidumbre de la medición indirecta

$\Delta X =$ Incertidumbre de la medición directa

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

$$\Delta Z = \left| \frac{d f(x)}{dx} \right| |\Delta X| + \left| \frac{d f(y)}{dy} \right| |\Delta X| + \left| \frac{d f(z)}{dz} \right| |\Delta X| \quad (8)$$

$\Delta Z =$ Incertidumbre de la medición indirecta

En este sentido la determinación de la incertidumbre asociada al volumen y caudal se llevó a cabo según las siguientes relaciones:

$$\Delta V = H \Delta A + A \Delta H \quad (9)$$

Donde:

$\Delta V =$ Incertidumbre del volumen de agua

$H =$ Altura de nivel del Agua

$A =$ Área neta del tanque de calibración

$$\Delta Q = \frac{\Delta V}{t} + \frac{V}{t^2} \Delta t \quad (10)$$

Donde:

$\Delta Q =$ Incertidumbre del caudal de agua

$V =$ Volumen de Agua

$t =$ tiempo de llenado

En la Tabla A. 6 se presenta un resumen con las incertidumbres asociadas a las mediciones indirectas.

Calibración de las placas orificio.

La calibración del set de placas orificio se muestra en el Capítulo III. La placa orificio de 1/2" se calibró dividiendo el rango de caudales registrados en 2 secciones (A y B).

Tabla A. 1 % de error para la placa de 1/2"(B).

Placa de 1/2" (B)												
	Tiempo	Incertidumbre de Tiempo	Volumen de agua	Incertidumbre de Volumen	Caudal	Incertidumbre de Caudal [Ec. 27]	Incertidumbre de Caudal	ΔP		ΔH	Caudal numérico	Error relativo (φ)
	[s]	[s]	[m ³]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[KPa]	[%]	[m]	[m ³ /s]	[%]
1	58.40	0.01	0.0050	0.0002	0.000086	0.000004	4	0.70	0.28	0.05	0.00009	-6.81
2	54.49	0.01	0.0050	0.0002	0.000092	0.000004	4	0.68	0.27	0.05	0.00009	2.25
3	58.63	0.01	0.0050	0.0002	0.000085	0.000004	4	0.65	0.26	0.05	0.00009	-3.06
4	57.35	0.01	0.0050	0.0002	0.000087	0.000004	4	0.65	0.26	0.05	0.00009	-0.82
5	32.27	0.01	0.0050	0.0002	0.00016	0.00001	4	1.78	0.71	0.05	0.00015	2.81
6	33.90	0.01	0.0050	0.0002	0.00015	0.00001	4	1.73	0.69	0.05	0.00015	-0.55
7	33.21	0.01	0.0050	0.0002	0.00015	0.00001	4	1.70	0.68	0.05	0.00015	2.26
8	33.32	0.01	0.0050	0.0002	0.00015	0.00001	4	1.73	0.69	0.05	0.00015	1.17
9	43.58	0.01	0.0100	0.0002	0.00023	0.00000	2	3.75	1.5	0.1	0.00023	1.98
10	43.86	0.01	0.0100	0.0002	0.00023	0.00000	2	3.73	1.49	0.1	0.00022	1.71
11	44.12	0.01	0.0100	0.0002	0.00023	0.00000	2	3.73	1.49	0.1	0.00022	1.12
12	37.70	0.01	0.0100	0.0002	0.00027	0.00001	2	4.80	1.92	0.1	0.00026	3.22
13	39.03	0.01	0.0100	0.0002	0.00026	0.00001	2	4.60	1.84	0.1	0.00025	2.05
14	38.92	0.01	0.0100	0.0002	0.00026	0.00001	2	4.50	1.8	0.1	0.00025	3.48
15	32.63	0.01	0.0100	0.0002	0.00031	0.00001	2	6.65	2.66	0.1	0.00031	0.24
16	32.98	0.01	0.0100	0.0002	0.00030	0.00001	2	6.38	2.55	0.1	0.00030	1.42
17	33.05	0.01	0.0100	0.0002	0.00030	0.00001	2	6.10	2.44	0.1	0.00029	3.51
18	29.28	0.01	0.0100	0.0002	0.00034	0.00001	2	8.13	3.25	0.1	0.00034	0.33
19	30.07	0.01	0.0100	0.0002	0.00033	0.00001	2	8.05	3.22	0.1	0.00034	-1.87
20	29.57	0.01	0.0100	0.0002	0.00034	0.00001	2	7.98	3.19	0.1	0.00034	0.34
21	28.12	0.01	0.0100	0.0002	0.00036	0.00001	2	9.13	3.65	0.1	0.00036	-1.86
22	28.28	0.01	0.0100	0.0002	0.00035	0.00001	2	9.00	3.6	0.1	0.00036	-1.71
23	27.79	0.01	0.0100	0.0002	0.00036	0.00001	2	8.90	3.56	0.1	0.00036	0.65
24	24.48	0.01	0.0100	0.0002	0.00041	0.00001	2	11.28	4.51	0.1	0.00041	0.65
25	25.40	0.01	0.0100	0.0002	0.00039	0.00001	2	11.18	4.47	0.1	0.00040	-2.59
26	25.54	0.01	0.0100	0.0002	0.00039	0.00001	2	11.15	4.46	0.1	0.00040	-3.01
27	23.17	0.01	0.0100	0.0002	0.00043	0.00001	2	13.33	5.33	0.1	0.00044	-2.82
28	22.95	0.01	0.0100	0.0002	0.00044	0.00001	2	13.15	5.26	0.1	0.00044	-1.15
29	23.40	0.01	0.0100	0.0002	0.00043	0.00001	2	13.03	5.21	0.1	0.00044	-2.58

Promedio % error [E1]
Promedio % error absoluto [E2]
Minimo % error [φ]
Maximo % error [φ]
E3
E4

3
3
2
4

0.01
2.00
0.24
6.81
2.45
2.45

Tabla A. 2 Datos de Calibración para la placa de 1/2"(A).

Placa de 1/2" (A)												
Tiempo	Incertidumbre de Tiempo	Volumen de agua	Incertidumbre de Volumen	Caudal	Incertidumbre de Caudal [Ec. 27]	Incertidumbre de Caudal	ΔP		ΔH	Caudal numérico	Error relativo (φ)	
[s]	[s]	[m ³]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[KPa]	[%]	[m]	[m ³ /s]	[%]	
1	42.67	0.01	0.0117	0.0005	0.00027	0.00001	4	6.44	2.58	0.05	0.00028	-0.87
2	41.85	0.01	0.0117	0.0005	0.00028	0.00001	4	6.46	2.59	0.05	0.00028	0.87
3	42.11	0.01	0.0117	0.0005	0.00028	0.00001	4	6.48	2.59	0.05	0.00028	0.16
4	42.76	0.01	0.0117	0.0005	0.00027	0.00001	4	6.48	2.59	0.05	0.00028	-1.38
5	42.74	0.01	0.0117	0.0005	0.00027	0.00001	4	6.49	2.60	0.05	0.00028	-1.43
6	41.78	0.01	0.0117	0.0005	0.00028	0.00001	4	6.56	2.63	0.05	0.00028	0.26
7	32.35	0.01	0.0117	0.0005	0.00036	0.00002	4	10.40	4.16	0.05	0.00035	2.76
8	33.61	0.01	0.0117	0.0005	0.00035	0.00002	4	10.65	4.26	0.05	0.00036	-2.26
9	34.09	0.01	0.0117	0.0005	0.00034	0.00002	4	10.85	4.34	0.05	0.00036	-4.67
1	31.34	0.01	0.0117	0.0005	0.00037	0.00002	4	10.90	4.36	0.05	0.00036	3.54
2	29.89	0.01	0.0117	0.0005	0.00039	0.00002	4	12.74	5.10	0.05	0.00039	0.53
3	29.75	0.01	0.0117	0.0005	0.00039	0.00002	4	12.83	5.13	0.05	0.00039	0.67
4	30.25	0.01	0.0117	0.0005	0.00039	0.00002	4	12.89	5.16	0.05	0.00039	-1.24
5	24.27	0.01	0.0117	0.0005	0.00048	0.00002	4	19.76	7.91	0.05	0.00049	-0.64
6	24.20	0.01	0.0117	0.0005	0.00048	0.00002	4	19.81	7.93	0.05	0.00049	-0.46
7	23.87	0.01	0.0117	0.0005	0.00049	0.00002	4	19.86	7.95	0.05	0.00049	0.76
8	24.29	0.01	0.0117	0.0005	0.00048	0.00002	4	19.91	7.97	0.05	0.00049	-1.09
9	19.89	0.01	0.0117	0.0005	0.00059	0.00003	4	28.39	11.36	0.05	0.00058	1.14
10	20.03	0.01	0.0117	0.0005	0.00059	0.00003	4	28.43	11.37	0.05	0.00058	0.35
11	19.36	0.01	0.0117	0.0005	0.00061	0.00003	4	29.31	11.73	0.05	0.00059	2.21
12	20.32	0.01	0.0117	0.0005	0.00058	0.00003	4	29.50	11.80	0.05	0.00059	-2.99
13	17.35	0.01	0.0117	0.0005	0.00068	0.00003	4	38.14	15.26	0.05	0.00068	-0.01
14	17.47	0.01	0.0117	0.0005	0.00067	0.00003	4	38.26	15.31	0.05	0.00068	-0.87
15	17.57	0.01	0.0117	0.0005	0.00067	0.00003	4	38.29	15.32	0.05	0.00068	-1.48
16	17.24	0.01	0.0117	0.0005	0.00068	0.00003	4	38.33	15.33	0.05	0.00068	0.38
17	29.75	0.01	0.0234	0.0006	0.00079	0.00002	2	50.68	20.27	0.1	0.00078	1.14
18	31.00	0.01	0.0234	0.0006	0.00076	0.00002	2	51.19	20.48	0.1	0.00078	-3.54
19	29.83	0.01	0.0234	0.0006	0.00079	0.00002	2	51.25	20.50	0.1	0.00078	0.31
20	29.47	0.01	0.0234	0.0006	0.00080	0.00002	2	51.49	20.60	0.1	0.00079	1.30
21	29.52	0.01	0.0234	0.0006	0.00079	0.00002	2	51.56	20.63	0.1	0.00079	1.04
22	29.92	0.01	0.0234	0.0006	0.00078	0.00002	2	51.71	20.69	0.1	0.00079	-0.44
23	29.51	0.01	0.0234	0.0006	0.00079	0.00002	2	52.41	20.97	0.1	0.00079	0.26
24	15.19	0.01	0.0117	0.0005	0.00077	0.00003	4	52.53	21.01	0.05	0.00079	-2.79
25	29.36	0.01	0.0234	0.0006	0.00080	0.00002	2	52.69	21.08	0.1	0.00079	0.53
26	14.65	0.01	0.0117	0.0005	0.00080	0.00004	4	52.73	21.09	0.05	0.00079	0.68
27	15.09	0.01	0.0117	0.0005	0.00078	0.00003	4	52.85	21.14	0.05	0.00080	-2.39
28	14.42	0.01	0.0117	0.0005	0.00081	0.00004	4	52.85	21.14	0.05	0.00080	2.16
29	28.35	0.01	0.0234	0.0006	0.00083	0.00002	2	58.26	23.31	0.1	0.00084	-1.03
30	28.09	0.01	0.0234	0.0006	0.00083	0.00002	2	58.36	23.35	0.1	0.00084	-0.19
31	28.25	0.01	0.0234	0.0006	0.00083	0.00002	2	58.76	23.51	0.1	0.00084	-1.09
32	27.66	0.01	0.0234	0.0006	0.00085	0.00002	2	59.20	23.68	0.1	0.00084	0.64
33	27.75	0.01	0.0234	0.0006	0.00084	0.00002	2	59.46	23.79	0.1	0.00084	0.09
34	27.70	0.01	0.0234	0.0006	0.00085	0.00002	2	59.86	23.95	0.1	0.00085	-0.06
35	24.75	0.01	0.0234	0.0006	0.00095	0.00002	2	75.45	30.18	0.1	0.00095	-0.38
36	24.89	0.01	0.0234	0.0006	0.00094	0.00002	2	75.81	30.33	0.1	0.00095	-1.19
37	24.91	0.01	0.0234	0.0006	0.00094	0.00002	2	76.30	30.52	0.1	0.00096	-1.61
38	23.94	0.01	0.0234	0.0006	0.00098	0.00002	2	82.15	32.86	0.1	0.00099	-1.34
39	23.88	0.01	0.0234	0.0006	0.00098	0.00002	2	83.40	33.36	0.1	0.00100	-1.85
40	23.40	0.01	0.0234	0.0006	0.00100	0.00002	2	84.63	33.85	0.1	0.00101	-0.54
41	23.42	0.01	0.0234	0.0006	0.00100	0.00002	2	84.63	33.85	0.1	0.00101	-0.62
42	23.20	0.01	0.0234	0.0006	0.00101	0.00002	2	85.10	34.04	0.1	0.00101	0.04
43	23.40	0.01	0.0234	0.0006	0.00100	0.00002	2	85.44	34.18	0.1	0.00101	-1.02
44	23.10	0.01	0.0234	0.0006	0.00101	0.00002	2	85.78	34.31	0.1	0.00101	0.08
45	23.98	0.01	0.0234	0.0006	0.00098	0.00002	2	85.83	34.33	0.1	0.00101	-3.76
46	23.70	0.01	0.0234	0.0006	0.00099	0.00002	2	86.18	34.47	0.1	0.00102	-2.76
47	22.46	0.01	0.0234	0.0006	0.00104	0.00003	2	86.50	34.60	0.1	0.00102	2.44
48	22.72	0.01	0.0234	0.0006	0.00103	0.00003	2	87.00	34.80	0.1	0.00102	1.02
49	22.49	0.01	0.0234	0.0006	0.00104	0.00003	2	87.30	34.92	0.1	0.00102	1.85
50	22.91	0.01	0.0234	0.0006	0.00102	0.00002	2	91.48	36.59	0.1	0.00105	-2.35

Tabla A. 2 Datos de Calibración para la placa de 1/2"(A).(Continuación)

Placa de 1/2" (A)												
	Tiempo	Incertidumbre de Tiempo	Volumen de agua	Incertidumbre de Volumen	Caudal	Incertidumbre de Caudal [Ec. 27]	Incertidumbre de Caudal	ΔP		ΔH	Caudal numérico	Error relativo (φ)
	[s]	[s]	[m³]	[m³]	[m³/s]	[m³/s]	[%]	[KPa]	[%]	[m]	[m³/s]	[%]
51	22.05	0.01	0.0234	0.0006	0.00106	0.00003	2	93.95	37.58	0.1	0.00106	0.17
52	22.63	0.01	0.0234	0.0006	0.00104	0.00003	2	96.33	38.53	0.1	0.00107	-3.75
53	21.89	0.01	0.0234	0.0006	0.00107	0.00003	2	98.05	39.22	0.1	0.00108	-1.25
54	21.54	0.01	0.0234	0.0006	0.00109	0.00003	2	99.88	39.95	0.1	0.00109	-0.56
55	20.28	0.01	0.0234	0.0006	0.00116	0.00003	2	111.93	44.77	0.1	0.00116	-0.23
56	20.26	0.01	0.0234	0.0006	0.00116	0.00003	2	112.24	44.90	0.1	0.00116	-0.27
57	20.09	0.01	0.0234	0.0006	0.00117	0.00003	2	112.38	44.95	0.1	0.00116	0.53
58	20.32	0.01	0.0234	0.0006	0.00115	0.00003	2	112.71	45.09	0.1	0.00116	-0.78
59	19.86	0.01	0.0234	0.0006	0.00118	0.00003	2	112.79	45.12	0.1	0.00116	1.49
60	20.05	0.01	0.0234	0.0006	0.00117	0.00003	2	116.75	46.7	0.1	0.00118	-1.21
61	20.28	0.01	0.0234	0.0006	0.00116	0.00003	2	118.81	47.525	0.1	0.00119	-3.28
62	19.64	0.01	0.0234	0.0006	0.00119	0.00003	2	120.78	48.31	0.1	0.00120	-0.84
63	19.43	0.01	0.0234	0.0006	0.00121	0.00003	2	122.80	49.12	0.1	0.00121	-0.60
64	19.25	0.01	0.0234	0.0006	0.00122	0.00003	2	124.59	49.835	0.1	0.00122	-0.39
65	18.97	0.01	0.0234	0.0006	0.00124	0.00003	2	124.73	49.89	0.1	0.00122	1.04
66	19.15	0.01	0.0234	0.0006	0.00122	0.00003	2	125.40	50.16	0.1	0.00123	-0.19
67	19.00	0.01	0.0234	0.0006	0.00123	0.00003	2	126.51	50.61	0.1	0.00123	0.15
68	18.86	0.01	0.0234	0.0006	0.00124	0.00003	2	127.40	50.96	0.1	0.00124	0.54
69	18.04	0.01	0.0234	0.0006	0.00130	0.00003	2	144.00	57.6	0.1	0.00131	-1.16
70	18.1	0.01	0.0234	0.0006	0.00129	0.00003	2	146.90	58.76	0.1	0.00133	-2.51
71	17.27	0.01	0.0234	0.0006	0.00136	0.00003	2	148.46	59.39	0.1	0.00133	1.67
72	17.63	0.01	0.0234	0.0006	0.00133	0.00003	2	148.58	59.43	0.1	0.00133	-0.41
73	17.39	0.01	0.0234	0.0006	0.00135	0.00003	2	148.75	59.50	0.1	0.00134	0.92
74	17.43	0.01	0.0234	0.0006	0.00134	0.00003	2	148.96	59.59	0.1	0.00134	0.62
75	17.43	0.01	0.0234	0.0006	0.00134	0.00003	2	148.99	59.60	0.1	0.00134	0.58
76	17.9	0.01	0.0234	0.0006	0.00131	0.00003	2	149.28	59.71	0.1	0.00134	-2.20
77	17.76	0.01	0.0234	0.0006	0.00132	0.00003	2	152.28	60.91	0.1	0.00135	-2.41
78	17.34	0.01	0.0234	0.0006	0.00135	0.00003	2	154.63	61.85	0.1	0.00136	-0.76
79	17.19	0.01	0.0234	0.0006	0.00136	0.00003	2	161.20	64.48	0.1	0.00139	-2.00
80	16.94	0.01	0.0234	0.0006	0.00138	0.00003	2	162.06	64.83	0.1	0.00139	-0.75
81	16.49	0.01	0.0234	0.0006	0.00142	0.00003	2	162.15	64.86	0.1	0.00139	1.90
82	16.61	0.01	0.0234	0.0006	0.00141	0.00003	2	162.38	64.95	0.1	0.00140	1.12
83	17.13	0.01	0.0234	0.0006	0.00137	0.00003	2	163.54	65.42	0.1	0.00140	-2.38
84	16.30	0.01	0.0234	0.0006	0.00144	0.00004	2	168.54	67.42	0.1	0.00142	1.10
85	15.97	0.01	0.0234	0.0006	0.00147	0.00004	2	172.41	68.97	0.1	0.00144	2.03
86	16.14	0.01	0.0234	0.0006	0.00145	0.00004	2	173.30	69.32	0.1	0.00144	0.73
87	16.08	0.01	0.0234	0.0006	0.00146	0.00004	2	174.31	69.73	0.1	0.00145	0.78
88	16.33	0.01	0.0234	0.0006	0.00144	0.00004	2	176.26	70.51	0.1	0.00145	-1.30
89	15.54	0.01	0.0234	0.0006	0.00151	0.00004	2	183.76	73.51	0.1	0.00148	1.54
90	15.79	0.01	0.0234	0.0006	0.00148	0.00004	2	186.90	74.76	0.1	0.00150	-0.90
91	15.66	0.01	0.0234	0.0006	0.00150	0.00004	2	187.53	75.01	0.1	0.00150	-0.20
92	15.43	0.01	0.0234	0.0006	0.00152	0.00004	2	188.15	75.26	0.1	0.00150	1.07
93	15.89	0.01	0.0234	0.0006	0.00147	0.00004	2	188.19	75.28	0.1	0.00150	-1.88
94	14.59	0.01	0.0234	0.0006	0.00161	0.00004	2	212.08	84.83	0.1	0.00160	0.71
95	14.53	0.01	0.0234	0.0006	0.00161	0.00004	2	212.09	84.84	0.1	0.00160	1.12

Promedio % error [E1]
Promedio % error absoluto [E2]
Minimo % error [φ]
Maximo % error [φ]
E3
E4

1
3
2
5

-0.32
1.23
0.01
4.67
1.53
1.57

Tabla A. 3 Datos de calibración para la placa de 3/4".

Placa de 3/4"												
	Tiempo	Incertidumbre de Tiempo	Volumen de agua	Incertidumbre de Volumen	Caudal	Incertidumbre de Caudal [Ec. 27]	Incertidumbre de Caudal	ΔP		ΔH	Caudal numérico	Error relativo (φ)
	[s]	[s]	[m ³]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[KPa]	[%]	[m]	[m ³ /s]	[%]
1	17.53	0.01	0.0117	0.0005	0.00067	0.00003	4	9.10	3.64	0.05	0.00065	2.59
2	17.92	0.01	0.0117	0.0005	0.00065	0.00003	4	9.06	3.63	0.05	0.00065	0.63
3	17.93	0.01	0.0117	0.0005	0.00065	0.00003	4	9.08	3.63	0.05	0.00065	0.50
4	19.38	0.01	0.0117	0.0005	0.00060	0.00003	4	8.30	3.32	0.05	0.00062	-2.83
5	19.27	0.01	0.0117	0.0005	0.00061	0.00003	4	7.61	3.05	0.05	0.00060	2.09
6	19.26	0.01	0.0117	0.0005	0.00061	0.00003	4	7.59	3.04	0.05	0.00059	2.31
7	19.53	0.01	0.0117	0.0005	0.00060	0.00003	4	7.58	3.03	0.05	0.00059	1.02
8	15.01	0.01	0.0117	0.0005	0.00078	0.00003	4	12.49	5.00	0.05	0.00076	2.24
9	14.86	0.01	0.0117	0.0005	0.00079	0.00004	4	12.49	5.00	0.05	0.00076	3.21
10	14.98	0.01	0.0117	0.0005	0.00078	0.00003	4	12.48	4.99	0.05	0.00076	2.48
11	15.36	0.01	0.0117	0.0005	0.00076	0.00003	4	12.36	4.95	0.05	0.00076	0.46
12	14.79	0.01	0.0117	0.0005	0.00079	0.00004	4	12.25	4.90	0.05	0.00076	4.59
13	15.04	0.01	0.0117	0.0005	0.00078	0.00003	4	12.26	4.91	0.05	0.00076	2.93
14	14.89	0.01	0.0117	0.0005	0.00079	0.00004	4	12.31	4.93	0.05	0.00076	3.70
15	9.95	0.01	0.0117	0.0005	0.00118	0.00005	4	28.94	11.58	0.05	0.00116	1.20
16	9.95	0.01	0.0117	0.0005	0.00118	0.00005	4	28.91	11.57	0.05	0.00116	1.24
17	9.77	0.01	0.0117	0.0005	0.00120	0.00005	4	28.94	11.58	0.05	0.00116	2.99
18	9.73	0.01	0.0117	0.0005	0.00120	0.00005	4	28.76	11.51	0.05	0.00116	3.68
19	10.12	0.01	0.0117	0.0005	0.00116	0.00005	4	28.55	11.42	0.05	0.00116	0.19
20	10.08	0.01	0.0117	0.0005	0.00116	0.00005	4	28.60	11.44	0.05	0.00116	0.50
21	17.54	0.01	0.0234	0.0006	0.00134	0.00003	2	38.38	15.35	0.1	0.00134	-0.33
22	16.91	0.01	0.0234	0.0006	0.00139	0.00003	2	38.31	15.33	0.1	0.00134	3.35
23	16.93	0.01	0.0234	0.0006	0.00138	0.00003	2	38.25	15.30	0.1	0.00134	3.31
24	17.15	0.01	0.0234	0.0006	0.00137	0.00003	2	38.15	15.26	0.1	0.00134	2.19
25	17.08	0.01	0.0234	0.0006	0.00137	0.00003	2	38.01	15.21	0.1	0.00133	2.76
26	16.99	0.01	0.0234	0.0006	0.00138	0.00003	2	37.91	15.17	0.1	0.00133	3.40
27	14.72	0.01	0.0234	0.0006	0.00159	0.00004	2	52.01	20.81	0.1	0.00156	1.92
28	14.32	0.01	0.0234	0.0006	0.00164	0.00004	2	51.84	20.74	0.1	0.00156	4.74
29	15.06	0.01	0.0234	0.0006	0.00156	0.00004	2	51.81	20.73	0.1	0.00156	-0.15
30	14.66	0.01	0.0234	0.0006	0.00160	0.00004	2	51.65	20.66	0.1	0.00156	2.66
31	14.76	0.01	0.0234	0.0006	0.00159	0.00004	2	51.50	20.60	0.1	0.00155	2.14
32	13.12	0.01	0.0234	0.0006	0.00179	0.00004	2	64.88	25.95	0.1	0.00174	2.33
33	12.97	0.01	0.0234	0.0006	0.00181	0.00004	2	64.60	25.84	0.1	0.00174	3.65
34	13.04	0.01	0.0234	0.0006	0.00180	0.00004	2	64.35	25.74	0.1	0.00174	3.32
35	13.09	0.01	0.0234	0.0006	0.00179	0.00004	2	64.38	25.75	0.1	0.00174	2.93
36	13.27	0.01	0.0234	0.0006	0.00177	0.00004	2	64.14	25.66	0.1	0.00173	1.78
37	12.91	0.01	0.0234	0.0006	0.00182	0.00004	2	74.03	29.61	0.1	0.00186	-2.69
38	12.85	0.01	0.0234	0.0006	0.00182	0.00004	2	73.75	29.50	0.1	0.00186	-2.02
39	12.63	0.01	0.0234	0.0006	0.00186	0.00005	2	73.56	29.43	0.1	0.00186	-0.14
40	12.38	0.01	0.0234	0.0006	0.00189	0.00005	2	73.39	29.36	0.1	0.00186	1.95
41	12.30	0.01	0.0234	0.0006	0.00191	0.00005	2	73.08	29.23	0.1	0.00185	2.80
42	12.23	0.01	0.0234	0.0006	0.00192	0.00005	2	72.69	29.08	0.1	0.00185	3.61
43	11.32	0.01	0.0234	0.0006	0.00207	0.00005	2	88.54	35.42	0.1	0.00204	1.50
44	11.33	0.01	0.0234	0.0006	0.00207	0.00005	2	88.31	35.33	0.1	0.00204	1.54
45	11.16	0.01	0.0234	0.0006	0.00210	0.00005	2	88.14	35.26	0.1	0.00203	3.11
46	11.11	0.01	0.0234	0.0006	0.00211	0.00005	2	87.95	35.18	0.1	0.00203	3.65
47	10.97	0.01	0.0234	0.0006	0.00214	0.00005	2	89.39	35.76	0.1	0.00205	4.08
48	11.36	0.01	0.0234	0.0006	0.00206	0.00005	2	88.84	35.54	0.1	0.00204	0.98
49	11.01	0.01	0.0234	0.0006	0.00213	0.00005	2	88.54	35.42	0.1	0.00204	4.19
50	11.40	0.01	0.0234	0.0006	0.00206	0.00005	2	88.49	35.40	0.1	0.00204	0.83

Tabla A. 3 Datos de calibración para la placa de ¾". (Continuación)

Placa de 3/4"												
	Tiempo	Incertidumbre de Tiempo	Volumen de agua	Incertidumbre de Volumen	Caudal	Incertidumbre de Caudal [Ec. 27]	Incertidumbre de Caudal	ΔP		ΔH	Caudal numérico	Error relativo (φ)
	[s]	[s]	[m ³]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[KPa]	[%]	[m]	[m ³ /s]	[%]
51	10.63	0.01	0.0234	0.0006	0.00220	0.00005	2	100.99	40.40	0.1	0.00218	1.19
52	10.73	0.01	0.0234	0.0006	0.00218	0.00005	2	100.84	40.34	0.1	0.00218	0.33
53	10.33	0.01	0.0234	0.0006	0.00227	0.00006	2	100.38	40.15	0.1	0.00217	4.27
54	10.21	0.01	0.0234	0.0006	0.00230	0.00006	2	99.89	39.96	0.1	0.00217	5.61
55	10.83	0.01	0.0234	0.0006	0.00216	0.00005	2	99.70	39.88	0.1	0.00216	-0.02
56	10.52	0.01	0.0234	0.0006	0.00223	0.00006	2	99.55	39.82	0.1	0.00216	2.91
57	9.68	0.01	0.0234	0.0006	0.00242	0.00006	2	117.94	47.18	0.1	0.00235	2.73
58	9.77	0.01	0.0234	0.0006	0.00240	0.00006	2	117.78	47.11	0.1	0.00235	1.90
59	9.83	0.01	0.0234	0.0006	0.00238	0.00006	2	117.63	47.05	0.1	0.00235	1.36
60	13.39	0.01	0.0352	0.0006	0.00263	0.00005	2	134.49	53.80	0.15	0.00252	4.19
61	8.94	0.01	0.0234	0.0006	0.00262	0.00007	3	134.18	53.67	0.1	0.00251	4.16
62	9.43	0.01	0.0234	0.0006	0.00249	0.00006	2	133.90	53.56	0.1	0.00251	-0.99
63	9.12	0.01	0.0234	0.0006	0.00257	0.00006	2	133.59	53.44	0.1	0.00251	2.45
64	9.25	0.01	0.0234	0.0006	0.00253	0.00006	2	133.41	53.37	0.1	0.00251	1.12
65	13.59	0.01	0.0352	0.0006	0.00259	0.00005	2	134.10	53.64	0.15	0.00251	2.90
66	22.56	0.01	0.0586	0.0007	0.00260	0.00003	1	136.61	54.65	0.25	0.00254	2.38
67	22.83	0.01	0.0586	0.0007	0.00257	0.00003	1	135.68	54.27	0.25	0.00253	1.56
68	22.41	0.01	0.0586	0.0007	0.00261	0.00003	1	136.45	54.58	0.25	0.00253	3.11
69	22.46	0.01	0.0586	0.0007	0.00261	0.00003	1	135.34	54.14	0.25	0.00252	3.27
70	22.72	0.01	0.0586	0.0007	0.00258	0.00003	1	134.01	53.61	0.25	0.00251	2.64
71	17.54	0.01	0.0469	0.0007	0.00267	0.00004	1	153.56	61.43	0.2	0.00269	-0.60
72	17.08	0.01	0.0469	0.0007	0.00274	0.00004	1	152.88	61.15	0.2	0.00268	2.26
73	17.31	0.01	0.0469	0.0007	0.00271	0.00004	1	152.33	60.93	0.2	0.00268	1.12
74	16.76	0.01	0.0469	0.0007	0.00280	0.00004	1	159.75	63.90	0.2	0.00274	1.95
75	16.44	0.01	0.0469	0.0007	0.00285	0.00004	1	163.58	65.43	0.2	0.00277	2.67
76	16.55	0.01	0.0469	0.0007	0.00283	0.00004	1	163.95	65.58	0.2	0.00278	1.91
77	16.46	0.01	0.0469	0.0007	0.00285	0.00004	1	163.09	65.24	0.2	0.00277	2.70
78	16.62	0.01	0.0469	0.0007	0.00282	0.00004	1	162.00	64.80	0.2	0.00276	2.08
79	15.80	0.01	0.0469	0.0007	0.00297	0.00004	1	173.26	69.31	0.2	0.00286	3.72
80	16.26	0.01	0.0469	0.0007	0.00288	0.00004	1	172.43	68.97	0.2	0.00285	1.16
81	16.01	0.01	0.0469	0.0007	0.00293	0.00004	1	171.40	68.56	0.2	0.00284	2.97
82	15.37	0.01	0.0469	0.0007	0.00305	0.00004	1	187.65	75.06	0.2	0.00297	2.51
83	15.60	0.01	0.0469	0.0007	0.00300	0.00004	1	186.49	74.60	0.2	0.00296	1.36
84	15.47	0.01	0.0469	0.0007	0.00303	0.00004	1	185.73	74.29	0.2	0.00296	2.39
85	15.28	0.01	0.0469	0.0007	0.00307	0.00004	1	199.96	79.99	0.2	0.00307	-0.06
86	14.94	0.01	0.0469	0.0007	0.00314	0.00005	1	198.88	79.55	0.2	0.00306	2.44
87	15.03	0.01	0.0469	0.0007	0.00312	0.00005	1	197.46	78.99	0.2	0.00305	2.20
88	15.05	0.01	0.0469	0.0007	0.00311	0.00005	1	213.71	85.49	0.2	0.00317	-1.89
89	14.83	0.01	0.0469	0.0007	0.00316	0.00005	1	212.19	84.88	0.2	0.00316	-0.04
90	14.55	0.01	0.0469	0.0007	0.00322	0.00005	1	210.55	84.22	0.2	0.00315	2.26
91	14.26	0.01	0.0469	0.0007	0.00329	0.00005	1	226.41	90.57	0.2	0.00327	0.65
92	14.18	0.01	0.0469	0.0007	0.00331	0.00005	1	225.20	90.08	0.2	0.00326	1.48
93	14.05	0.01	0.0469	0.0007	0.00334	0.00005	1	224.03	89.61	0.2	0.00325	2.64
94	13.65	0.01	0.0469	0.0007	0.00343	0.00005	1	237.0375	94.82	0.2	0.00334	2.63
95	13.786667	0.01	0.0469	0.0007	0.00340	0.00005	1	235.475	94.19	0.2	0.00333	2.01
96	13.91	0.01	0.0469	0.0007	0.00337	0.00005	1	233.925	93.57	0.2	0.00332	1.46
97	16.83	0.01	0.0586	0.0007	0.00348	0.00004	1	246.8875	98.755	0.25	0.00341	2.00
98	17.14	0.01	0.0586	0.0007	0.00342	0.00004	1	244.9125	97.965	0.25	0.00340	0.60

Promedio % error [E1]
Promedio % error absoluto [E2]
Mínimo % error [φ]
Máximo % error [φ]
E3
E4

1
1
1
4

1.97
2.21
0.02
5.61
1.57
2.53

Tabla A. 4 Datos de calibración para la placa de 1”.

Placa de 1"												
	Tiempo	Incertidumbre de Tiempo	Volumen de agua	Incertidumbre de Volumen	Caudal	Incertidumbre de Caudal [Ec. 27]	Incertidumbre de Caudal	ΔP		ΔH	Caudal numérico	Error relativo (φ)
	[s]	[s]	[m ³]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[KPa]	[%]	[m]	[m ³ /s]	[%]
1	24.36	0.01	0.0234	0.0006	0.000962	0.00002	2	4.85	1.94	0.1	0.00096	-0.28
2	24.53	0.01	0.0234	0.0006	0.000955	0.00002	2	4.89	1.955	0.1	0.00097	-1.37
3	24.39	0.01	0.0234	0.0006	0.000961	0.00002	2	4.94	1.975	0.1	0.00097	-1.27
4	24.63	0.01	0.0234	0.0006	0.000952	0.00002	2	4.96	1.985	0.1	0.00098	-2.53
5	14.44	0.01	0.0234	0.0006	0.001623	0.00004	2	13.79	5.515	0.1	0.00162	0.36
6	14.67	0.01	0.0234	0.0006	0.001598	0.00004	2	13.79	5.515	0.1	0.00162	-1.19
7	14.25	0.01	0.0234	0.0006	0.001645	0.00004	2	13.80	5.52	0.1	0.00162	1.63
8	14.53	0.01	0.0234	0.0006	0.001613	0.00004	2	13.84	5.535	0.1	0.00162	-0.44
9	52.45	0.01	0.1172	0.0009	0.002234	0.00002	1	25.30	10.12	0.5	0.00218	2.30
10	52.76	0.01	0.1172	0.0009	0.002221	0.00002	1	25.30	10.12	0.5	0.00218	1.71
11	53.03	0.01	0.1172	0.0009	0.002210	0.00002	1	25.48	10.19	0.5	0.00219	0.87
12	52.32	0.01	0.1172	0.0009	0.002240	0.00002	1	26.15	10.46	0.5	0.00222	0.93
13	45.43	0.01	0.1172	0.0009	0.002580	0.00002	1	35.08	14.03	0.5	0.00257	0.54
14	45.34	0.01	0.1172	0.0009	0.002585	0.00002	1	35.44	14.175	0.5	0.00258	0.23
15	43.99	0.01	0.1172	0.0009	0.002664	0.00002	1	37.55	15.02	0.5	0.00265	0.40
16	44.27	0.01	0.1172	0.0009	0.002647	0.00002	1	38.13	15.25	0.5	0.00267	-0.99
17	39.85	0.01	0.1172	0.0009	0.002940	0.00002	1	46.14	18.455	0.5	0.00294	0.09
18	39.21	0.01	0.1172	0.0009	0.002988	0.00002	1	46.60	18.64	0.5	0.00295	1.21
19	46.10	0.01	0.1406	0.0010	0.003050	0.00002	1	49.00	19.6	0.6	0.00303	0.77
20	38.03	0.01	0.1172	0.0009	0.003082	0.00003	1	50.63	20.25	0.5	0.00308	0.19
21	37.56	0.01	0.1172	0.0009	0.003120	0.00003	1	51.30	20.52	0.5	0.00310	0.77
22	33.72	0.01	0.1172	0.0009	0.003476	0.00003	1	64.08	25.63	0.5	0.00346	0.57
23	33.55	0.01	0.1172	0.0009	0.003493	0.00003	1	64.15	25.66	0.5	0.00346	1.01
24	33.32	0.01	0.1172	0.0009	0.003517	0.00003	1	65.11	26.045	0.5	0.00348	0.95
25	33.58	0.01	0.1172	0.0009	0.003490	0.00003	1	65.30	26.12	0.5	0.00349	0.05
26	38.14	0.01	0.1406	0.0010	0.003687	0.00003	1	73.60	29.44	0.6	0.00370	-0.38
27	37.58	0.01	0.1406	0.0010	0.003742	0.00003	1	74.19	29.675	0.6	0.00372	0.70
28	37.69	0.01	0.1406	0.0010	0.003731	0.00003	1	74.24	29.695	0.6	0.00372	0.38
29	35.17	0.01	0.1406	0.0010	0.003998	0.00003	1	86.04	34.415	0.6	0.00400	0.01
30	35.02	0.01	0.1406	0.0010	0.004016	0.00003	1	86.10	34.44	0.6	0.00400	0.41
31	35.16	0.01	0.1406	0.0010	0.003999	0.00003	1	86.13	34.45	0.6	0.00400	-0.01
32	32.38	0.01	0.1406	0.0010	0.004343	0.00003	1	98.81	39.525	0.6	0.00428	1.43
33	32.43	0.01	0.1406	0.0010	0.004336	0.00003	1	99.18	39.67	0.6	0.00429	1.09
34	32.35	0.01	0.1406	0.0010	0.004347	0.00003	1	99.49	39.795	0.6	0.00430	1.18
35	31.13	0.01	0.1406	0.0010	0.004517	0.00003	1	111.44	44.575	0.6	0.00454	-0.58
36	30.16	0.01	0.1406	0.0010	0.004663	0.00004	1	114.54	45.815	0.6	0.00461	1.24
37	30.29	0.01	0.1406	0.0010	0.004642	0.00004	1	114.73	45.89	0.6	0.00461	0.71
38	29.52	0.01	0.1406	0.0010	0.004763	0.00004	1	121.90	48.76	0.6	0.00475	0.30
39	29.24	0.01	0.1406	0.0010	0.004809	0.00004	1	121.94	48.775	0.6	0.00475	1.23
40	29.47	0.01	0.1406	0.0010	0.004772	0.00004	1	123.68	49.47	0.6	0.00478	-0.23
41	27.78	0.01	0.1406	0.0010	0.005063	0.00004	1	137.89	55.155	0.6	0.00505	0.30
42	27.56	0.01	0.1406	0.0010	0.005102	0.00004	1	139.28	55.71	0.6	0.00507	0.58
43	27.48	0.01	0.1406	0.0010	0.005118	0.00004	1	141.38	56.55	0.6	0.00511	0.15
44	27.26	0.01	0.1406	0.0010	0.005158	0.00004	1	143.68	57.47	0.6	0.00515	0.14
45	26.97	0.01	0.1406	0.0010	0.005214	0.00004	1	144.40	57.76	0.6	0.00516	0.95
46	27.62	0.01	0.1406	0.0010	0.005092	0.00004	1	145.06	58.025	0.6	0.00518	-1.65
47	26.25	0.01	0.1406	0.0010	0.005357	0.00004	1	158.53	63.41	0.6	0.00541	-0.96
48	26.12	0.01	0.1406	0.0010	0.005383	0.00004	1	159.69	63.875	0.6	0.00543	-0.82
49	25.89	0.01	0.1406	0.0010	0.005432	0.00004	1	160.94	64.375	0.6	0.00545	-0.30
50	24.39	0.01	0.1406	0.0010	0.005766	0.00004	1	178.46	71.385	0.6	0.00573	0.56

Tabla A. 4 de Datos de calibración para la placa de 1". (Continuación)

Placa de 1"												
	Tiempo	Incertidumbre de Tiempo	Volumen de agua	Incertidumbre de Volumen	Caudal	Incertidumbre de Caudal [Ec. 27]	Incertidumbre de Caudal	ΔP		ΔH	Caudal numérico	Error relativo (φ)
	[s]	[s]	[m ³]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]	[KPa]	[%]	[m]	[m ³ /s]	[%]
51	24.39	0.01	0.1406	0.0010	0.005766	0.00004	1	183.41	73.365	0.6	0.00581	-0.79
52	24.67	0.01	0.1406	0.0010	0.005701	0.00004	1	184.65	73.86	0.6	0.00583	-2.29
53	24.20	0.01	0.1406	0.0010	0.005812	0.00004	1	188.55	75.42	0.6	0.00589	-1.38
54	23.60	0.01	0.1406	0.0010	0.005959	0.00005	1	189.26	75.705	0.6	0.00590	0.95
55	24.11	0.01	0.1406	0.0010	0.005832	0.00004	1	189.78	75.91	0.6	0.00591	-1.35
56	23.72	0.01	0.1406	0.0010	0.005928	0.00005	1	196.19	78.475	0.6	0.00601	-1.36
57	23.36	0.01	0.1406	0.0010	0.006019	0.00005	1	201.84	80.735	0.6	0.00609	-1.24
58	23.50	0.01	0.1406	0.0010	0.005984	0.00005	1	202.50	81	0.6	0.00610	-2.01
59	22.78	0.01	0.1406	0.0010	0.006174	0.00005	1	210.91	84.365	0.6	0.00623	-0.87
60	22.85	0.01	0.1406	0.0010	0.006155	0.00005	1	211.61	84.645	0.6	0.00624	-1.35
61	23.09	0.01	0.1406	0.0010	0.006091	0.00005	1	211.98	84.79	0.6	0.00624	-2.50
62	22.03	0.01	0.1406	0.0010	0.006383	0.00005	1	221.63	88.65	0.6	0.00638	0.01
63	18.44	0.01	0.1172	0.0009	0.006355	0.00005	1	225.31	90.125	0.5	0.00643	-1.26
64	18.78	0.01	0.1172	0.0009	0.006239	0.00005	1	227.21	90.885	0.5	0.00646	-3.55
65	17.43	0.01	0.1172	0.0009	0.006725	0.00006	1	240.75	96.3	0.5	0.00665	1.13
66	17.35	0.01	0.1172	0.0009	0.006754	0.00006	1	241.34	96.535	0.5	0.00666	1.44
67	17.21	0.01	0.1172	0.0009	0.006809	0.00006	1	242.08	96.83	0.5	0.00667	2.09
68	16.97	0.01	0.1172	0.0009	0.006905	0.00006	1	245.49	98.195	0.5	0.00671	2.78
69	17.04	0.01	0.1172	0.0009	0.006879	0.00006	1	248.76	99.505	0.5	0.00676	1.77
70	17.19	0.01	0.1172	0.0009	0.006817	0.00006	1	249.28	99.71	0.5	0.00676	0.77
Promedio % error [E1]							1				0.06	
Promedio % error absoluto [E2]							1				1.00	
Minimo % error [φ]							1				0.01	
Maximo % error [φ]							2				3.55	
E3											1.24	
E4											1.24	

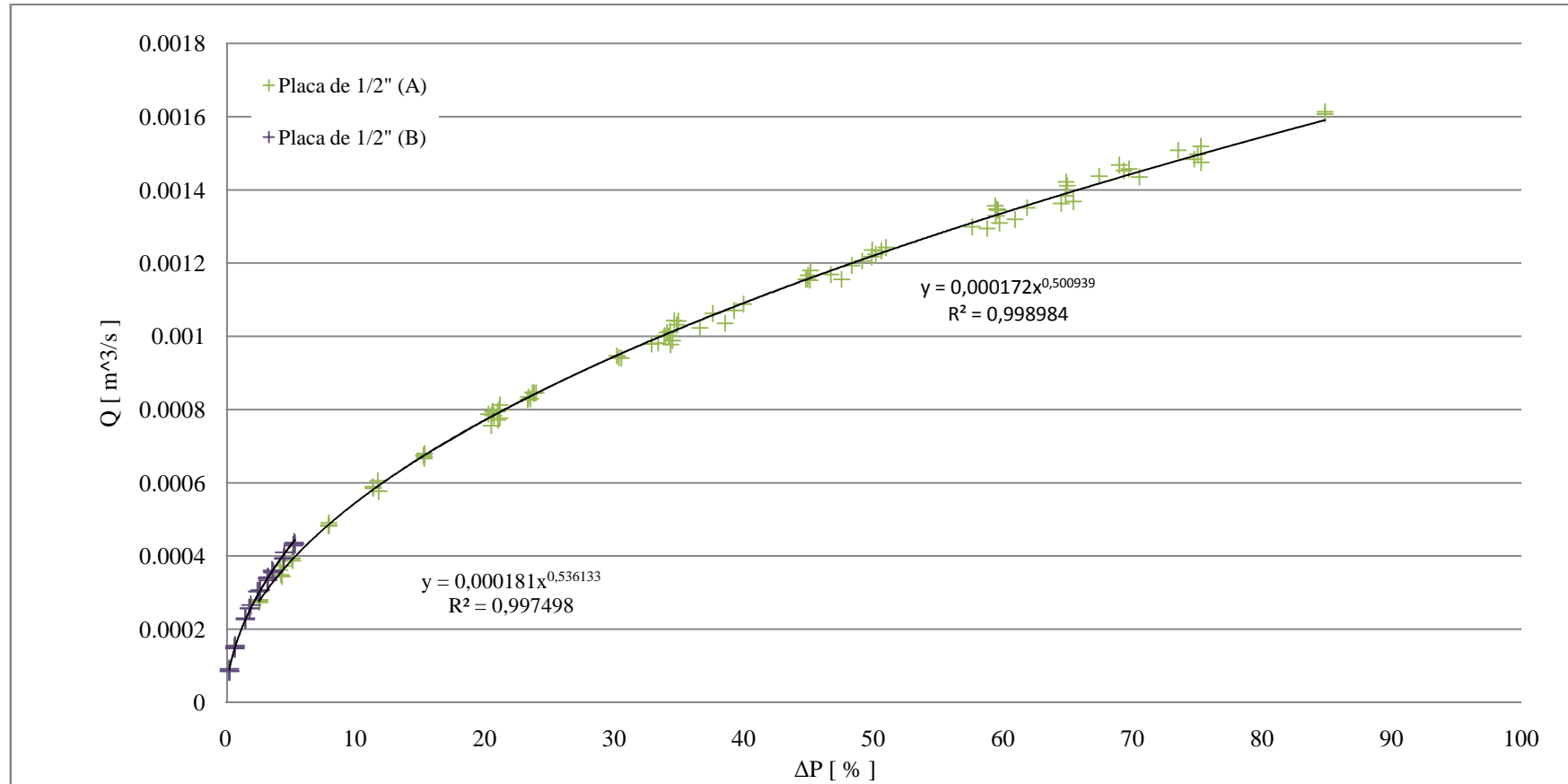


Figura A. 1 Curva de Calibración para la placa orificio de 1/2".

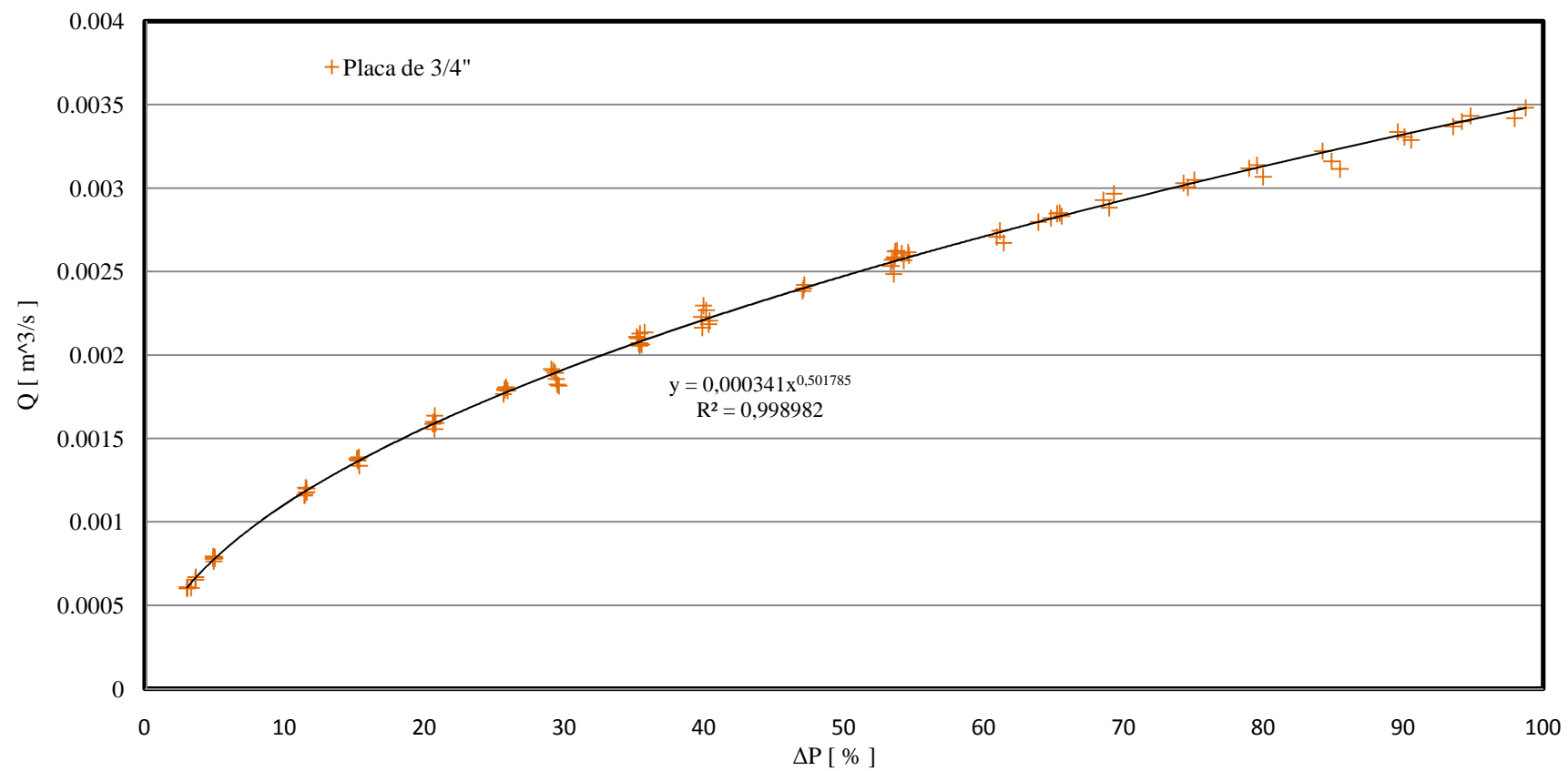


Figura A. 2 Curva de Calibración para la placa orificio de $3/4''$.

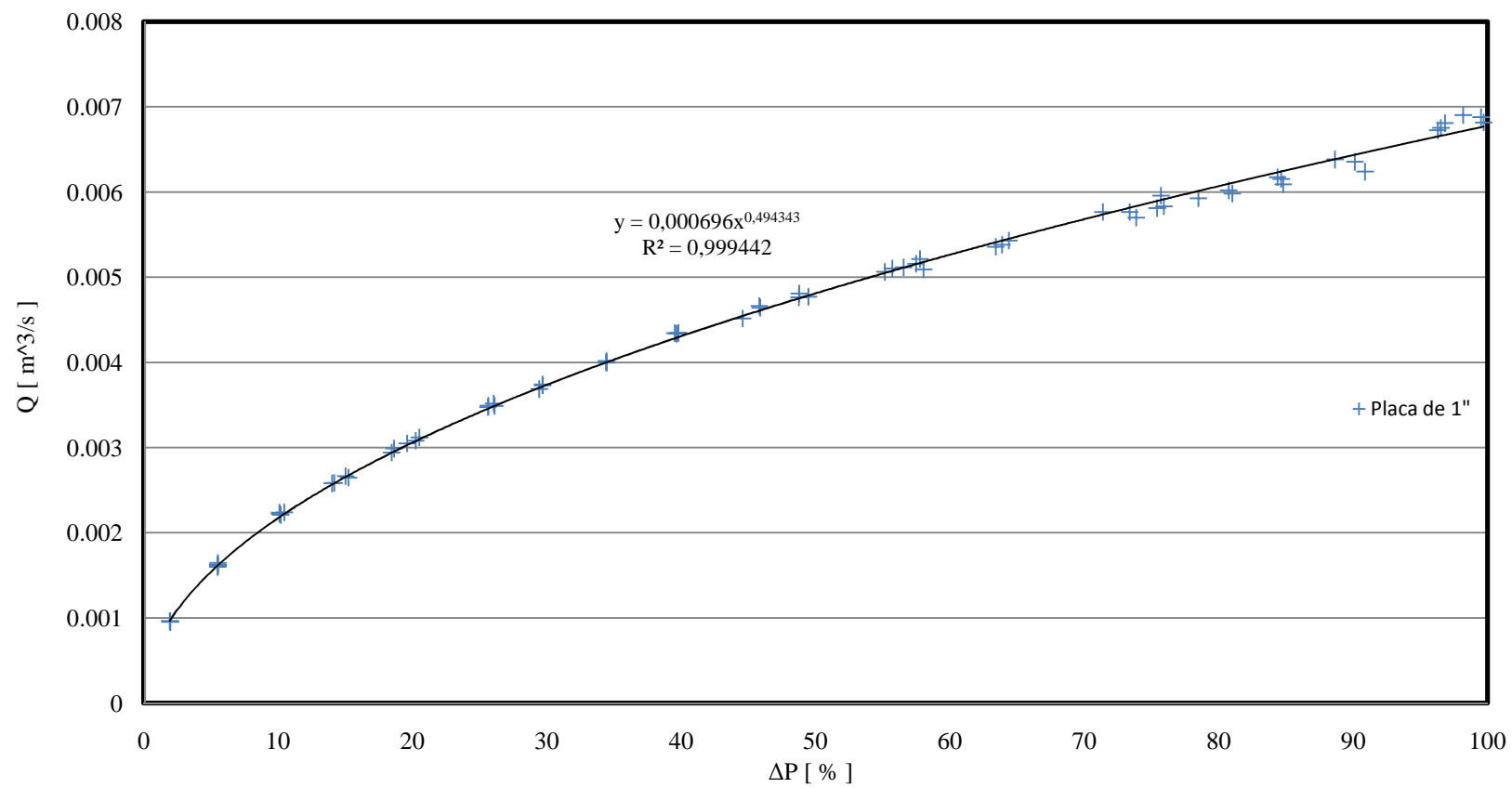


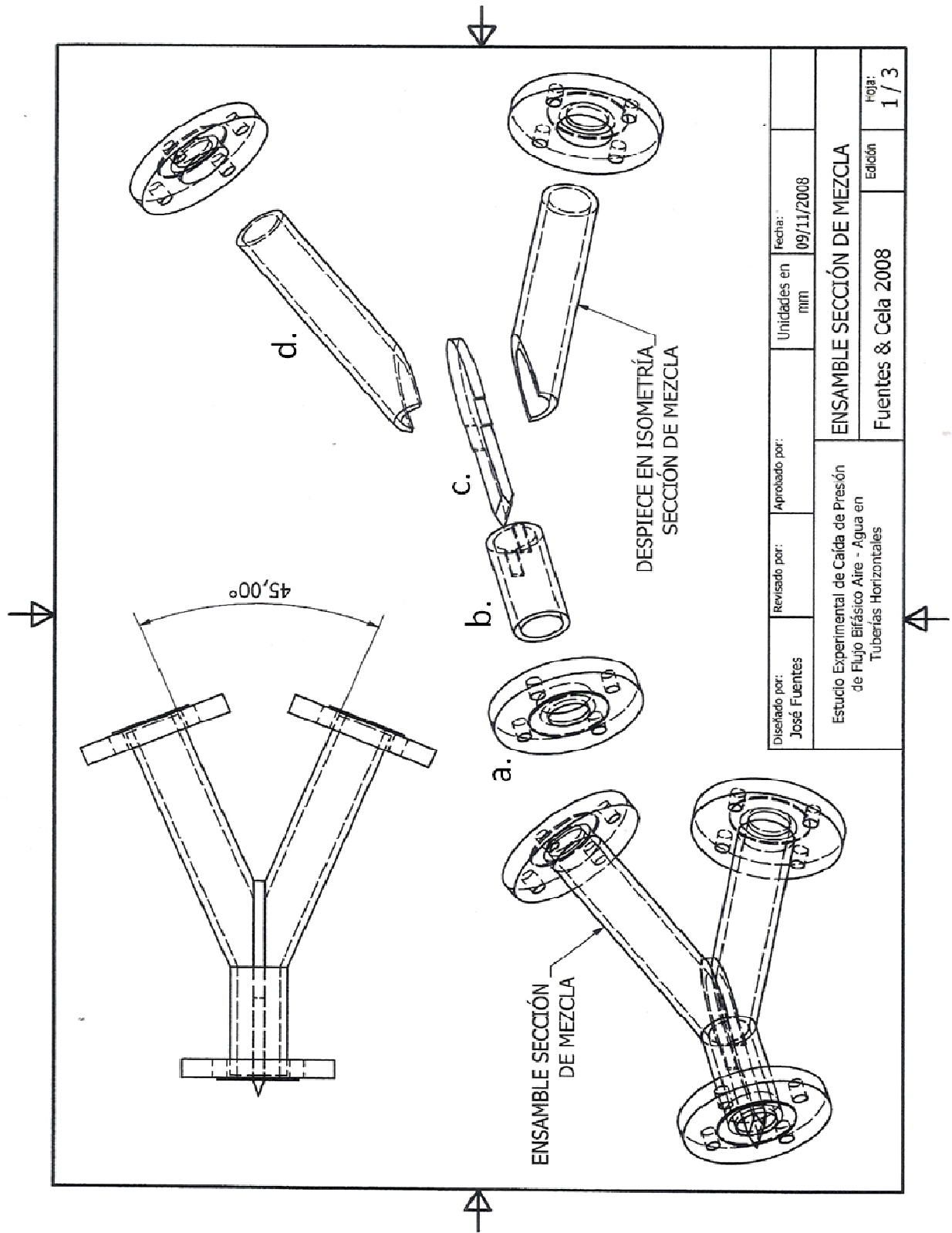
Figura A. 3 Curva de Calibración para la placa orificio de 1".

Tabla A. 5 Incertidumbres de mediciones directas en la calibración de las placas orificio

Mediciones Directas	Error Máximo Promedio	Desviación Promedio	Desviación Estándar del Promedio	Apreciación Instrumento	n
Tiempo [s]	0.3	0,2	0,3	0,01	76
Altura [m]	na	na	na	0,002	1
Perímetro Tanque Grande [m]	0,003	0,001	0,002	0,001	7
Perímetro Tanque Pequeño [m]	0,0005	0,0005	0,0005	0,001	4
Perímetro Manguera [m]	na	na	na	0,001	1
Espesor Tanque Grande [m]	na	na	na	0,00005	1
Espesor Tanque Pequeño [m]	na	na	na	0,00005	1
Medidor de Presión diferencial [%]	0.3	0,2	0,3	0,06	76

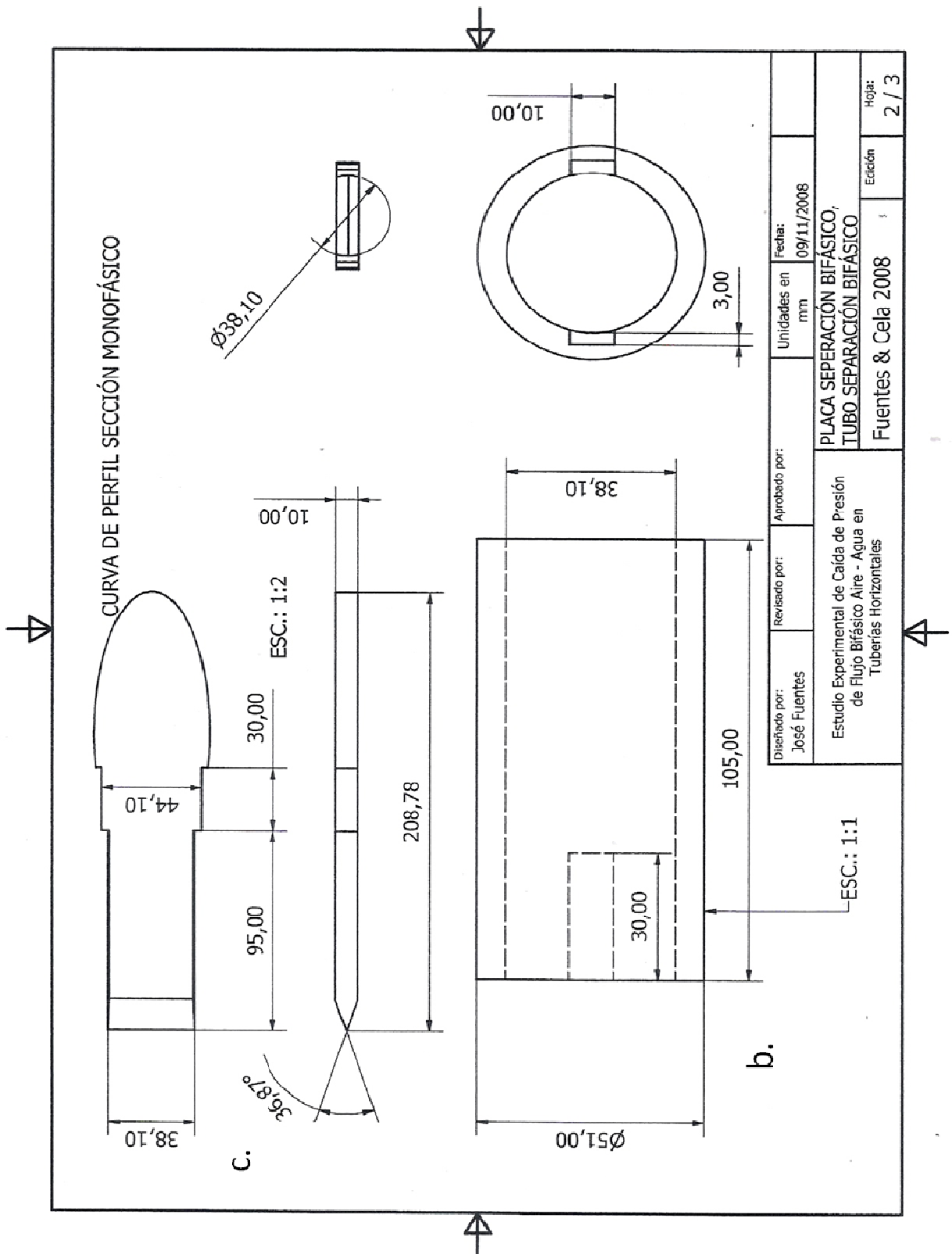
Tabla A. 6 Incertidumbres de mediciones indirectas en la calibración de las placas orificio.

Mediciones Indirectas	Valor	Incertidumbre
Diámetro externo tanque grande [m]	58,428	0,001
Diámetro externo tanque pequeño [m]	37,0672	0,0002
Diámetro interno tanque grande [m]	54,928	0,001
Diámetro interno tanque pequeño [m]	36,1872	0,0003
Diámetro externo manguera [m]	0,0576	0,0003
Área tanque grande [m ²]	0,2370	0,0009
Área tanque pequeño [m ²]	0,1028	0,0001
Área de la manguera [m ²]	0,002607	0,000001
Área neta tanque grande [m ²]	0,2344	0,0009
Área neta tanque pequeño [m ²]	0,1002	0,0001



Disñado por: José Fuentes	Revisado por:	Aprobado por:	Unidades en mm	Fecha: 09/11/2008
Estudio Experimental de Caída de Presión de Flujo Bifásico Aire - Agua en Tuberías Horizontales			ENSAMBLE SECCIÓN DE MEZCLA	
			Edición	Foja: 1 / 3
			Fuentes & Ceta 2008	

Figura A. 4 Planos de la Sección de mezcla



Diseñado por: José Fuentes	Revisado por:	Aprobado por:	Unidades en mm	Fecha: 09/11/2008
Estudio Experimental de Caída de Presión de Flujo Bifásico Aire - Agua en Tuberías Horizontales			PLACA SEPERACIÓN BIFÁSICO, TUBO SEPERACIÓN BIFÁSICO	
Fuentes & Ceta 2008			Edición	Hoja: 2 / 3

Figura A.4 Planos de la Sección de mezcla (Continuación)

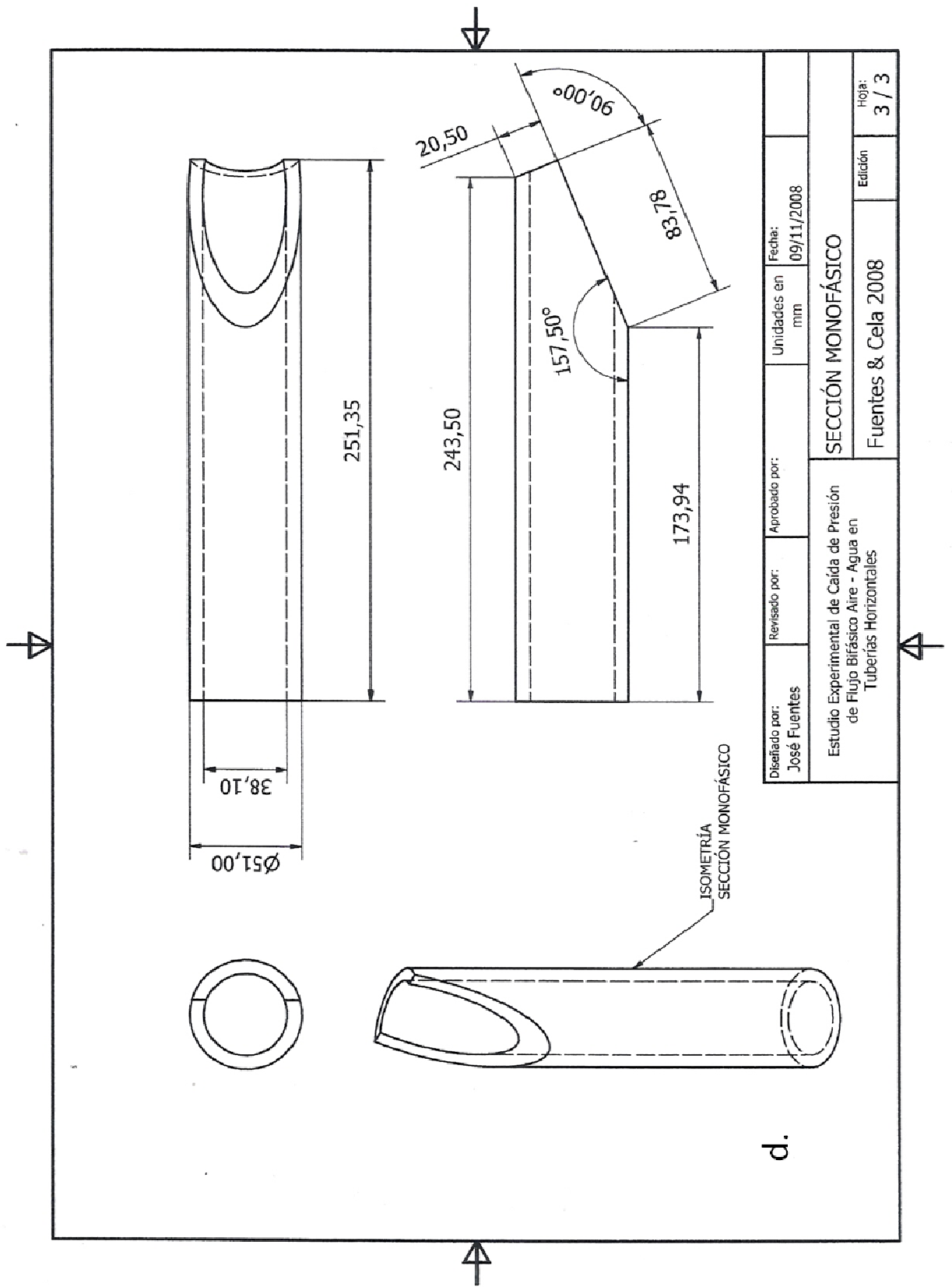


Figura A.4 Planos de la Sección de mezcla (Continuación).

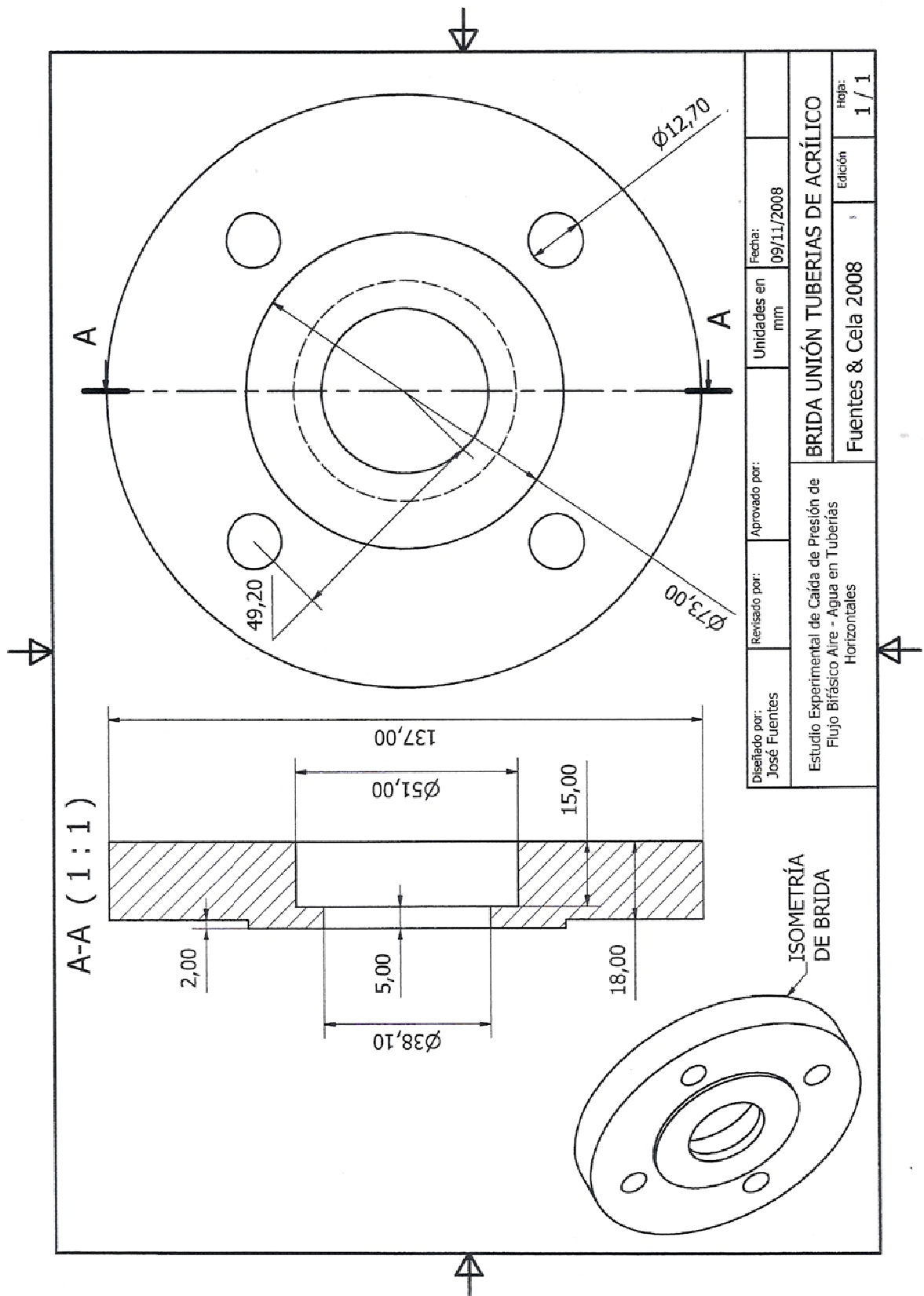


Figura A. 5 Planos de los Sistemas de Acople

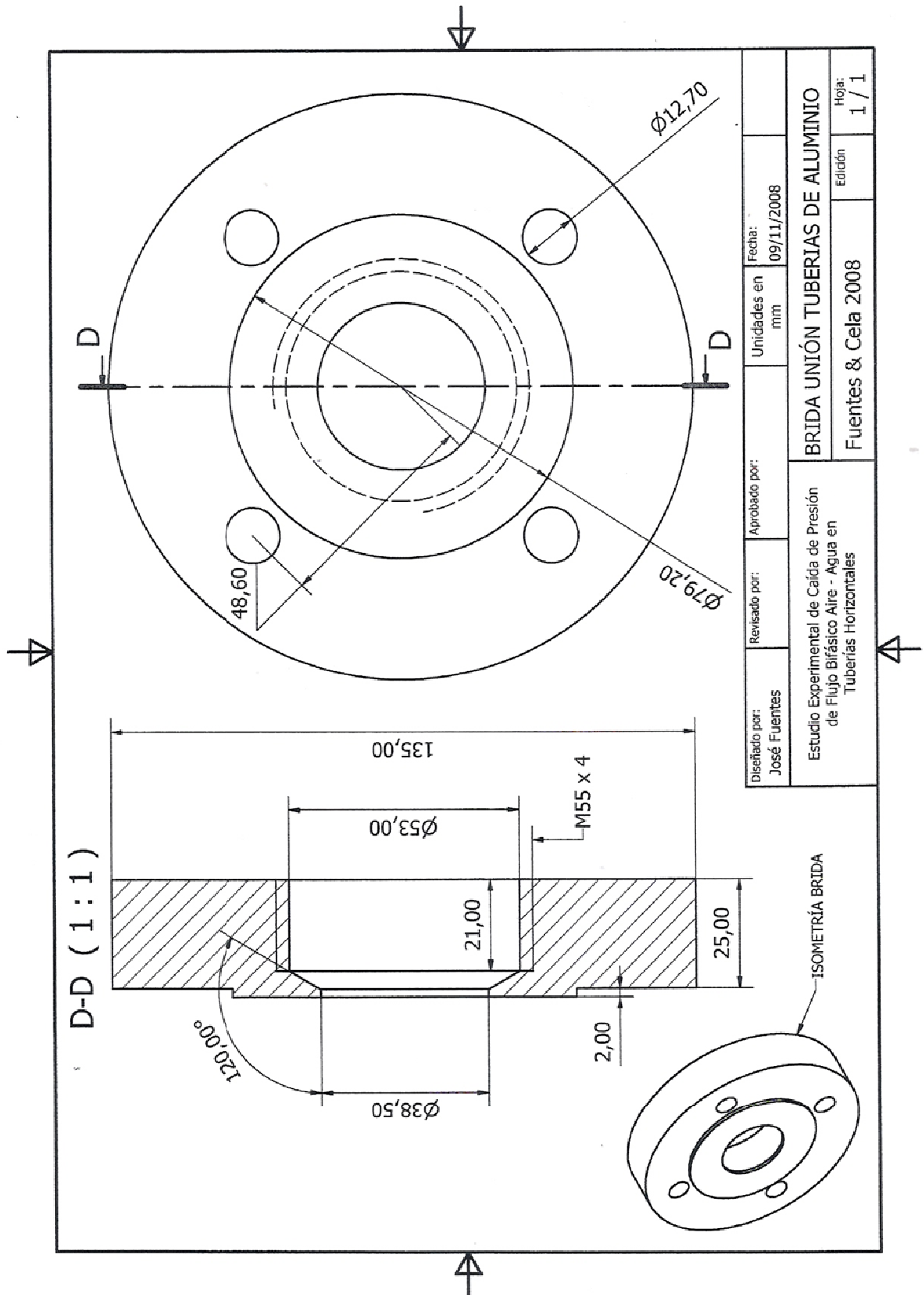


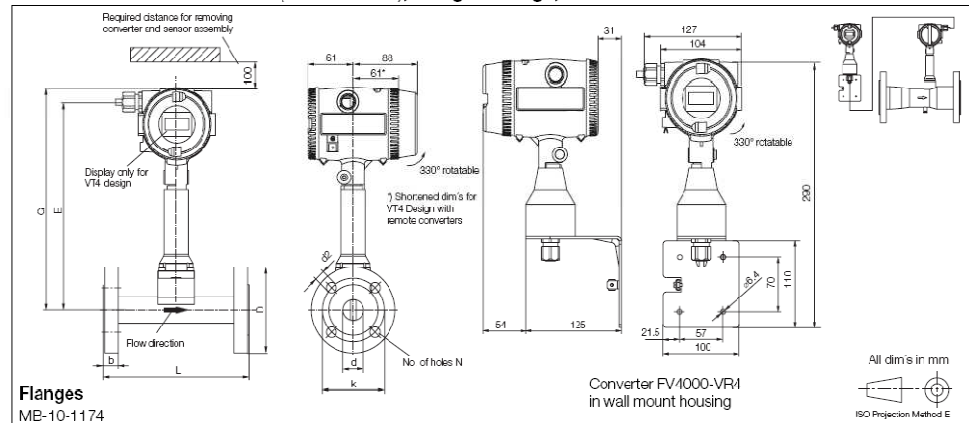
Figura A. 5 Planos de los Sistemas de Acople (Continuación)

Tabla A. 7. Dimensiones de las bridas del vortex de 2 pulgadas.

Vortex/Swirl Flowmeter
FV4000-VT4/VR4 / FS4000-ST4/SR4

D184S035U02

Dimensions FV4000-VT4/VR4 (TRIO-WIRL V), Flanged Design, DIN



Flanges
ME-10-1174

Vortex/Swirl Flowmeter
FV4000-VT4/VR4 / FS4000-ST4/SR4

D184S035U02

Dimensions FV4000-VT4/VR4 (TRIO-WIRL V), Flanged Design, ASME

Meter Size	Pres. Rating		L ¹⁾		E	D	G	k	d2	d	b	N	Weight [kg]
	Class	Schedule	Tmax 280°C	Tmax 400°C									
1/2"	150	40	200	-	296	88.9	315	60.5	15.9	15.7	11.2	4	5.0
	300	40	200			95.2		66.5	15.9		14.2		5.1
	600	40	200			95.3		66.5	15.9		20.6		5.2
	900	40	200			120.6		82.5	22.3		28.8		7.9
1"	150	60	200	205	313	108	332	79.4	15.9	24.3	14.2	4	5.7
	300	60	200	220		124		88.9	19		17.5		6.7
	600	60	220	-		124		88.9	19		23.9		7.3
1-1/2"	900	60	240	-	291	149.3	310	101.6	25.4	38.1	34.8	4	11.2
	150	60	200	220		127		98.4	15.9		17.5		8.5
	300	60	200	230		155.6		114.3	22.6		20.6		10.9
2"	600	60	235	-	291	155.6	310	114.3	22.6	38.1	28.8	4	12.1
	900	60	260	-		177.8		123.9	23.4		36.2		17.0
	150	60	200	220		152.4		120.6	19		19.1		4
2"	300	60	200	235	298	165	317	127	19	49.2	22.4	8	11.7
	600	60	240	-		165		127	19		31.8		13.6
	900	60	300	-		215.9		165.1	25.4		44.5		26.5
3"	150	60	200	240	316	190.5	335	162.4	19	73.7	28.9	4	17.6
	300	60	200	260		209.5		168.3	22.2		28.4		21.7
	600	60	265	-		209.5		168.3	22.2		36.2		25.8
3"	900	60	305	-	316	241.3	335	190.5	25.4	73.7	44.5	8	35.0
	150	60	250	260		228.6		190.5	19		23.9		20.1
	300	60	250	280		254		200	22.2		31.8		28.8
4"	600	60	315	-	325	273.1	344	215.9	25.4	97.2	44.5	8	41.4
	900	60	340	-		292.1		234.9	31.7		50.8		51.4
	150	60	300	310		279.4		241.3	22.2		25.4		32.8
6"	300	60	300	330	352	317.5	371	269.9	22.2	146.4	36.6	12	49.8
	600	60	365	-		355.6		292.1	28.4		54.2		81.6
	900	60	410	-		381		317.5	31.7		62		106.8
8"	150	60	350	370	414	343	433	298.4	22.2	194	28.4	8	20.1
	300	60	350	370		381		330.2	25.4		41.1		20.1
	600	60	415	-		419.1		349.3	31.8		62		12
8"	900	60	470	-	414	439.9	433	393.7	33.1	194	69.9	12	20.1
	150	40	450	439		406.4		362	25.4		30.2		12
	300	40	450	439		444.5		387.3	28.4		47.7		16
10"	600	60	470	-	439	508	458	431.8	35.1	242.8	69.9	16	20.1
	150	40	500	464		492.6		431.8	25.4		30.9		12
	300	40	500	464		520.7		450.8	31.7		50.8		16
12"	600	60	500	-	464	558.8	463	489	35.1	288.8	72.9	20	20.1

1) Tolerances: 1/2" to 8" +0/-3 mm; 10" to 12": +0/-5 mm

Fig. 17: Dimensions FV4000-VT4/VR4, Flanges, ASME

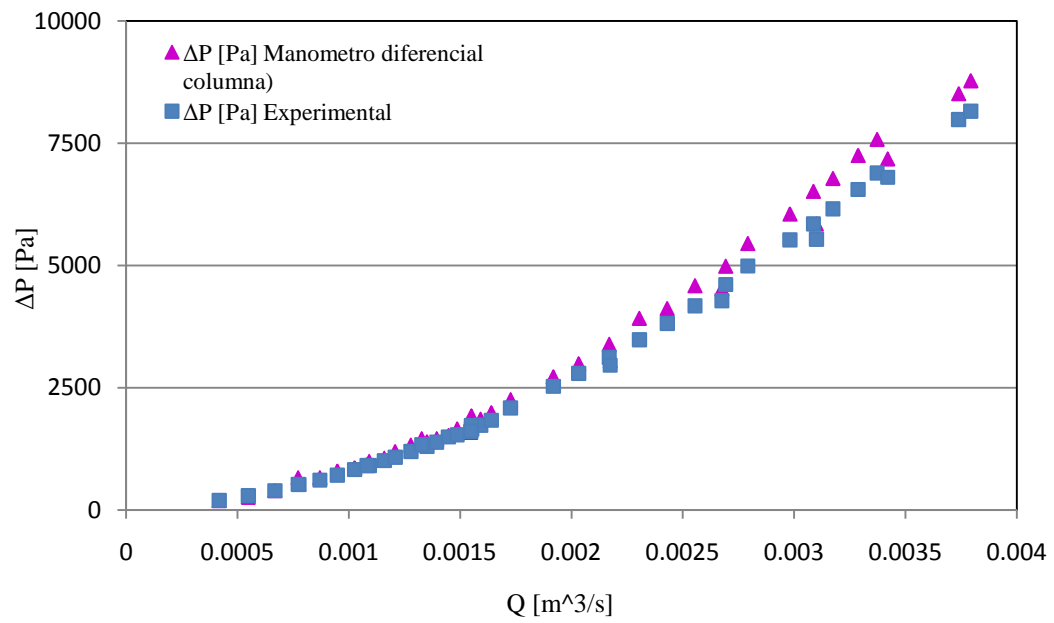


Figura A. 6. Comparación de la caída de presión registrada por el medidor de presión diferencial digital y de columna de mercurio.

Tabla A. 8 Comparación de los resultados experimentales de flujo monofásico líquido para los medidores de presión diferencial en función a la rugosidad equivalente de la tubería.

V[m/s]	Re	ΔP [Pa] (Zigrang y Sylvester, 1985) ($\epsilon=0$ m)	ΔP [Pa] (Zigrang y Sylvester, 1985) ($\epsilon=0.0000589$ m)	ΔP [Pa] Experimental (Medidor digital)	ΔP digital [Psi]	$\epsilon=(0.0000589$ m)				$\epsilon=0$			
						Error relativo (ϕ) [%]	E2 [%]	E3 [%]	E4 [%]	Error relativo (ϕ) [%]	E2 [%]	E3 [%]	E4 [%]
0.367	16443	132.5	146.4	200	0.0290076	26.79	26.79	607.58	717.90	33.76	33.76	76.15	1139.45
0.482	21740	213.4	240.4	300	0.0435114	19.86	19.86	313.87	394.46	28.88	28.88	14.83	834.12
0.586	26847	300.5	344.4	400	0.0580152	13.91	13.91	138.42	193.48	24.87	24.87	0.03	618.52
0.678	36028	974.5	1217.5	1340	0.24076308	9.15	9.15	49.01	83.63	27.28	27.28	5.06	744.14
0.681	31479	476.4	560.1	616	0.07599991	9.07	9.07	47.97	82.28	22.67	22.67	5.58	513.80
0.764	35769	553.8	657.3	720	0.08934341	8.71	8.71	43.10	75.86	23.09	23.09	3.77	533.03
0.832	39375	390.2	453.3	524	0.07716022	13.48	13.48	128.57	181.80	25.54	25.54	0.26	652.22
0.900	42825	635.8	761.1	832	0.10442736	8.52	8.52	40.69	72.65	23.59	23.59	2.08	556.34
0.949	50890	1282.8	1635.9	1732	0.25236612	5.55	5.55	11.59	30.79	25.94	25.94	0.82	672.71
0.958	46059	708.0	854.1	916	0.12067162	6.76	6.76	21.31	45.70	22.71	22.71	5.39	515.65
1.017	49320	843.4	1031.1	1084	0.13285481	4.88	4.88	7.49	23.82	22.20	22.20	8.02	492.74
1.060	52061	931.5	1146.8	1204	0.14735861	4.75	4.75	6.81	22.61	22.64	22.64	5.73	512.43
1.122	55379	785.9	955.1	1016	0.13285481	5.99	5.99	14.82	35.94	22.65	22.65	5.67	512.91
1.164	62798	1555.7	2010.4	2092	0.26686992	3.90	3.90	3.08	15.22	25.63	25.63	0.37	657.09
1.186	58519	1027.5	1273.1	1308	0.15722119	2.67	2.67	0.27	7.11	21.44	21.44	12.86	459.79
1.224	60719	1085.8	1351.2	1392	0.17462575	2.93	2.93	0.62	8.60	22.00	22.00	9.20	483.82
1.270	63217	1214.5	1524.6	1544	0.1897097	1.25	1.25	0.79	1.57	21.34	21.34	13.61	455.39
1.305	65348	1309.2	1652.8	1660	0.2018929	0.43	0.43	2.94	0.19	21.13	21.13	15.17	446.68
1.358	79713	2307.1	3108.9	2964	0.89343408	-4.89	4.89	49.46	23.90	22.16	22.16	8.22	491.15
1.361	74249	678.4	827.3	916	0.25120582	9.68	9.68	56.85	93.79	25.94	25.94	0.83	672.86
1.362	68477	1159.3	1449.6	1500	0.19435092	3.36	3.36	1.48	11.30	22.71	22.71	5.37	515.82
1.397	70477	1369.6	1735.2	1740	0.217557	0.27	0.27	3.50	0.07	21.29	21.29	13.99	453.26
1.439	73042	1441.7	1834.8	1840	0.22393867	0.28	0.28	3.46	0.08	21.65	21.65	11.44	468.59
1.515	82350	374.4	440.5	532	0.23380126	17.20	17.20	226.56	295.72	29.63	29.63	21.14	877.75
1.683	91959	1876.5	2460.3	2532	0.3034195	2.83	2.83	0.47	8.02	25.89	25.89	0.74	670.25
1.783	97895	2078.2	2747.8	2796	0.36723622	1.73	1.73	0.18	2.98	25.67	25.67	0.41	659.08
1.904	105015	2333.6	3115.2	3124	0.40552625	0.28	0.28	3.47	0.08	25.30	25.30	0.07	640.12
1.907	112379	1257.0	1617.6	1612	0.80351052	-0.35	0.35	6.21	0.12	22.02	22.02	9.06	484.90
2.023	111900	2599.6	3500.9	3484	0.45309871	-0.49	0.49	6.92	0.24	25.38	25.38	0.13	644.38
2.132	118765	3117.8	4267.1	4180	0.50531239	-2.08	2.08	17.88	4.34	25.41	25.41	0.15	645.79
2.241	125460	2853.2	3874.8	3820	0.42989263	-1.43	1.43	12.80	2.06	25.31	25.31	0.08	640.49
2.348	138697	3347.2	4647.9	4284	0.95086913	-8.49	8.49	113.19	72.16	21.87	21.87	10.00	478.15
2.363	133773	3418.0	4721.3	4612	0.55404516	-2.37	2.37	20.38	5.62	25.89	25.89	0.74	670.29
2.450	138317	3650.6	5067.1	4992	0.60625884	-1.50	1.50	13.31	2.26	26.87	26.87	3.39	722.10
2.616	148821	4359.6	6153.1	5852	0.66891526	-5.14	5.14	53.14	26.47	25.50	25.50	0.22	650.41
2.708	154977	4580.4	6495.4	6160	0.7240297	-5.44	5.44	57.59	29.64	25.64	25.64	0.38	657.53
2.720	161743	4355.7	6186.8	5540	0.9996019	-11.68	11.68	191.00	136.32	21.38	21.38	13.34	456.99
2.785	159973	4100.1	5752.3	5524	0.62134279	-4.13	4.13	39.41	17.08	25.78	25.78	0.56	664.45
2.884	166148	4875.5	6953.0	6556	0.80118991	-6.06	6.06	67.25	36.68	25.63	25.63	0.36	657.04
2.959	174021	5082.5	7298.8	6892	0.84876238	-5.90	5.90	64.75	34.84	26.26	26.26	1.50	689.34
3.001	179282	5194.2	7492.9	6804	0.98683855	-10.13	10.13	150.55	102.53	23.66	23.66	1.88	559.75
3.281	196535	6095.7	8917.2	7984	1.15798339	-11.69	11.69	191.36	136.63	23.65	23.65	1.90	559.37
3.328	200868	6246.6	9168.6	8156	1.18292993	-12.42	12.42	212.00	154.15	23.41	23.41	2.62	548.05

	$\epsilon=(0.0000589$ m)	$\epsilon=0$ m)
E1 [%]	2.14	25.03
E2 [%]	6.63	25.03
E3 [%]	8.45	2.64
E4 [%]	8.72	24.87

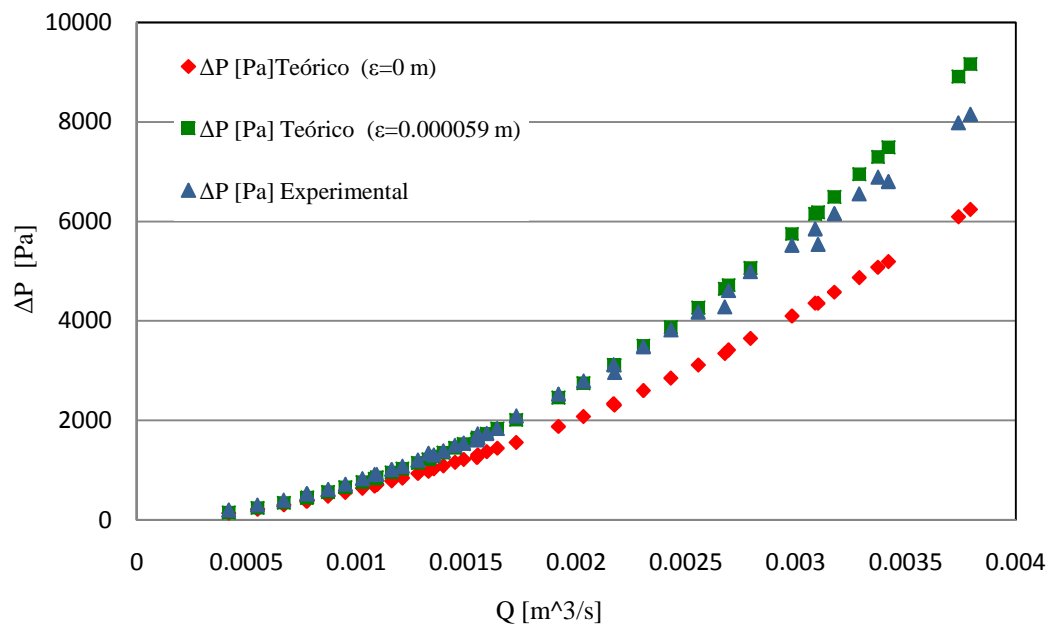


Figura A. 7 Comparación del gradiente de presión registrado por el medidor de presión diferencial y la ecuación de Darcy Weisbach.

Tabla A. 9 Análisis de la influencia de la incertidumbre del caudal y la temperatura en la medición de caída de presión.

Re	Q [m³/S]	ΔP [Pa] Teórico	variación de 6% en caudal		incremento en 5°C en temperatura		disminución en 5°C en temperatura	
			ΔPmax [Pa]	Error relativo [%]	ΔP [Pa]	Error relativo [%]	ΔP [Pa]	Error relativo [%]
19311	0.00042	127.0	140.7	9.72	123.8	-2.59	130.5	2.68
25363	0.00055	205.1	227.3	9.76	200.1	-2.52	210.7	2.61
30875	0.00067	290.2	321.7	9.78	283.2	-2.47	297.8	2.56
35705	0.00077	375.2	416.0	9.80	366.3	-2.44	385.0	2.53
35848	0.00078	377.9	418.9	9.80	368.9	-2.44	387.7	2.53
40204	0.00087	463.0	513.4	9.81	452.1	-2.41	474.9	2.50
43831	0.00095	539.6	598.4	9.82	527.0	-2.39	553.3	2.48
47415	0.00103	620.4	688.1	9.83	606.0	-2.38	636.1	2.46
49983	0.00108	681.3	755.7	9.84	665.6	-2.37	698.5	2.45
50453	0.00109	692.8	768.4	9.84	676.8	-2.36	710.2	2.45
53568	0.00116	770.6	854.8	9.85	752.9	-2.35	789.9	2.44
55833	0.00121	829.5	920.2	9.85	810.5	-2.34	850.2	2.43
59081	0.00128	917.4	1017.7	9.86	896.5	-2.33	940.1	2.42
61311	0.00133	980.0	1087.2	9.86	957.7	-2.32	1004.2	2.41
62431	0.00135	1012.1	1122.8	9.86	989.1	-2.32	1037.0	2.40
64440	0.00140	1070.8	1188.1	9.87	1046.6	-2.31	1097.1	2.40
66880	0.00145	1144.2	1269.5	9.87	1118.4	-2.30	1172.2	2.39
68704	0.00149	1200.5	1332.0	9.87	1173.5	-2.30	1229.8	2.38
71507	0.00155	1289.2	1430.5	9.88	1260.3	-2.29	1320.6	2.38
71639	0.00155	1293.5	1435.3	9.88	1264.5	-2.29	1325.0	2.38
71696	0.00155	1295.3	1437.3	9.88	1266.3	-2.29	1326.8	2.38
Promedio				9.84		-2.37		2.46