



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO**

**DESARROLLO DE LA INSTRUMENTACIÓN
PARA EL EQUIPO EXPERIMENTAL DE FLUJOS
MULTI FÁSICOS Y DE TRANSPORTE DE
RECORTES DEL INSTITUTO MEXICANO DEL
PETRÓLEO**

TESIS

**Que para obtener el grado de:
*MAESTRO EN INGENIERÍA
(ELÉCTRICA)***

PRESENTA:

Ing. Alejandro Flores Ordeñana



Director: MenI. Luis Arturo Haro Ruiz.

Co-Director: Ing. German J. Carmona Paredes.

Agosto 2005



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE

Página.

INTRODUCCIÓN	I
CAPITULO 1	
DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL DE FLUJO MULTIFÁSICO Y DE TRANSPORTE DE RECORTES	1
1.1. SECCIÓN DE FASE LÍQUIDA	3
1.2. SECCIÓN DE FASE GASEOSA	4
1.3. SECCIÓN DE FASE SÓLIDA	4
1.4. SECCIÓN DE MEZCLADO	5
1.5. SECCIÓN EXPERIMENTAL	5
1.6. SECCIÓN DE SEPERACIÓN DE FASES	5
1.7. SECCIÓN DE POSICIONAMIENTO DE LA TUBERÍA EXPERIMENTAL	6
1.8. SECCIÓN DE CONTROL, MEDICIÓN DE VARIABLES Y DAQ	7
CAPÍTULO 2	
INSTRUMENTACIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE FLUJO MULTIFÁSICO	9
2.1. INSTRUMENTACIÓN DE LA SECCIÓN DE FASE LÍQUIDA	9
2.2. INSTRUMENTACIÓN DE LA SECCIÓN DE FASE GASEOSA	9
2.3. INSTRUMENTACIÓN DE LA SECCIÓN DE FASE SÓLIDA	9
2.4. INSTRUMENTACIÓN DE LA SECCIÓN EXPERIMENTAL	10
2.5. INSTRUMENTACIÓN DE LA SECCIÓN DE POSICIONAMIENTO DE LA TUBERÍA EXPERIMENTAL	10
2.6. VARIABLES A MEDIR	10
2.6.1. PRESIÓN	10
2.6.1.1. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN EN LA DESCARGA DE LA BOMBA	13
2.6.1.2. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN PARA MEDIR LA PÉRDIDA DE CARGA	13
2.6.1.3. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN EN LA INYECCIÓN DE GAS	14
2.6.1.4. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN PARA LA PRESURIZACIÓN DEL TANQUE DE SÓLIDOS	15
2.6.1.5. COLOCACIÓN DE LOS SENSORES DE PRESIÓN EN LA TUBERIA EXPERIMENTAL	15
2.6.2. PRESION DIFERENCIAL	17
2.6.2.1. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL.	18
2.6.3. GASTO	18
2.6.3.1. GASTO DE LÍQUIDO	24

2.6.3.1.1.	COLOCACIÓN DEL SENSOR DE GASTO DE LÍQUIDO	28
2.6.3.2.	GASTO DE GAS	29
2.6.3.2.1.	COLOCACIÓN DEL SENSOR DE GASTO DE GAS	32
2.6.4.	TEMPERATURA DEL GAS	33
2.6.4.1.	COLOCACIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA DEL GAS	34
2.6.5.	DOSIFICADOR DE SÓLIDOS	35
2.6.5.1.	COLOCACIÓN DEL DOSIFICADOR	35
2.6.6.	PESO	36
2.6.6.1.	COLOCACIÓN DEL SENSOR DE PESO	36
2.6.7.	POSICIÓN DE LA TUBERÍA EXPERIMENTAL	36
2.6.7.1.	COLOCACIÓN DEL SENSOR DE POSICIÓN	38
2.6.8.	VELOCIDAD	39
2.6.8.1.	COLOCACIÓN DEL SENSOR DE VELOCIDAD DE GIRO DE LA BOMBA	40
2.6.8.2.	COLOCACIÓN DEL SENSOR DE VELOCIDAD DE GIRO DEL DOSIFICADOR DE SÓLIDOS	40
2.6.8.3.	COLOCACIÓN DEL SENSOR DE VELOCIDAD DE GIRO DEL MALACATE PRINCIPAL	41
2.6.8.4.	COLOCACIÓN DEL SENSOR DE VELOCIDAD DE GIRO PARA EL MALACATE SECUNDARIO	41

CAPÍTULO 3

ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES Y ADQUISICIÓN DE DATOS 43

3.1.	ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE PRESIÓN	43
3.2.	ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES DE PRESIÓN DIFERENCIAL	45
3.3.	ACONDICIONAMIENTO PARA LAS SEÑALES DE TEMPERATURA	46
3.4.	ACONDICIONAMIENTO PARA LA SEÑAL DE PESO	46
3.5.	ACONDICIONAMIENTO PARA LA SEÑAL DE POSICIÓN ANGULAR	46
3.6.	ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE VELOCIDAD	47
3.7.	ACONDICIONADORES DE SEÑAL NATIONAL INSTRUMENTS	47
3.7.1.	ACONDICIONADOR NATIONAL INSTRUMENT SCXI 1141, 1142 Y 1143	48
3.7.2.	ACONDICIONADOR NATIONAL INSTRUMENT SCXI 1121	48
3.7.3.	CHASIS NATIONAL INSTRUMENTS	49
3.7.4.	CAJA RECEPTORA "SCB 100 PIN CONNECTOR BLOCK"	50
3.8.	TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NATIONAL INSTRUMENTS	51
3.9.	MULTIPLEXEO	53
3.9.1.	CONEXIÓN DEL INVERSOR DE LA BOMBA	55

3.9.2.	CONEXIÓN DEL INVERSOR DEL DOSIFICADOR DE SÓLIDOS	55
3.9.3.	CONEXIÓN DEL INVERSOR DEL MALACATE PRINCIPAL	56
3.9.4.	CONEXIÓN DEL INVERSOR DEL MALACATE SECUNDARIO	57
3.10.	DISEÑO DEL SOFTWARE PARA EL REGISTRO Y LA VISUALIZACIÓN DE LAS VARIABLES A MEDIR EN EL LABORATORIO DEL EEFMTR Y CONTROL DE OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS	58

CAPÍTULO 4

PUESTA EN OPERACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL DE FLUJO MULTIFÁSICO Y TRANSPORTE DE RECORTES 65

4.1.	NOMENCLATURA	65
4.2.	CALIBRACIÓN DE SENSORES	70
4.2.1.	CALIBRACION DE LOS SENSORES DE PRESIÓN	70
4.2.2.	CALIBRACION DE LOS SENSORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL	78
4.2.3.	CALIBRACION DEL SENSOR DE TEMPERATURA	80
4.2.4.	CALIBRACION DEL SENSOR DE PESO	80
4.2.5.	CALIBRACION DEL SENSOR DE POSICIÓN	80
4.2.6.	CALIBRACION DE LOS SENSORES DE VELOCIDAD	81

CAPÍTULO 5

PRUEBAS EN EL EQUIPO EXPERIMENTAL DE FLUJOS MULTIFÁSICOS Y DE TRANSPORTE DE RECORTES 83

5.1.	CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO	83
5.1.1.	OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DEL SISTEMA CON DISTINTAS CONDICIONES DE APERTURA DE LA VÁLVULA DE ESTRANGULAMIENTO	83
5.1.2.	OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DEL SISTEMA PARA DISTINTAS INCLINACIONES DE LA TUBERÍA EXPERIMENTAL	90
5.2.	TRANSITORIO HIDRÁULICO	92
5.3.	COEFICIENTE DE FRICCIÓN	93
5.4.	PATRONES DE FLUJO	94
5.5.	VELOCIDAD DE ARRASTRE DE SÓLIDOS	96

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES 99

BIBLIOGRAFÍA 101

ÍNDICE DE FIGURAS	i
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE GRÁFICAS	vii

INTRODUCCIÓN

Los Yacimientos Naturalmente Fracturados de la Región Marina de Pemex Exploración Producción, son de suma importancia para la industria nacional productora de crudo. Uno de estos yacimientos es Cantarell, en el que la presión del yacimiento se ha abatido hasta alcanzar valores muy bajos, lo que limita su explotación con la tecnología de perforación convencional. Yacimientos como éste presentan áreas de oportunidad para la tecnología de Perforación Bajo Balance (PBB), la cual busca inducir presión en el pozo mediante la inyección de algún fluido de perforación, lo que generalmente lleva a tener flujo multifásico concurrente de dos o más fases (sólidos-líquidos-gases).

Además, con el fluido de perforación se controla la presión del yacimiento al mantener la presión de fondo dentro de un cierto intervalo, lo que se logra con relativa facilidad cuando se perfora convencionalmente, pero no así con la PBB debido a la presencia de flujo multifásico. Esto dificulta predecir el punto de operación del sistema bajo condiciones dinámicas.

El proyecto denominado Modelo Numérico de la Hidráulica de la Perforación, incluye el desarrollo de modelos que deben ser validados con información experimental y de campo. En particular se requiere formular y validar modelos apropiados de flujo multifásico aplicables en tubos de sección simple y de sección anular. Para ello, la Coordinación de Yacimientos Naturalmente Fracturados del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), construyó un equipo experimental para el estudio de flujo multifásico sólido-líquido-gas y solicitó apoyo al grupo de hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM para proveer la ingeniería de instrumentación y de control necesaria para el óptimo funcionamiento de esta instalación, y para coadyuvar a la realización del proyecto a través de su caracterización hidráulica, proyecto del cual se deriva el presente trabajo.

En el capítulo 1 se presenta una descripción general del equipo experimental de flujo multifásico y de transporte de recortes. En el capítulo 2 se explica la instrumentación del equipo experimental. En el capítulo 3 se detallan los sistemas de adquisición de datos y acondicionadores de señal. El capítulo 4 trata lo relacionado con la puesta en marcha del equipo experimental. En el capítulo 5 se mencionan cada una de las pruebas realizadas. Finalmente en el capítulo 6 se dan las conclusiones de este trabajo.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL DE FLUJO MULTIFÁSICO Y DE TRANSPORTE DE RECORTES

El “Equipo Experimental de Flujo Multifásico y de Transporte de Recortes”, “EEFMTR” como se le denominará en adelante, es una instalación construida en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) con el objetivo de formular y validar con información experimental modelos apropiados de flujo multifásico aplicables en tubos de sección simple y de sección anular.

El equipo está formado por las siguientes secciones, que se presentan en el diagrama de la figura 1.1.

- 1) Sección de fase líquida (agua).
- 2) Sección de fase gaseosa (aire).
- 3) Sección de fase sólida (recortes).
- 4) Sección de mezclado.
- 5) Sección experimental (flujo multifásico).
- 6) Sección de separación de fases.
- 7) Sección de posicionamiento de la tubería experimental.
- 8) Sección de control, medición y adquisición de datos.

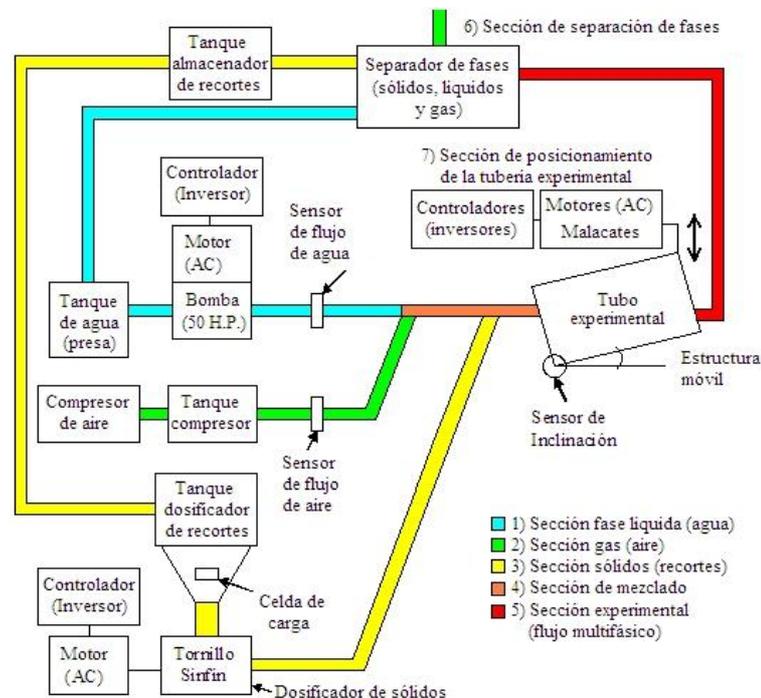


Fig. 1.1. Diagrama de bloques del EEFMTR del IMP.

En la figura 1.2. se muestra un esquema general en elevación y planta del equipo experimental de flujo multifásico y en la figura 1.3. una fotografía de la instalación en el Instituto Mexicano del Petróleo.

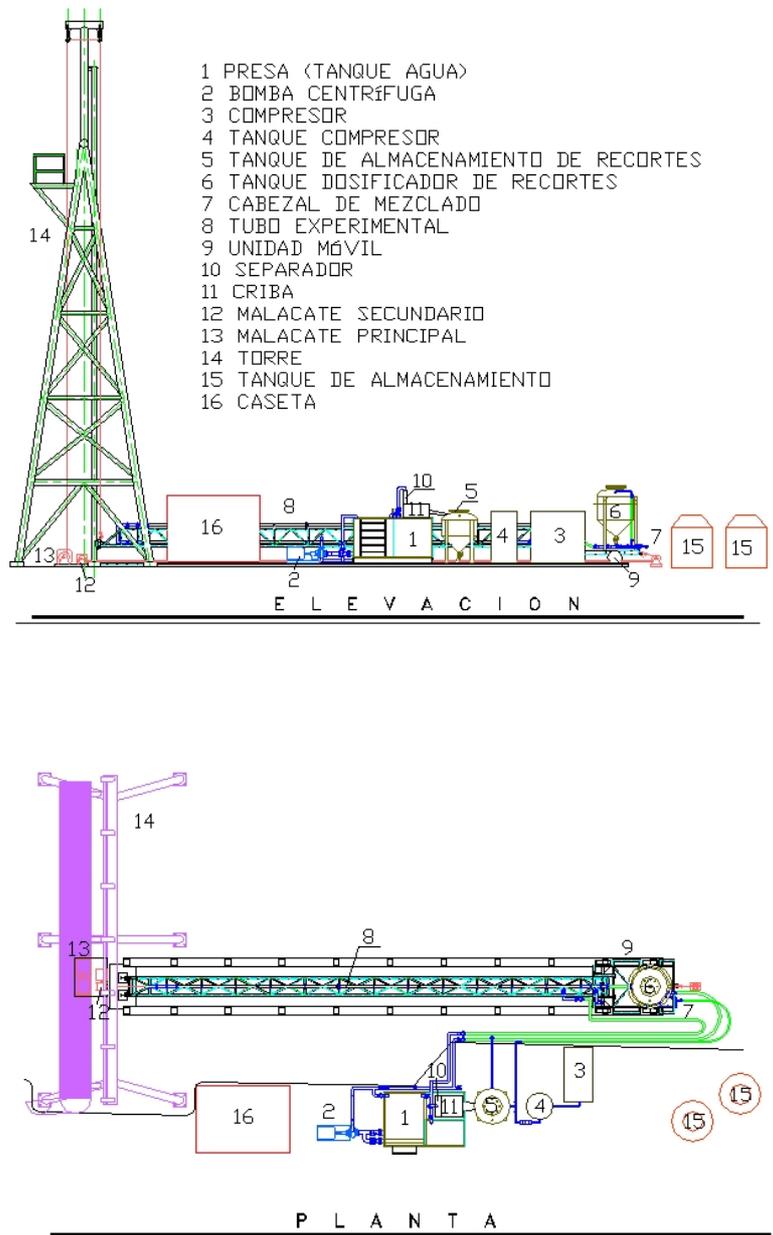


Fig. 1.2. Esquema general (elevación y planta) del EEFMTR del IMP.



Fig. 1.3. Laboratorio de EEFMTR del IMP.

1.1. SECCIÓN DE FASE LÍQUIDA

La sección de fase líquida está compuesta por un tanque de agua (presa) con divisiones internas, un equipo de bombeo con variador de velocidad (Inversor Siemens Micromaster 440^[1.1]) para control del gasto de agua, una válvula de control de tipo mariposa y sensores de presión y gasto; éste último formado por una placa orificio y un transductor de presión diferencial (figura 1.4).

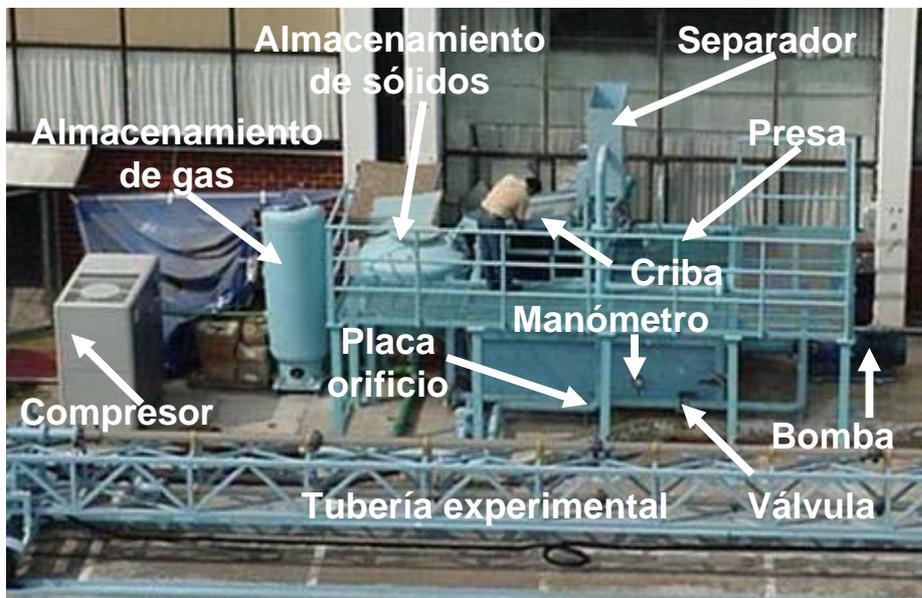


Fig. 1.4. Fotografía de la sección de fase líquida (agua) y gas (aire).

^{1.1} Para más detalles del inversor ver "Manual del Inversor Micro Master 440".

1.2. SECCIÓN DE FASE GASEOSA

La sección de fase gaseosa (aire) está compuesta por un compresor de aire^{1,2}, un tanque a la salida del compresor (figura 1.4.), una válvula de aguja para control del gasto de aire y sensores de presión y gasto, éste último formado por una placa orificio, un transductor de presión diferencial y uno de presión absoluta.

1.3. SECCIÓN DE FASE SÓLIDA

Esta sección está formada por un tanque de almacenamiento de recortes (figura 1.4.), desde el cual se transportan a través de una manguera flexible de 3", empujándolos con aire a presión, hasta el tanque dosificador que se encuentra sobre la unidad móvil comúnmente denominada "el carrito" (figura 1.5.). De este último tanque se inyectan los recortes al cabezal de mezclado con el dosificador de recortes construido con un tornillo sinfín, cuya velocidad de giro se establece con un variador de velocidad (inversor) para controlar la dosificación. En el tanque dosificador de recortes está instalada una celda de carga para medir la variación del peso en el tanque debida a la salida de los recortes.

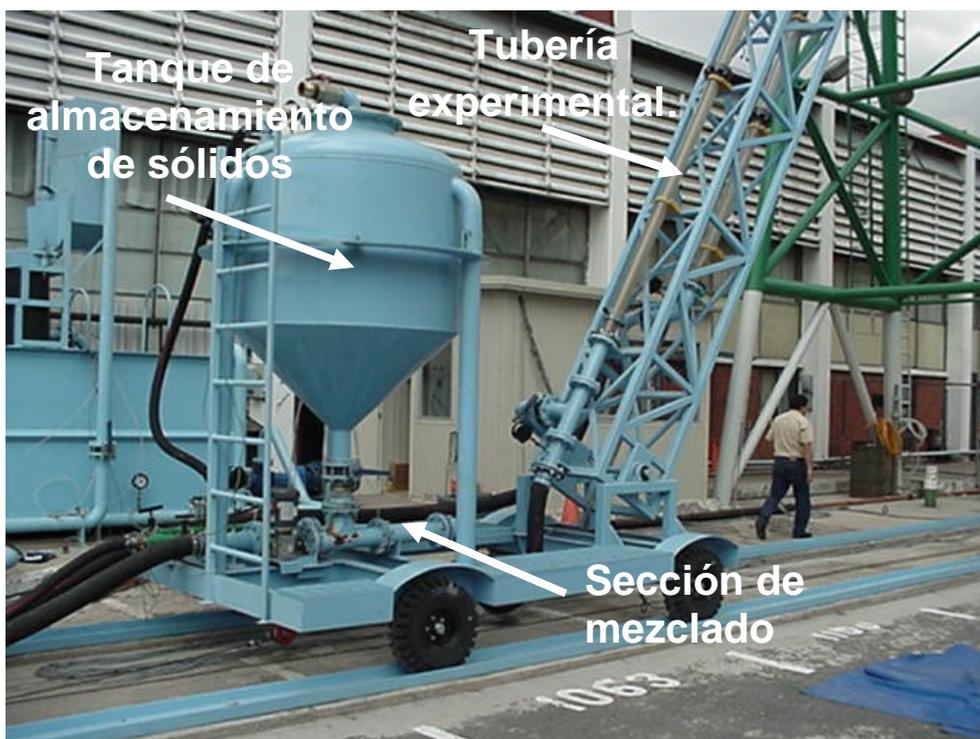


Fig. 1.5. Fotografía de la unidad móvil, "el carrito".

^{1,2} Para más detalles del compresor ver el "User Manual".

1.4. SECCIÓN DE MEZCLADO

La sección de mezclado está sobre la unidad móvil (figura 1.5.) y está formada por un conjunto de válvulas que permiten hacer la mezcla de las tres fases. En una primera etapa, el flujo de aire, que es controlado con una válvula de aguja, se incorpora al agua, que a su vez está controlada al establecer la velocidad de giro de la bomba centrífuga. Posteriormente, se le adicionan los recortes que se dosifican controlando la velocidad de giro del tornillo sinfín que los empuja al flujo bifásico agua-aire, para formar el flujo trifásico, sólido, líquido, gas.

1.5. SECCIÓN EXPERIMENTAL

En esta sección está instalada una tubería de PVC transparente de 4" de diámetro y 15 metros de longitud en la etapa de "ida" (figuras 1.5. y 1.6.) y otro tanto en la de "retorno", formadas por cinco tramos de 3 metros cada uno. En la parte central de la tubería de "ida" se encuentra la zona de observación de experimentos o zona de muestreo y en ella están instaladas seis preparaciones para transductores de presión absoluta y dos para un transductor de presión diferencial, así como una cámara de alta velocidad. En la tubería de "retorno" también hay preparaciones para transductores de presión absoluta y diferencial.



Fig. 1.6. Sección experimental.

1.6. SECCIÓN DE SEPERACIÓN DE FASES

Esta sección está formada por un separador de gases y una criba (figura 1.7.). El separador de gases es un pequeño tanque, a la salida de la tubería que conduce el flujo multifásico, que permite separar el aire mezclado. La criba o zaranda separa los sólidos

del agua; los primeros se van al tanque de almacenamiento de recortes y el agua cae al tanque de agua (presa).



Fig. 1.7. Separador de fases.

1.7. SECCIÓN DE POSICIONAMIENTO DE LA TUBERÍA EXPERIMENTAL

Está formada por una torre, una estructura sobre la que se encuentra la tubería experimental y por un par de malacates, controlados con dos variadores de velocidad, que permiten izar la estructura para posicionarla a la inclinación a la que se desea realizar el experimento.



Fig. 1.8. Inclinación de la estructura.

1.8. SECCIÓN DE CONTROL, MEDICIÓN DE VARIABLES Y ADQUISICIÓN DE DATOS

El control de la operación de la bomba, del dosificador de sólidos y de la posición de la estructura, así como la medición de las más de 40 variables, se hace desde una computadora personal equipada con una tarjeta de adquisición de datos, que registra las señales provenientes de los acondicionadores de señal para los sensores ubicados a lo largo de la instalación, además establece los parámetros de control de los variadores de velocidad. Tanto el sistema de control, de medición de variables y de adquisición de datos están ubicadas dentro de la caseta de control (figuras. 1.9. y 1.10.)



Fig. 1.9. Ubicación de la Caseta.



Fig. 1.10. Interior de la Caseta.

CAPÍTULO 2

INSTRUMENTACIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE FLUJO MULTIFÁSICO

Como se ha comentado el equipo experimental consta de varias secciones, con requerimientos de medición particulares. En este capítulo se explicará como se llevó a cabo la instrumentación en cada una de ellas.

2.1. INSTRUMENTACIÓN DE LA SECCIÓN DE FASE LÍQUIDA

Para conocer el punto de operación del sistema hidráulico es necesario conocer ciertas variables. Para caracterizar esta etapa, a la salida de la bomba interesa medir la presión de descarga y el gasto que esta entrega. Al motor de la bomba se le colocó un inversor para poder variar su velocidad y así controlar la cantidad de líquido que se esta introduciendo a la mezcla multifásica. En la instalación se colocó una válvula tipo mariposa para provocar una pérdida de carga, adicional, en la tubería. Después de dicha válvula se colocó un sensor de presión para conocer la pérdida de carga.



Fig. 2.1. Sección de fase líquida.

2.2. INSTRUMENTACIÓN DE LA SECCIÓN DE FASE GASEOSA

En la sección de gas se colocaron medidores de gasto tanto para medir la cantidad de gas inyectado en la zona experimental como al tanque de almacenamiento de sólidos, esta para tener cuantificado la cantidad de gas inyectada al sistema.

El tanque de sólidos se debe presurizar al mismo nivel de la presión de inyección, esto con el fin de poder inyectar los sólidos a la tubería experimental. Por lo que se instalaron sensores de presión en el tanque de almacenamiento de sólidos y en la tubería de inyección de gas, además se montó un sensor de temperatura para conocer la temperatura del gas.



Fig. 2.2. Sección de fase gaseosa.

2.3. INSTRUMENTACIÓN DE LA SECCIÓN DE FASE SÓLIDA

En el tanque de almacenamiento de sólidos se tiene colocada una celda de carga, este tanque está sujetado por tres postes, en uno de los cuales se colocó el sensor, éste medirá solo un tercio del peso total. El objetivo es que se varié el peso del tanque dependiendo si se añaden o extraen sólidos y así conocer el gasto de sólidos.

Para controlar la dosificación de los sólidos se tiene un tornillo sin fin con un motor acoplado al cual se le puede variar la velocidad mediante un inversor. Para llenar con sólidos el tanque se hace empujándolos con aire por medio de una manguera.



Fig. 2.3. Sección de fase sólida.

2.4. INSTRUMENTACIÓN DE LA SECCIÓN EXPERIMENTAL

Con el objetivo de conocer el comportamiento de la presión en el interior del tubo, en la sección experimental, se colocaron sensores de presión apareados, uno en el lomo superior de la tubería y otro en el inferior.

En la etapa de “ida” de la tubería experimental se colocó una pareja a la entrada y otra a la salida, una más en la zona de observación, parte central de la tubería, otras dos separadas 2 metros aguas arriba y aguas abajo de la zona de observación. Además se colocó un sensor de presión diferencial para conocer la pérdida de carga debido a la fricción de la tubería.

En la etapa de “retorno” de la tubería se colocó una pareja de sensores en la zona de observación, parte central de la tubería, otras dos separadas 2 metros aguas arriba y aguas abajo de la citada tubería.



Fig. 2.4. Sección experimental.

2.5. INSTRUMENTACIÓN DE LA SECCIÓN DE POSICIONAMIENTO DE LA TUBERÍA EXPERIMENTAL

Una de las cualidades que posee la instalación es la de poder hacer experimentos a diferentes inclinaciones de la tubería experimental. Este dato de inclinación debe ser una señal que alimente a la computadora. Para lograr esto es necesario que se coloque un sensor. Dicho sensor se colocó en el eje de giro de la estructura. Para mover la estructura de la tubería experimental se utilizan dos malacates.



Fig. 2.5. Sección de posicionamiento.

2.6. VARIABLES A MEDIR

Como se puede observar, en cada una de las secciones se requieren medir diferentes variables. Algunas de ellas son del mismo tipo en diferentes secciones, por ello las podemos agrupar en variables de:

Presión, presión diferencial, gasto del líquido y del gas, temperatura del gas, dosificador de sólidos, peso de sólidos, posición de la tubería experimental y velocidad de giro de los motores.

A continuación se explica cada una de ellas.

2.6.1. PRESIÓN

La presión es la fuerza ejercida por unidad de superficie y puede expresarse en Kg/cm^2 , PSI (libras por pulgada cuadrada), bar, atmósfera, pascal, etc.

La presión puede medirse en valores absolutos o diferenciales, la figura 2.9 ilustra las clases de presión que los instrumentos miden comúnmente en la industria.

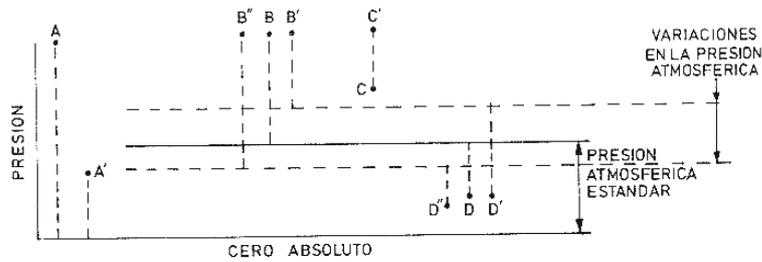


Fig. 2.6. Formas de ver la medida de presión.

La presión absoluta se mide con relación al cero absoluto de presión, puntos A y A' de la figura.

La presión atmosférica es la presión ejercida por la atmósfera terrestre medida con un barómetro. A nivel del mar, esta presión es aproximadamente igual a 760mmHg, este valor define la presión ejercida por la atmósfera.

La presión manométrica es la determinada por un elemento que mide la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica del lugar donde se efectúan la medición, punto B de la figura. Hay que señalar que al aumentar o disminuir la presión atmosférica, disminuye o aumenta respectivamente la presión leída, puntos B y B', que bien es despreciable al medir presiones elevadas.

La presión diferencial es la diferencia de presión entre dos puntos, puntos C y C'.

La presión vacuométrica es la diferencia de presiones entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta, es decir, la presión medida por debajo de la atmosférica, puntos D, D', y D''. Las variaciones de la presión atmosférica influyen considerablemente en estas lecturas.

Para medir la presión a lo largo de la instalación se utilizaron transductores de presión de membrana rasante.

La membrana consiste en una o varias cápsulas circulares conectadas rígidamente entre si por soldadura, de tal forma que al aplicar presión cada cápsula se deforma. El material de la membrana es comúnmente aleación de níquel. Estas deformaciones son detectadas por strain gage que conectados a una fuente de voltaje traducen el valor de presión en un voltaje.

Este tipo de sensores llevan colocado un strain gage en la membrana. Los strain gages basan su funcionamiento en la variación de resistencia que tiene lugar cuando un hilo se encuentra sometido a una tensión mecánica por la acción de una fuerza (figura 2.7.).

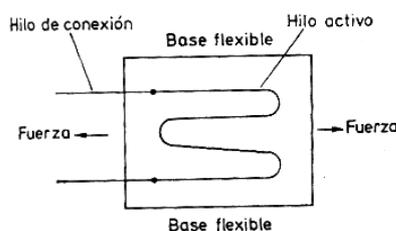


Fig. 2.7. Construcción de un strain gages.

Los strain gages están formados por varios bucles de hilo muy fino que están pegados a una hoja a base de cerámica, papel o plástico.

La aplicación de la fuerza estira o comprime los hilos, según sea el tipo de esfuerzo, modificando la resistencia del strain gage.

El strain gage forma parte de un puente de Wheatstone (figura 2.8.), cuando está sin tensión tiene una cierta resistencia eléctrica y con cualquier variación de la fuerza aplicada que mueva la membrana del transductor cambia la resistencia del strain gage y desequilibra el puente.

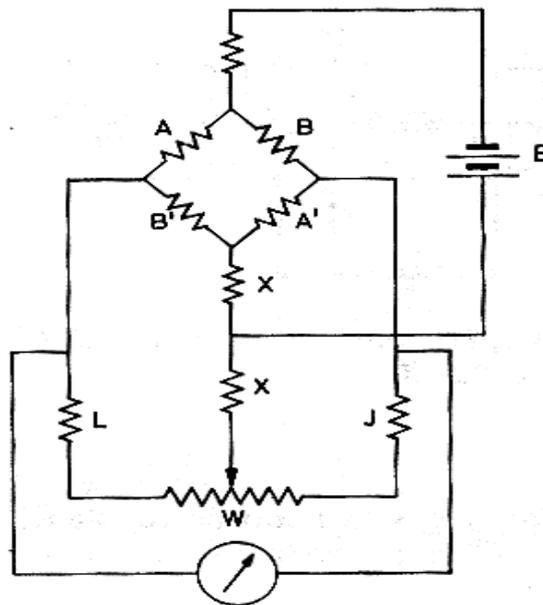


Fig. 2.8. Conexión de un strain gages.

Una innovación del strain gage la constituyen los transductores de presión de silicio difundido. Consisten en un elemento de silicio situado dentro de una cámara que contiene silicón que a su vez está en contacto con el proceso a través de un diafragma flexible. El sensor esta fabricado a partir de un sensor monocristalino de silicio en cuyo seno se difunde boro para formar varios puentes de Wheatstone constituyendo así un strain gage autocontenido (Figura 2.9.). El espesor de la membrana del sensor determina el intervalo de medición del instrumento.

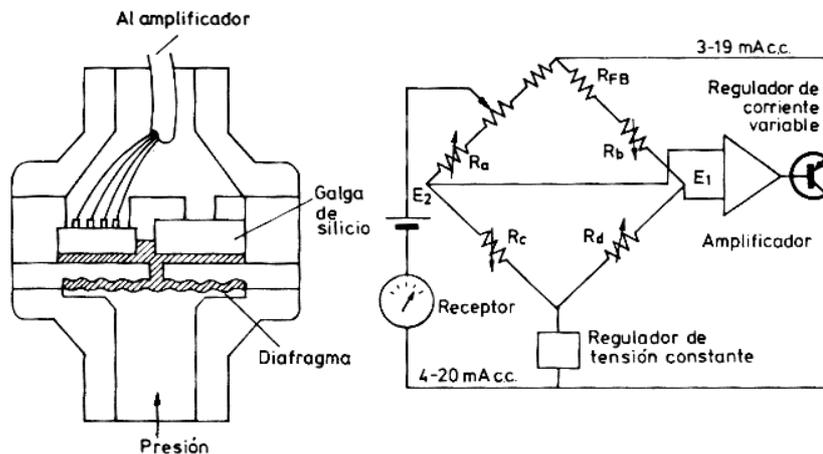


Fig. 2.9. Strain gages autocontenido.

Cuando no existe presión, los valores de E1 y E2 son iguales, al aplicar la presión del proceso Ra y Rd varían al igual que Rb y Rc lo que da lugar a una diferencia de valores en E1 y E2. Esta diferencia se aplica a un amplificador diferencial de alta ganancia para obtener una señal de salida de 4 a 20 mA.

Los strain gages de este tipo pueden alimentarse con C.C. o C.A. Tienen una respuesta en frecuencia excelente y pueden utilizarse en medidas estáticas y dinámicas, generalmente no son influidas por campos magnéticos, poseen una señal de alta sensibilidad a vibraciones. además poseen una gran ventaja que es la de estar en contacto directo con el proceso sin mecanismos intermedios

2.6.1.1. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN EN LA DESCARGA DE LA BOMBA

Para medir la presión en la descarga de la bomba se colocó un arreglo manómetro sensor, justo en la descarga de la bomba. El arreglo quedó instalado de la siguiente forma (figura 2.10.).



Fig. 2.10. Presión en la descarga de la bomba.

2.6.1.2. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN PARA MEDIR LA PÉRDIDA DE CARGA

Para medir la pérdida de carga debida a la estrangulación de la válvula se colocó un sensor aguas abajo de ella. Para considerar también las pérdidas por los codos y la misma tubería, se colocó un sensor en el carrito, antes de la mezcla. La siguiente figura muestra la colocación de los sensores (Fig. 2.11).



Fig. 2.11. Sensores para medir la pérdida de carga.

Para fijar los sensores a la tubería es necesario utilizar acopladores para conectarlos a conexiones hidráulicas estándar NPT de 1/8" de diámetro. Como se muestra a continuación (Fig. 2.12.).

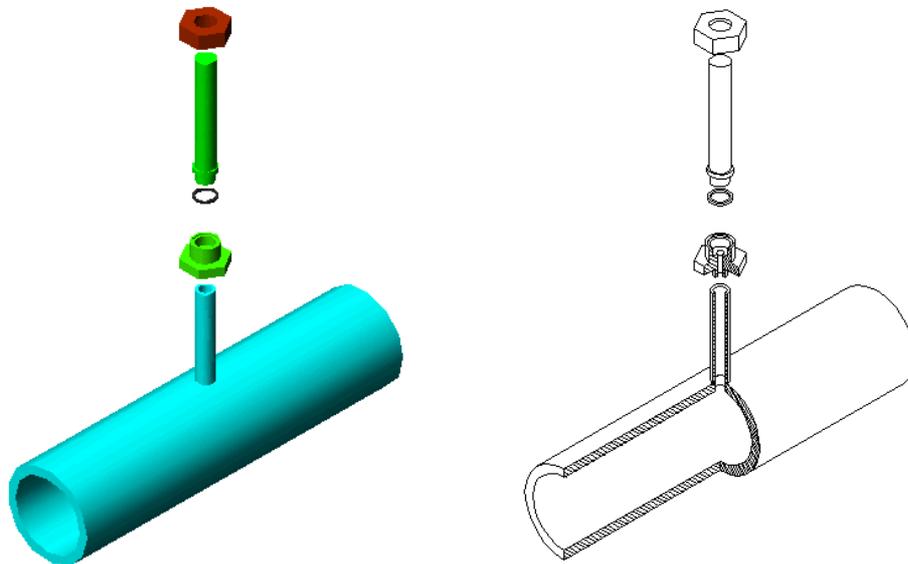


Fig. 2.12. Colocación de los sensores en la tubería.

2.6.1.3. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN EN LA INYECCIÓN DE GAS

Para conocer la presión del gas, en la instalación experimental, se colocaron sensores de presión tanto en la tubería de 2" de diámetro como en la de 1" de diámetro. Estos sensores se colocaron aguas abajo de la placa de orificio, instalada para la medición del gasto (Fig. 2.13.).



Fig. 2.13. Presión en la inyección de gas.

El acoplamiento de los sensores con la tubería se puede ver en la figura 2.12.

2.6.1.4. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN PARA LA PRESURIZACIÓN DEL TANQUE DE SÓLIDOS

El tanque de almacenamiento de sólidos es necesario que esté presurizado, a la misma presión del flujo inyección, esto para que cuando se quiera inyectar sólidos a la zona de mezclado no se tenga una diferencia de presión entre el tanque y el flujo la inyección, que ocasione que los sólidos no fluyan con facilidad

El arreglo manómetro-sensor está colocado en la parte superior del tanque de almacenamiento de sólidos, como se muestra en la siguiente figura (Fig. 2.14.).



Fig. 2.14. Tanque de almacenamiento de los sólidos.

2.6.1.5. COLOCACIÓN DE LOS SENSORES DE PRESIÓN EN LA TUBERÍA EXPERIMENTAL

Debido a que en la sección experimental transita un flujo multifásico. Por la parte superior, del interior de la tubería, fluiría el gas y para evitar que se queden burbujas atrapadas en las cavidades de los sensores de presión, se utilizaron sensores de membrana rasante y para garantizar su colocación al ras del interior de la tubería se diseñaron y construyeron piezas especiales figura 2.15.



Fig. 2.15. Piezas diseñadas y herramienta.

Para hacer las preparaciones de los sensores de presión, primero se colocaron las bridas en el lugar donde se montará el sensor. Se pone la guía junto con la broca y se realiza un agujero pasado. Figura 2.16.



Fig. 2.16. Perforación del tubo de acrílico.

La siguiente perforación se realiza con una broca diseñada para realizar la cavidad en donde se aloja el sensor. Primeramente se calibra la profundidad de la perforación. Figura 2.17.

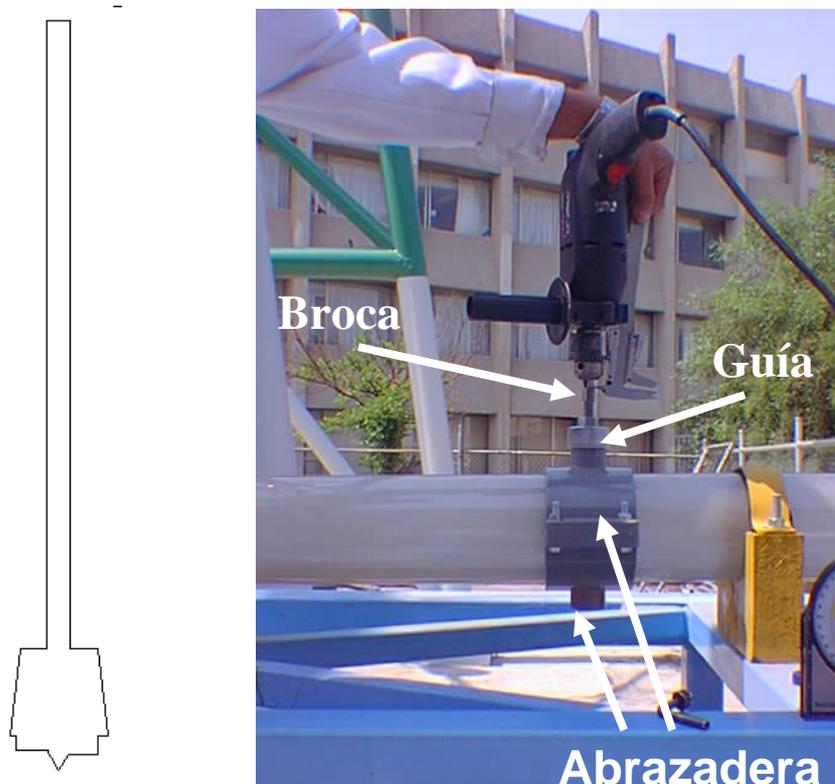


Fig. 2.17. Realización de la ceja para montar el sensor.

Finalmente se monta el sensor de presión. Figura 2.18.



Fig. 2.18. Colocación del sensor de presión en la tubería experimental.

A continuación se muestra un corte y el conjunto de las piezas necesarias de cómo queda la conexión del sensor en la tubería de acrílico (Fig. 2.19.).

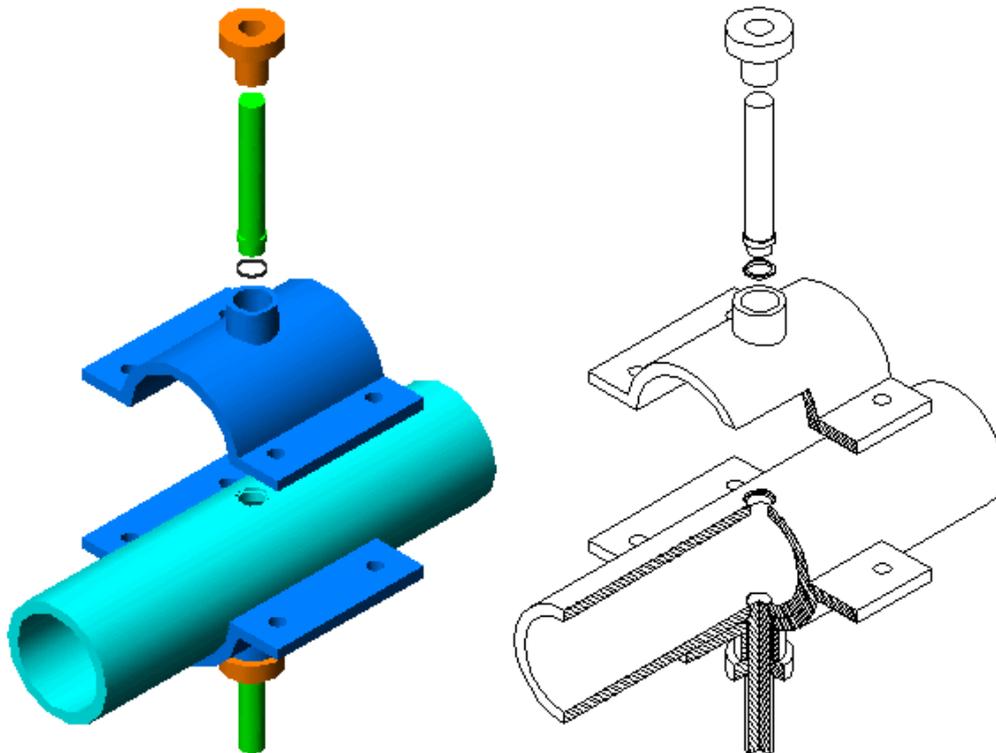


Fig. 2.19. Piezas y corte de la colocación del sensor de presión en la tubería experimental.

2.6.2. PRESION DIFERENCIAL

La presión diferencial es la que existe entre dos puntos. Para medir este tipo de presión, como la generada por la placa de orificio se utilizó un transductor de presión diferencial cuyo funcionamiento esta basado en la variación de la

inductancia de una bobina, similar al de un LVDT (Linear Variable Differential Transformer).

Cuando una corriente alterna excita al devanado primario un voltaje es inducido al devanado secundario. Cuando el núcleo está puesto a la mitad de los dos devanados del secundario, el voltaje inducido es el mismo pero opuesto en fase 180° . El voltaje en los dos devanados se cancela y por lo tanto el voltaje de salida es cero. Cuando el núcleo es movido de su posición central hay un desvalance mutuo entre el devanado primario y secundario y por lo tanto un cambio en el nivel de voltaje a la salida ya sea positivo o negativo dependiendo del movimiento del núcleo. El voltaje de salida es lineal en función a la posición del núcleo. La dirección del movimiento puede ser determinada por la fase del voltaje de salida.

La frecuencia del voltaje aplicado al devanado primario puede ser de 50 a 25000 Hz. Si el transductor de presión diferencial es usado para medir desplazamientos dinámicos, la frecuencia usada deberá ser diez veces mayor que la mayor frecuencia de la señal dinámica. Comúnmente la entrada de voltaje oscila entre 5 a 15 V y requiere una potencia menor a 1w.

2.6.2.1. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL

El sensor de presión diferencial se colocó en la parte superior de la tubería experimental. Las tomas se colocaron a 2 metros tanto aguas arriba como aguas abajo del sensor que está en la zona de observación.

Cada una de las tomas se colocó con una inclinación de 60° , ver figura 2.20, con objeto de que la toma siempre tenga agua no importando a que inclinación se encuentre la estructura y así no introducir errores en la medición debido a alguna burbuja de aire dentro de la misma.

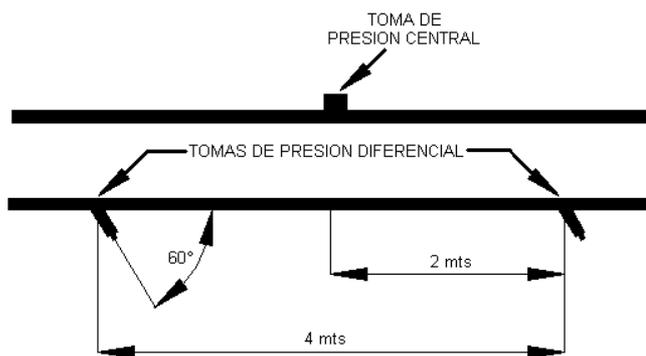


Fig. 2.20. Tomas de presión diferencial.

2.6.3. GASTO

En la mayor parte de las operaciones realizadas en procesos industriales, laboratorio y plantas piloto es muy importante la medición de gastos ya sea de líquidos o de gases.

La medición de gasto en la industria se efectúa principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido. Entre estos elementos se encuentran: la placa de orificio o diafragma, la tobera y el tubo Venturi.

La placa de orificio usada como medidor de gasto aprovecha la pérdida de carga que genera, midiendo la diferencia de presión entre el lado de alta presión y el lado de baja presión, que depende de la velocidad del fluido. Se estima que más del 60% de los medidores de gasto en la industria son de este tipo.

Las principales ventajas de este tipo de medidores de gasto son:

- Su fácil construcción y que no contienen partes móviles.
- Su funcionamiento está muy bien entendido.
- Son baratos en comparación a otro tipo de medidores.
- Se pueden usar en cualquier orientación.
- Se pueden usar en la mayoría de los gases y líquidos.

Las principales desventajas son:

- Debe ocurrir una caída de presión significativa.
- La señal de salida es no lineal.
- Puede sufrir incrustaciones de partículas y erosión, lo que provoca errores.

Debido a las ventajas con que cuentan las placas de orificio, se optó por ocuparlas para la medición de gasto tanto en la sección de líquido como en la de gas

La placa de orificio o diafragma consiste en una placa perforada instalada en la tubería, con dos tomas conectadas una aguas arriba y otra aguas abajo de la placa, en las que se mide la presión diferencial proporcional al cuadro del gasto. La disposición de las tomas pueden ser de diversas formas como se muestra en la figura 2.21.

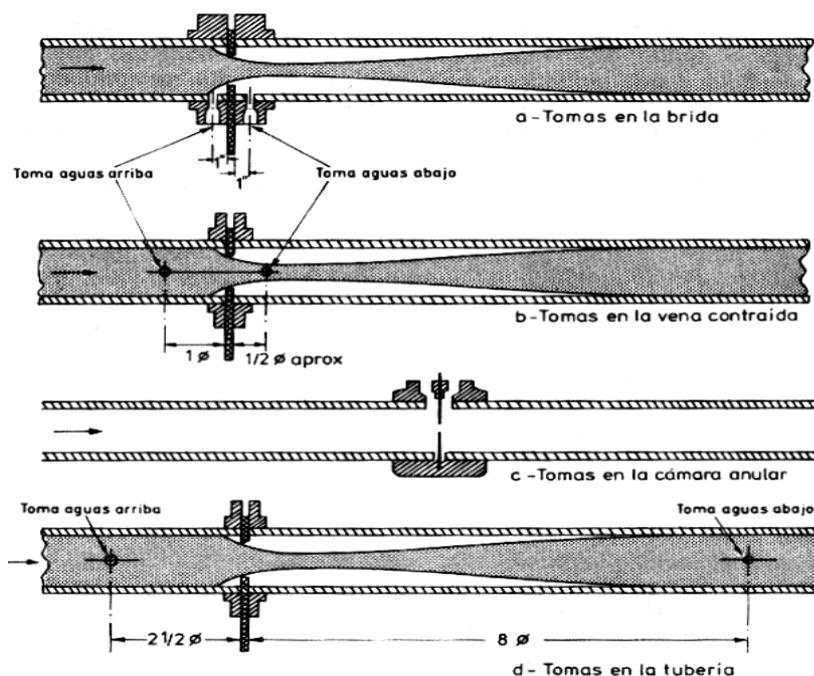


Fig. 2.21. Tipo de tomas para una placa de orificios.

Tomas en la brida: Es bastante utilizada porque su instalación es cómoda ya que las tomas están taladradas en las bridas que soportan la placa y situadas a 1 pulgada de distancia de la misma.

Tomas en la vena contraída. La toma aguas abajo esta situada a una distancia de la placa de orificio de 0.5 diámetros de la tubería y la toma aguas arriba se sitúa a 1 diámetro de la tubería.

Tomas en la cámara anular: Las tomas están situadas inmediatamente antes y después del diafragma y requieren el empleo de una cámara anular especial. Este tipo de tomas son de gran uso en Europa.

Tomas en la tubería. Las tomas aguas arriba y aguas abajo están situadas a 2.5 y 8 diámetros, respectivamente de la placa de orificio. Este tipo de tomas se emplean cuando se desea aumentar el intervalo de medida de un medidor de gasto dado, ya que están en un lugar menos sensible a la medida.

El orificio de la placa puede ser concéntrico, excéntrico o segmental, con un pequeño orificio de purga para los pequeños arrastres sólidos o gaseosos que pueda llevar el fluido (figura 2.22).

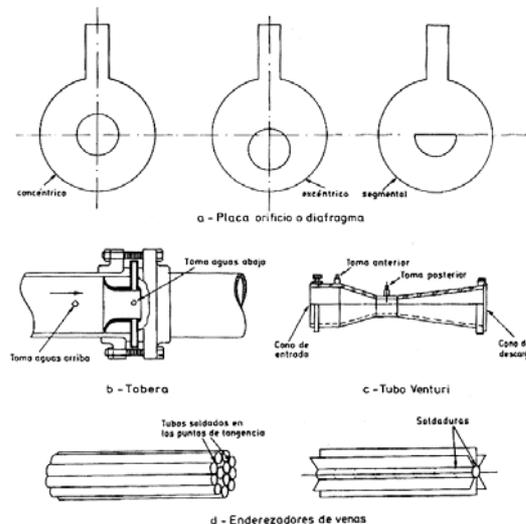


Fig. 2.22. Tipo de perforaciones para una placa de orificio.

Para el diseño de placas de orificio se utilizan normas variadas, entre las cuales se destacan las siguientes:

- ISO Organización Internacional de Estandarización.
- Norma Francesa Anfor.
- Norma ASME Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos.
- Norma AGA Asociación de Medición de Gases.
- Norma DIN.
- Norma Inglesa BS.
- Norma Italiana UNI.
- Norma ISA Sociedad de Instrumentistas de América.

Los medidores de gasto, tanto de líquido como de gas, que se optaron por ocupar en la instalación fueron del tipo placa de orificio con tomas a 1D y 0.5D (fig. 2.21. b),

con un orificio concéntrico. Dicha placa se construyó de acuerdo con la norma ISO/DIS 5167^{2.1}

En la figura 2.23. puede verse el comportamiento de la presión a lo largo de la tubería antes y después de una placa de orificio. Gráficamente se observa porqué las tomas son a 1D aguas arriba de la placa de orificio y 0.5D aguas abajo de la placa de orificio.

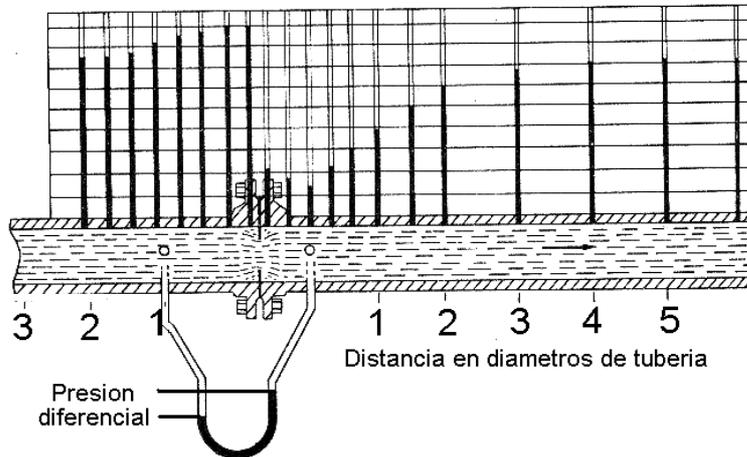


Fig. 2.23. Comportamiento de la presión aguas arriba y aguas abajo de la placa de orificios.

La fórmula del gasto, para fluidos no compresibles, obtenida con los elementos de presión diferencial se basa en la aplicación del teorema de Bernoulli (altura cinética + altura de presión + altura potencial =cte.) (Figura 2.24).

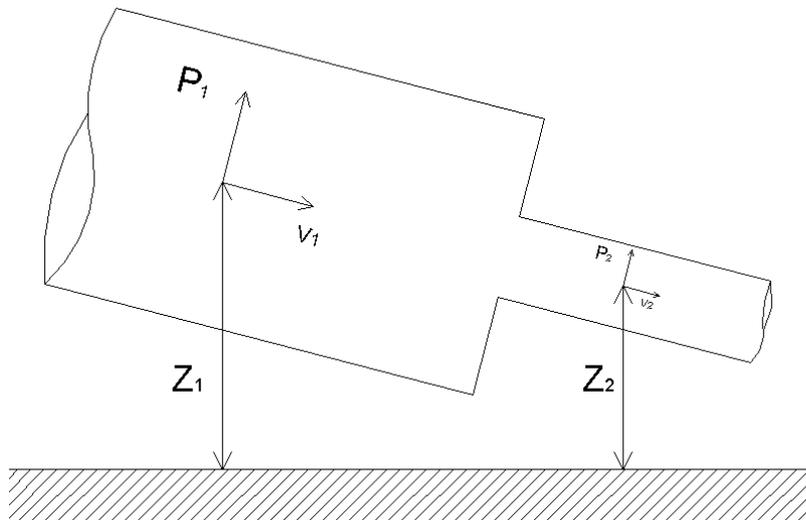


Fig. 2.24. Teorema de Bernoulli.

Se tiene:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2} v_1^2 + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2} v_2^2 + gZ_2$$

Ec. 2.1.

^{2.1} Para mas detalle de esta norma, consultar Norma ISO/DIS 5167.

donde:

P_1 y P_2 son las presiones ejercidas por el fluido.

v_1 y v_2 son las velocidades del fluido.

Z_1 y Z_2 son las alturas.

ρ es la densidad del fluido.

g es la aceleración de la gravedad (9.8m/s^2).

Considerando una tubería horizontal, es decir que: $Z_1=Z_2$ entonces.

$$(P_1 - P_2) = \frac{\rho}{2}(v_2^2 - v_1^2) \quad \text{Ec. 2.2.}$$

Sabiendo que:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2. \quad \text{Ec. 2.3.}$$

Donde:

Q es el gasto.

A_1 es el área del tubo antes de la obstrucción.

A_2 es el área del tubo después de la obstrucción.

Entonces:

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1} v_2 \quad \text{Ec. 2.4.}$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \beta^2 \quad \text{Ec. 2.5.}$$

$$\beta = \frac{d}{D} \quad \text{Ec. 2.6.}$$

Sustituyendo 2.5 en 2.4.

$$v_1 = \beta^2 v_2 \quad \text{Ec. 2.7.}$$

Sustituyendo 2.7 en 2.2 y reacomodando.

$$(v_2^2 - (\beta^2 v_2)^2) = \frac{2}{\rho}(P_1 - P_2) \quad \text{Ec. 2.8.}$$

$$(v_2^2 - \beta^4 v_2^2) = \frac{2}{\rho}(P_1 - P_2) \quad \text{Ec. 2.9.}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad \text{Ec. 2.10.}$$

Sustituyendo 2.10 en 2.3.

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2}{\rho(1-\beta^4)}} \sqrt{(P_1 - P_2)} \quad \text{Ec. 2.11.}$$

Haciendo K igual a:

$$A_2 \sqrt{\frac{2}{\rho(1-\beta^4)}} = K \quad \text{Ec. 2.12.}$$

Y

$$(P_1 - P_2) = \Delta P \quad \text{Ec. 2.13.}$$

Sustituyendo 2.13 y 2.12 en 2.11

$$Q_v = K \sqrt{\Delta P} \quad \text{Ec. 2.14.}$$

En la Ec. 2.14 no se están considerando elementos que podrían generar errores, tal como las pérdidas por fricción en la tubería. Para ajustar estos posibles errores, se añade un término a la ecuación que es conocido como coeficiente de descarga (C_d). Este coeficiente proviene de datos experimentales avalados por gran cantidad de datos de muchos países y laboratorios que se han acumulado durante años (Fig. 2.25.), para el caso particular de las tomas del tipo antes mencionado (Fig. 2.21b.).

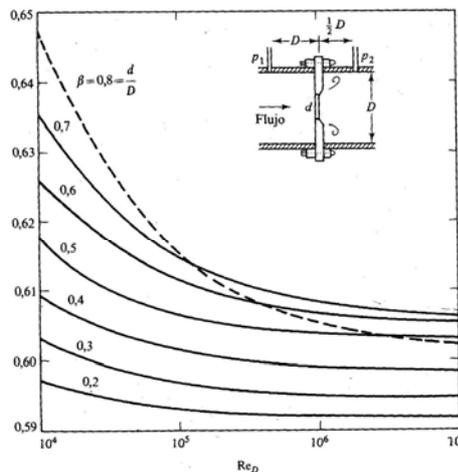


Fig. 2.25. Datos experimentales para la obtención del C_d .

A partir de estas curvas se ha establecido una ecuación para el cálculo del C_d que es la siguiente:

$$C_d = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0.75} + 0.090L_1 \left(\beta^4(1-\beta^4)^{-1} \right) - 0.0337L_2\beta^3 \quad \text{Ec. 2.15.}$$

Re, número de Reynolds, es un coeficiente adimensional el cual sirve para identificar que tan turbulento es el flujo y se calcula de la siguiente forma.

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} \quad \text{Ec. 2.16.}$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ec. 2.17.}$$

$$\therefore Re = \frac{VD}{v} \quad \text{Ec. 2.18.}$$

Por lo tanto la ecuación para el cálculo del gasto es la siguiente:

$$Q_v = C_d K \sqrt{\Delta P} \quad \text{Ec. 2.19.}$$

En el caso de fluidos compresibles, su densidad varía en toda la sección ya que cambia la presión, la temperatura y el peso específico. No obstante la expresión final para fluidos compresibles es muy similar a la de los fluidos incompresibles introduciendo un coeficiente experimental de expansión, para considerar la expansión ocurrida durante la aceleración del flujo.

$$Q_m = N_1 E_v Y d^2 C_d \sqrt{\rho_{t,p} \Delta P} \quad \text{Ec. 2.20.}$$

Donde:

C_d ^{2.2} coeficiente de descarga de la placa de orificio.

d diámetro interior de la placa de orificios tomado a la temperatura de las condiciones de flujo.

ΔP diferencial de presión generada en la placa de orificio.

E_v aproximación del factor de velocidad.

N_1 factor de conversión de unidades.

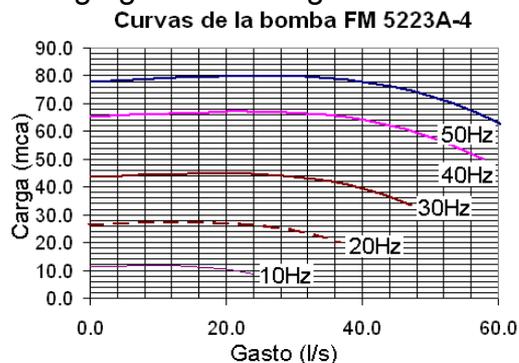
Y factor de expansión.

Q gasto.

$\rho_{t,p}$ densidad del fluido a las condiciones de flujo (P_f , T_f).

2.6.3.1. GASTO DE LÍQUIDO

Como ya se mencionó anteriormente, se tiene una bomba centrífuga marca Farbanks Morse modelo FM 5223A-4^{2.3}, para inyectar el líquido al sistema cuya curva de comportamiento carga.gasto es la siguiente.



Graf. 2.1. Curvas de la bomba FM 5223A-4.

^{2.2} El coeficiente de descarga y el factor de expansión son datos empíricos provenientes de experimentos

^{2.3} Para mas detalles de la bomba FM 5223A-4 ver el manual de la bomba. Propiedad del IMP.

Como se mencionó anteriormente, las placas de orificio utilizadas para la medición de gasto, tanto de líquido como de gas, se diseñaron bajo las normas ISO (ref. 2.1), donde se deben tener las siguientes consideraciones para su construcción.

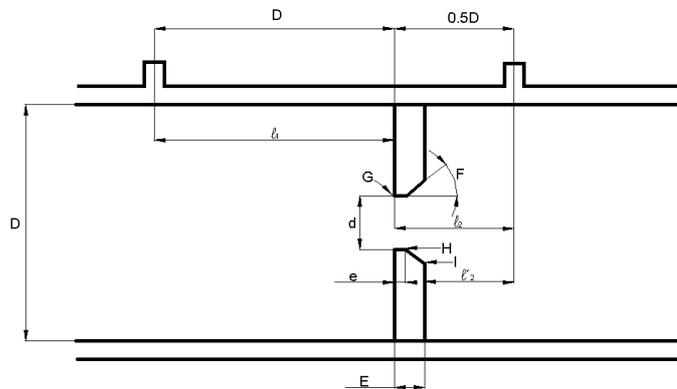


Fig. 2.26. Condiciones de construcción para una placa de orificio.

$$0.0005D \leq e \leq 0.02D$$

$$e \leq E \leq 0.05D$$

$$30^\circ \leq F \leq 60^\circ$$

$$0.2 \leq \beta \leq 0.75$$

$$d \neq 12.5\text{mm}$$

$$0.9D \leq l_1 \leq 1.1D$$

$$0.48D \leq l_2 \leq 0.52D \text{ si } \beta \leq 0.6$$

$$0.49D \leq l_2 \leq 0.51D \text{ si } \beta > 0.6$$

El borde G no debe contener ninguna imperfección, como rebabas y debe tener un ángulo de 90° , permitiendo hasta un borde de $0.0004D$ de radio.

Para los bordes H e I, no importan tanto los defectos.

Para la tubería de 4" de diámetro, se propone dos placas con las siguientes características:

$$d_1 = 63\text{mm.}$$

$$d_2 = 54\text{mm.}$$

$$E = 0.03D$$

$$E = 0.03 * 101.6$$

$$E = 3.048\text{mm}$$

Se propone un valor de e y F :

$$e = 1.524\text{mm.}$$
$$F = 60^\circ.$$

Usando la Ec. 2.6, las relaciones de diámetros.

$$\beta_1 = 0.62.$$
$$\beta_2 = 0.53.$$

El área en el tubo es:

$$A_1 = 0.0081\text{m}^2.$$

El área en la placa es:

$$A_{2-\beta_1} = 0.0031\text{m}^2.$$

$$A_{2-\beta_2} = 0.0022\text{m}^2.$$

Calculando L_1 y L'_2 se tiene:

$$L_1 = D = 101.6$$

$$L'_2 = \frac{l_2 - E}{D}$$

$$l_2 = 0.5D = 50.8\text{mm}$$

$$L'_2 = \frac{50.8 - 3.048}{101.6}$$

$$L'_2 = 0.47$$

De la Ec. 2.19 se tiene.

$$\Delta P = \left(\frac{Q}{C_d K} \right)^2$$

Ec. 2.22.

Teniendo en cuenta que para el agua:

$$\nu = 1.02 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}.$$

$$g = 9.810 \text{ m/s}^2.$$

$$\gamma = 9790 \text{ N/m}^3.$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = 9790 \text{ N/m}^3.$$

Utilizando las ecuaciones 2.15, 2.16, 2.17, 2.18 y 2.22 y considerando que el gasto máximo de la bomba, según su curva de operación ver grafica 2.1, es 40 l/s a su

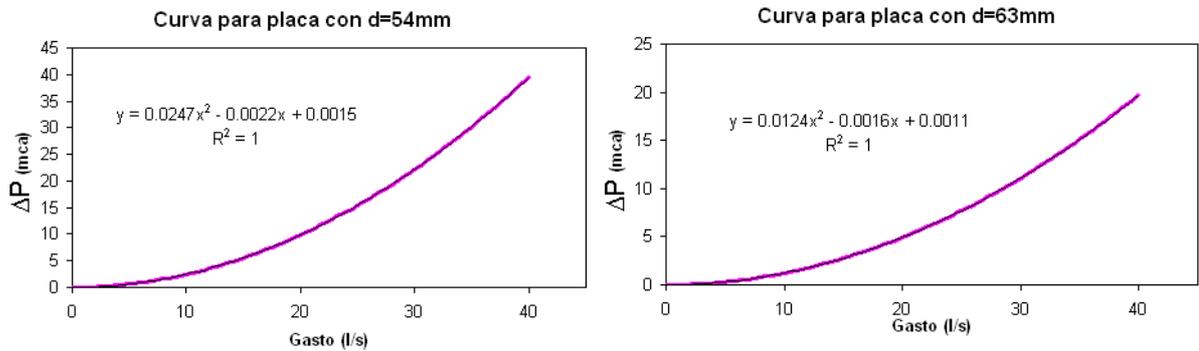
velocidad nominal. Se generó la tabla 2.1, en donde se calcularon las diferentes velocidades de flujo, números de Reynolds, valores de C_d y las ΔP , para diferentes gastos.

Tabla para una $\beta=0.53$

Tabla para una $\beta=0.62$

Q (l/s)	v (m/s)	Re	C	Δh (mca)	Δh (mCHg)	Δh (psi)	Q (l/s)	V (m/s)	Re	C	Δh (mca)	Δh (mCHg)	Δh (psi)
0.00	0.0000			0.0000	0.00000	0	0.00	0.0000			0.0000	0.00000	0
0.10	0.0118	1,200	0.6909	0.0002	0.00001	0.0002683	0.10	0.0118	1,200	0.7342	0.0001	0.00001	0.0001197
0.15	0.0177	1,800	0.6680	0.0005	0.00004	0.0006458	0.15	0.0177	1,800	0.7005	0.0002	0.00002	0.0002957
0.20	0.0235	2,401	0.6555	0.0008	0.00007	0.0011923	0.20	0.0235	2,401	0.6821	0.0004	0.00003	0.0005545
0.30	0.0353	3,601	0.6418	0.0020	0.00016	0.0027977	0.30	0.0353	3,601	0.6621	0.0009	0.00007	0.0013242
0.40	0.0471	4,801	0.6344	0.0036	0.00028	0.005091	0.40	0.0471	4,801	0.6512	0.0017	0.00014	0.0024538
0.50	0.0589	6,001	0.6296	0.0057	0.00045	0.0080755	0.50	0.0589	6,001	0.6442	0.0027	0.00022	0.0038859
0.70	0.0824	8,402	0.6238	0.0113	0.00090	0.0161251	0.70	0.0824	8,402	0.6356	0.0055	0.00044	0.0078233
1.00	0.1177	12,003	0.6190	0.0235	0.00187	0.0334168	1.00	0.1177	12,003	0.6286	0.0115	0.00091	0.0163232
1.50	0.1766	18,004	0.6150	0.0536	0.00426	0.0761873	1.50	0.1766	18,004	0.6226	0.0263	0.00209	0.0374571
2.00	0.2354	24,005	0.6127	0.0960	0.00762	0.1364294	2.00	0.2354	24,005	0.6194	0.0473	0.00376	0.0672596
2.50	0.2943	30,007	0.6113	0.1507	0.01196	0.2141649	2.50	0.2943	30,007	0.6173	0.0745	0.00591	0.1058069
3.00	0.3532	36,008	0.6103	0.2177	0.01728	0.3094075	3.00	0.3532	36,008	0.6158	0.1077	0.00855	0.1530894
3.50	0.4120	42,009	0.6096	0.2971	0.02358	0.4221668	3.50	0.4120	42,009	0.6147	0.1472	0.01168	0.2091114
4.00	0.4709	48,011	0.6090	0.3888	0.03085	0.5524498	4.00	0.4709	48,011	0.6139	0.1927	0.01530	0.273886
4.50	0.5297	54,012	0.6085	0.4928	0.03911	0.7002619	4.50	0.5297	54,012	0.6132	0.2445	0.01940	0.3474093
5.00	0.5886	60,013	0.6082	0.6091	0.04834	0.8656074	5.00	0.5886	60,013	0.6126	0.3024	0.02400	0.4296872
5.50	0.6474	66,014	0.6078	0.7378	0.05856	1.0484899	5.50	0.6474	66,014	0.6121	0.3664	0.02908	0.5207224
6.00	0.7063	72,016	0.6076	0.8789	0.06975	1.2489124	6.00	0.7063	72,016	0.6117	0.4367	0.03466	0.6205169
6.50	0.7652	78,017	0.6073	1.0322	0.08192	1.4668775	6.50	0.7652	78,017	0.6114	0.5130	0.04072	0.7290728
7.00	0.8240	84,018	0.6071	1.1980	0.09508	1.7023872	7.00	0.8240	84,018	0.6111	0.5956	0.04727	0.8463915
7.50	0.8829	90,020	0.6069	1.3760	0.10921	1.9554436	7.50	0.8829	90,020	0.6108	0.6843	0.05431	0.9724746
8.00	0.9417	96,021	0.6068	1.5665	0.12432	2.2260483	8.00	0.9417	96,021	0.6106	0.7792	0.06184	1.1073233
8.50	1.0006	102,022	0.6066	1.7692	0.14042	2.5142028	8.50	1.0006	102,022	0.6104	0.8803	0.06986	1.2509386
9.00	1.0595	108,024	0.6065	1.9844	0.15749	2.8199085	9.00	1.0595	108,024	0.6102	0.9875	0.07837	1.4033215
9.50	1.1183	114,025	0.6064	2.2118	0.17554	3.1431665	9.50	1.1183	114,025	0.6100	1.1009	0.08737	1.564473
10.00	1.1772	120,026	0.6063	2.4517	0.19458	3.4839779	10.00	1.1772	120,026	0.6098	1.2205	0.09686	1.7343938
10.50	1.2360	126,028	0.6062	2.7039	0.21459	3.8423438	10.50	1.2360	126,028	0.6097	1.3462	0.10684	1.9130847
11.00	1.2949	132,029	0.6061	2.9684	0.23559	4.2182651	11.00	1.2949	132,029	0.6096	1.4782	0.11731	2.1005464
11.50	1.3538	138,030	0.6060	3.2453	0.25756	4.6117426	11.50	1.3538	138,030	0.6094	1.6162	0.12827	2.2967794
12.00	1.4126	144,032	0.6059	3.5345	0.28052	5.022777	12.00	1.4126	144,032	0.6093	1.7605	0.13972	2.5017844
12.50	1.4715	150,033	0.6058	3.8361	0.30445	5.4513692	12.50	1.4715	150,033	0.6092	1.9109	0.15166	2.7155619
13.00	1.5303	156,034	0.6058	4.1501	0.32937	5.8975197	13.00	1.5303	156,034	0.6091	2.0675	0.16409	2.9381123
13.50	1.5892	162,036	0.6057	4.4764	0.35527	6.3612293	13.50	1.5892	162,036	0.6090	2.2303	0.17701	3.1694361
14.00	1.6481	168,037	0.6057	4.8151	0.38215	6.8424984	14.00	1.6481	168,037	0.6089	2.3993	0.19042	3.4095338
14.50	1.7069	174,038	0.6056	5.1661	0.41001	7.3413276	14.50	1.7069	174,038	0.6088	2.5744	0.20432	3.6584057
15.00	1.7658	180,040	0.6055	5.5295	0.43885	7.8577174	15.00	1.7658	180,040	0.6088	2.7557	0.21871	3.9160523
15.50	1.8246	186,041	0.6055	5.9052	0.46867	8.3916684	15.50	1.8246	186,041	0.6087	2.9432	0.23359	4.1824738
16.00	1.8835	192,042	0.6054	6.2933	0.49947	8.9431809	16.00	1.8835	192,042	0.6086	3.1369	0.24896	4.4576706
16.50	1.9423	198,043	0.6054	6.6938	0.53125	9.5122554	16.50	1.9423	198,043	0.6086	3.3367	0.26482	4.7416431
17.00	2.0012	204,045	0.6054	7.1066	0.56402	10.098892	17.00	2.0012	204,045	0.6085	3.5427	0.28117	5.0343915
17.50	2.0601	210,046	0.6053	7.5318	0.59776	10.703092	17.50	2.0601	210,046	0.6084	3.7549	0.29801	5.3359261
18.00	2.1189	216,047	0.6053	7.9693	0.63248	11.324855	18.00	2.1189	216,047	0.6084	3.9732	0.31534	5.6462172
18.50	2.1778	222,049	0.6052	8.4192	0.66819	11.964181	18.50	2.1778	222,049	0.6083	4.1978	0.33316	5.9652951
19.00	2.2366	228,050	0.6052	8.8814	0.70488	12.621072	19.00	2.2366	228,050	0.6083	4.4285	0.35147	6.2931499
19.50	2.2955	234,051	0.6052	9.3561	0.74254	13.295526	19.50	2.2955	234,051	0.6082	4.6654	0.37027	6.6298719
20.00	2.3544	240,053	0.6051	9.8430	0.78119	13.987545	20.00	2.3544	240,053	0.6082	4.9084	0.38956	6.9751914
20.50	2.4132	246,054	0.6051	10.3424	0.82082	14.697128	20.50	2.4132	246,054	0.6081	5.1577	0.40934	7.3293785
21.00	2.4721	252,055	0.6051	10.8541	0.86143	15.424277	21.00	2.4721	252,055	0.6081	5.4131	0.42961	7.6923435
21.50	2.5309	258,057	0.6051	11.3781	0.90303	16.168991	21.50	2.5309	258,057	0.6081	5.6747	0.45037	8.0640865
22.00	2.5898	264,058	0.6050	11.9145	0.94560	16.93127	22.00	2.5898	264,058	0.6080	5.9425	0.47162	8.4464677
22.50	2.6487	270,059	0.6050	12.4633	0.98915	17.711115	22.50	2.6487	270,059	0.6080	6.2164	0.49337	8.8339073
23.00	2.7075	276,061	0.6050	13.0245	1.03369	18.508527	23.00	2.7075	276,061	0.6080	6.4965	0.51560	9.2319856
23.50	2.7664	282,062	0.6050	13.5979	1.07920	19.323504	23.50	2.7664	282,062	0.6079	6.7829	0.53832	9.6388425
24.00	2.8252	288,063	0.6049	14.1838	1.12570	20.156048	24.00	2.8252	288,063	0.6079	7.0753	0.56153	10.054478
24.50	2.8841	294,065	0.6049	14.7820	1.17318	21.006158	24.50	2.8841	294,065	0.6079	7.3740	0.58524	10.478893
25.00	2.9430	300,066	0.6049	15.3926	1.22164	21.873836	25.00	2.9430	300,066	0.6078	7.6788	0.60943	10.912087
25.50	3.0018	306,067	0.6049	16.0156	1.27108	22.759908	25.50	3.0018	306,067	0.6078	7.9899	0.63412	11.344061
26.00	3.0607	312,069	0.6049	16.6509	1.32150	23.661892	26.00	3.0607	312,069	0.6078	8.3070	0.65929	11.804814
26.50	3.1195	318,070	0.6048	17.2985	1.37290	24.582271	26.50	3.1195	318,070	0.6077	8.6304	0.68495	12.264347
27.00	3.1784	324,071	0.6048	17.9586	1.42528	25.520218	27.00	3.1784	324,071	0.6077	8.9600	0.71111	12.732659
27.50	3.2372	330,072	0.6048	18.6310	1.47865	26.475732	27.50	3.2372	330,072	0.6077	9.2957	0.73775	13.209751
28.00	3.2961	336,074	0.6048	19.3157	1.53299	27.448815	28.00	3.2961	336,074	0.6077	9.6376	0.76489	13.695623
28.50	3.3550	342,075	0.6048	20.0129	1.58832	28.439466	28.50	3.3550	342,075	0.6076	9.9857	0.79252	14.190276
29.00	3.4138	348,076	0.6047	20.7223	1.64463	29.447684	29.00	3.4138	348,076	0.6076	10.3400	0.82063	14.693708
29.50	3.4727	354,078	0.6047	21.4442	1.70192	30.473472	29.50	3.4727	354,078	0.6076	10.7004	0.84924	15.205921
30.00	3.5315	360,079	0.6047	22.1784	1.76019	31.516827	30.00	3.5315	360,079	0.6076	11.0670	0.87834	15.726914
30.50	3.5904	366,080	0.6047	22.9250	1.81944	32.577752	30.50	3.5904	366,080	0.6075	11.4398	0.90792	16.256688
31.00	3.6493	372,082	0.6047	23.6839	1.87967	33.656245	31.00	3.6493	372,082	0.6075	11.8188	0.93800	16.795243
31.50	3.7081	378,083	0.6047	24.4552	1.94089	34.752307	31.50	3.7081	378,083	0.6075	12.2040	0.96857	17.342578
32.00	3.7670	384,084	0.6047	25.2389	2.00308	35.865939	32.00	3.7670	384,084	0.6075	12.5953	0.99963	17.896694
32.50	3.8258	390,086	0.6046	26.0349	2.06626	36.997139	32.50	3.8258	390,086	0.6075	12.9928	1.03118	18.463591
33.00	3.8847	396,087	0.6046	26.8433									

Con esta tabla se generó la gráfica 2.2. Donde se puede ver que la diferencial de presión generada por la placa de orificio es diferente para cada una. Además se presenta un comportamiento no lineal como se esperaba.



Graf. 2.2. Curva de comportamiento de la placa de orificio para esta tubería.

2.6.3.1.1. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE GASTO DE LÍQUIDO

La placa de orificio se colocó entre dos bridas, teniendo en cuenta el sentido del flujo (Fig. 2.22). Como la variable que se requiere medir es la caída de presión en la placa de orificio se colocó un sensor de presión diferencial (Fig. 2.23).

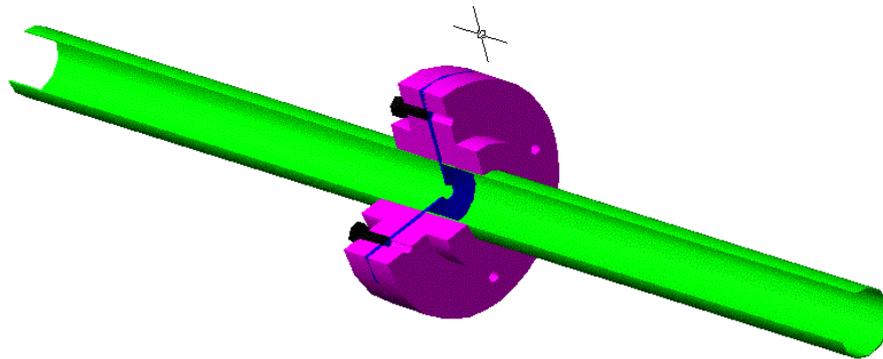


Fig. 2.27. Colación de la placa de orificio.

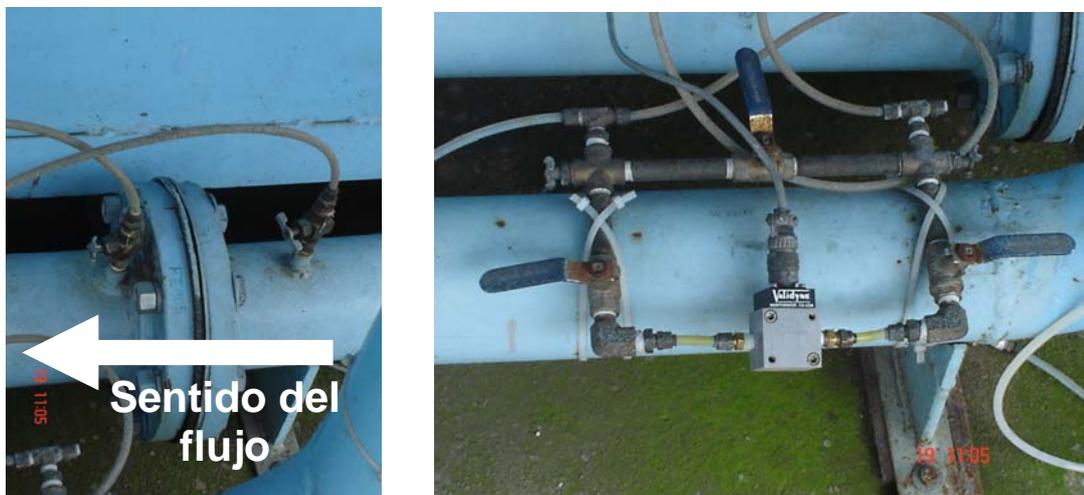


Fig. 2.28. Placa de orificio y sensor de presión diferencial.

2.6.3.2. GASTO DE GAS

El calculo para el gasto de gas se basó en las normas del Instituto del Petróleo de América (American Petroleum Institute^{2.4}), específicamente en el Manual de Mediciones Estándar para el Petróleo (Manual of Petroleum Measurement Standards) Capítulo 14, Medición del Flujo de Gas Natural (Natural Gas Fluids Measurement).

Según estas normas, se tiene que el gasto puede calcularse con la Ec.2.20.

$$Q_m = N_1 E_v Y d^2 C_d \sqrt{\rho_{t,p} \Delta P} \quad \text{Ec. 2.20.}$$

Siguiendo las normas se tiene que:

$$E_v = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad \text{Ec. 2.21.}$$

$$\beta = \frac{d}{D} \quad \text{Ec. 2.22.}$$

Donde:

d diámetro interior de la placa de orificio calculada a la temperatura del flujo.

D diámetro interno del tubo de medición calculado a la temperatura del flujo.

β razón de diámetros calculados a condiciones de flujo.

Para calcular el diámetro interno del orificio de la placa se tiene que:

$$d = d_r (1 + \alpha_1 (T_f - T_r)) \quad \text{Ec. 2.23.}$$

$$d_r = d_m (1 + \alpha_1 (T_r - T_m)) \quad \text{Ec. 2.24.}$$

Donde:

d_r referencia del diámetro interno del orificio de la placa a T_r .

d_m diámetro interno de la placa de orificio medido a T_m .

T_f temperatura del fluido en las condiciones de flujo.

T_r temperatura de referencia del diámetro interno del orificio de la placa.

T_m temperatura de la placa de orificio o del tubo en el tiempo en que se realizó la medición.

α_1 ^{2.5} coeficiente lineal de expansión térmica para el material de la placa de orificio.

Para calcular el diámetro interno del tubo:

$$D = D_r (1 + \alpha_2 (T_f - T_r)) \quad \text{Ec. 2.25.}$$

^{2.4} Para mas detalles del diseño de la placa de orificio para aire consultar las normas del American Petroleum Institute, propiedad del IMP.

^{2.5} El coeficiente de expansión térmica para acero al carbón es $\alpha=0.0000112$ y para latón es $\alpha=0.0000143$.

$$D_r = D_m (1 + \alpha_2 (T_r - T_m)) \quad \text{Ec. 2.26.}$$

Donde:

α_2 coeficiente lineal de expansión térmica para el material del tubo (ver referencia 2.5).

D_r referencia del diámetro interno del tubo a T_r .

D_m diámetro interno del tubo medido a T_m .

Calculando el coeficiente de descarga de la placa de orificios.

$$C_d(FT) = C_i(FT) + 0.000511 \left(\frac{10^6 \beta}{\text{Re}_D} \right)^{0.7} + (0.0210 + 0.0049A) \beta^4 C \quad \text{Ec. 2.27.}$$

$$C_i(FT) = C_i(CT) + \text{TapTerm} \quad \text{Ec. 2.28.}$$

$$C_i(CT) = 0.5961 + 0.0291\beta^2 - 0.2290\beta^8 + 0.003(1 - \beta)M_1 \quad \text{Ec. 2.29.}$$

$$\text{TapTerm} = \text{Upstrm} + \text{Dnstrm} \quad \text{Ec. 2.30.}$$

$$\text{Upstrm} = (0.0433 + 0.0712e^{-8.5L_1} - 0.1145e^{-6.0L_1})(1 - 0.23A)B \quad \text{Ec. 2.31.}$$

$$\text{Dnstrm} = -0.0116(M_2 - 0.52M_2^{1.3})\beta^{1.1}(1 - 0.14A) \quad \text{Ec. 2.32.}$$

$$B = \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \quad \text{Ec. 2.33.}$$

$$M_1 = 2.8 - \frac{D}{N_4} \quad \text{Ec. 2.34.}$$

$$M_2 = \frac{2L_2}{1 - \beta} \quad \text{Ec. 2.35.}$$

$$A = \left(\frac{19000\beta}{\text{Re}_D} \right)^{0.8} \quad \text{Ec. 2.36.}$$

$$C = \left(\frac{10^6}{\text{Re}_D} \right)^{0.35} \quad \text{Ec. 2.37.}$$

$$L_1 = L_2 = \frac{N_4}{D} \quad \text{Ec. 2.38.}$$

$N_4^{2.6}$, es el factor de conversión de unidades para el coeficiente de descarga.

^{2.6} N_4 es 1 cuando D está dado en pulgadas y 25.4 cuando D está dado en milímetros

Donde:

$C_d(FT)$ coeficiente de descarga a un número de Reynolds específico para un costado del orificio de medición.

$C_i(FT)$ coeficiente de descarga a un número de Reynolds infinito para un costado del orificio de medición.

$C_i(CT)$ coeficiente de descarga a un número de Reynolds infinito para una esquina del orificio de medición.

e constante neperiana 2.71828.

Para calcular el número de Reynolds se tiene:

$$Re_D = \frac{N_2 q_m}{\mu D} \quad \text{Ec. 2.39.}$$

Re_d número de Reynolds.

μ viscosidad absoluta del fluido.

$N_2^{2.7}$ factor de conversión.

Calculando el factor de expansión aguas abajo de la placa de orificios, se tiene:

$$Y_1 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{x_1}{k} \quad \text{Ec. 2.40.}$$

$$x_1 = \frac{\Delta P}{N_3 P_{f_2} + \Delta P} \quad \text{Ec. 2.41.}$$

Donde:

Y_1 factor de expansión basado en la presión estática medida aguas abajo de la placa de orificio.

$\frac{x_1}{k}$ relación acústica aguas abajo de la placa de orificio.

x_1 relación entre la presión diferencial y la presión absoluta aguas abajo.

N_3 factor de conversión de unidades.

P_{f_2} presión aguas abajo de la placa de orificio.

En la tubería se colocó una bifurcación, con una tubería de 1" de diámetro y otra de 2" de diámetro, para poder medir gastos pequeños y gastos grandes, por lo que fue necesario colocar dos placas de orificio diferentes.

Sustituyendo datos en la ec 2.20 ésta se puede expresar de la siguiente manera.

^{2.7} $N_1 = 1.11072$ para el Sistema Internacional y 6.30025 para el Sistema Ingles. Ver punto 1.11 de las normas.

$N_2 = 1.27324$ para el Sistema Internacional y 1.27324 para el Sistema Ingles. Ver punto 1.11 de las normas.

$N_3 = 1$ para el Sistema Internacional y 1 para el Sistema Ingles. Ver punto 1.11 de las normas.

$$Q_v = \frac{N_1 E_v Y d^2 C_d \sqrt{\rho_{t,p} \Delta P}}{\rho_b} \quad \text{Ec. 2.42.}$$

si $N_1 E_v Y d^2 C_d = W$ Ec. 2.43.

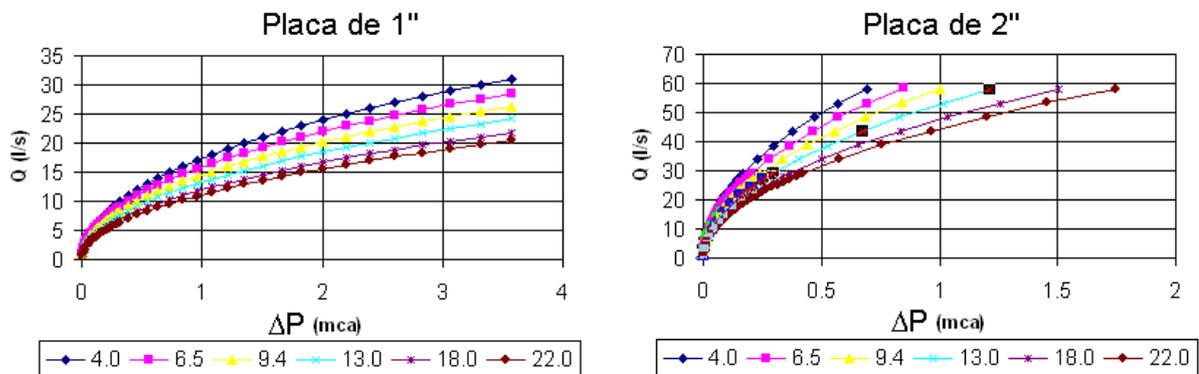
$$Q_v = \frac{W \sqrt{\rho_{t,p} \Delta P}}{\rho_b} \quad \text{Ec. 2.44.}$$

Donde

$\rho_{p,t}$ es la densidad del gas en donde se encuentra la placa de orificio.

ρ_b es la densidad del gas en donde se requiere conocer el gasto volumétrico.

Sustituyendo datos en la ecuación 2.44 se obtienen las siguientes graficas a diferentes presiones de inyección (Graf. 2.3).



Graf. 2.3. comportamiento de la placa de orificio.

2.6.3.2.1. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE GASTO DE GAS

Los medidores de gasto para gas fueron colocados en la unidad móvil denominada “el carrito” como se muestra en la figura 2.29.



Fig. 2.29. Medidores de gasto en la sección de gas.

Para medir la caída de presión en las placas de orificio, se colocó un sensor de presión diferencial (Fig. 2.30), que se conecta a las toma de la placa que está en operación.



Fig. 2.30. Colocación del sensor de presión diferencial en la sección de gas.

2.6.4. TEMPERATURA DEL GAS

Para calcular el gasto de gas que se inyecta a la mezcla multifásica, es necesario conocer la temperatura del flujo, para lo que se colocó un sensor de temperatura aguas arriba de la placa de orificio de gas.

Se utilizó un sensor tipo electrónico de la empresa National Semiconductors^{2.8} el LM35CZ, cuyas características para el encapsulado TO92 (Figura 2.31.), son:

- Alimentación de 0-35 volts.
- Voltaje de salida de 0-6 volts.
- Corriente de salida 10mA.
- Rango de temperatura -60 a 150°C.

El circuito utilizado es el siguiente (figura 2.26).



LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

TO-92
Plastic Package



BOTTOM VIEW
DS000516-2

Order Number LM35CZ,
LM35CAZ or LM35DZ
See NS Package Number Z03A

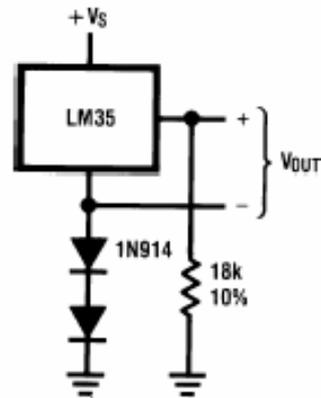


Fig. 2.31. Diagrama y conexión del LM35.

La entrada V_s es la alimentación que es excitada con una fuente regulada de 5v. Esta fuente se construyó con un regulador de voltaje de la misma empresa que el sensor de temperatura. El LM7805 es un regulador de voltaje (Fig. 2.32.), en un

^{2.8} National Semiconductor es una marca registrada.

2.6.5. DOSIFICADOR DE SÓLIDOS

La parte inferior del tanque de almacenamiento de sólidos tiene forma de embudo y está acoplada al dosificador que es un tornillo sin fin movido por un motor eléctrico, cuya velocidad es controlada por un inversor. Por gravedad los sólidos caen a las cavidades del tornillo que los empuja hacia la tubería que contiene la mezcla del gas y el líquido.

El tornillo sin fin se maquinó en acero al cromo-niquel-molibdeno con dureza controlada para construcción de maquinaria, código 4340. Debido a que estará en constante contacto con agua se sometió a un proceso de galvanizado para protegerlo de la corrosión. Figuras 2.35. y 2.36.



Fig. 2.35. Tornillo sin fin y carcasa.



Fig. 2.36. Colocación del tornillo sin fin dentro de la carcasa.

2.6.5.1. COLOCACIÓN DEL DOSIFICADOR

El dosificador se encuentra en la unidad móvil (“el carrito”), justo debajo del tanque de almacenamiento de sólidos, como se muestra en la figura 2.37.

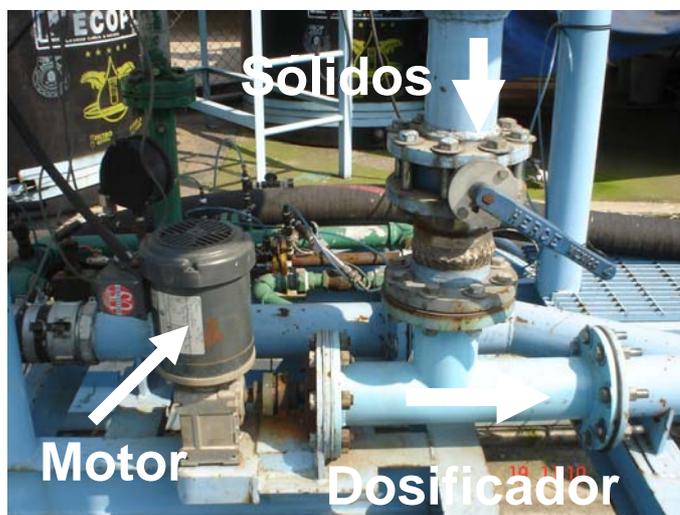


Fig. 2.37. Colocación del dosificador.

2.6.6. PESO

La cantidad de sólidos que se inyectan a la mezcla multifásica se puede estimar conociendo la variación del peso en el tanque de almacenamiento de sólidos. Para ello se utiliza una celda de carga, figura 2.38, de la marca Interface con capacidad de 2KLbs-fza, la cual entrega una salida de 4mV/kg. Tiene una compensación por temperatura dentro del intervalo de -10°C a 45°C , y la alimentación máxima es de 20 VDC.



Fig. 2.38. Celda de carga.

2.6.6.1. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE PESO

El sensor fue colocado en una de las tres patas del tanque de almacenamiento de sólidos, tal como se ilustra en la figura 2.39, por lo que solamente se mide la tercera parte del peso total.



Fig. 2.39. Colocación del sensor de peso.

2.6.7. POSICIÓN DE LA TUBERÍA EXPERIMENTAL

Para establecer la posición angular (inclinación) de la sección experimental se colocó un sensor de tipo resistivo en el eje de giro de la estructura que sujeta a la sección experimental, figura 2.40. Donde R_s es un potenciómetro de alambre de una sola vuelta.

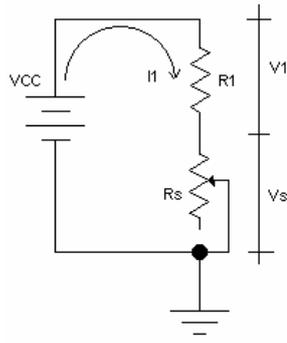


Fig. 2.40. Circuito para el sensor de posición.

La posición angular de la estructura se puede medir a través de los diferentes valores que toma V_s que se tienen dada la variación de R_s como se puede ver a continuación

Suponiendo que se tiene R_1 y $R_s=0\Omega$.

$$V_{cc} = V_1 + V_s$$

$$V_{cc} = I_1 R_1 + I_s R_s$$

$$I_1 = I_s$$

$$\text{Como } R_s = 0 \quad \therefore V_{cc} = V_1$$

$$V_{cc} = I_1 R_1$$

$$\therefore I_1 = \frac{V_{cc}}{R_1}$$

$$V_s = I_s R_s$$

$$\therefore V_s = 0$$

$$V_{cc} = V_{cc} + 0$$

$$\therefore V_{cc} = V_{cc}$$

Ec. 2.45.

Ahora suponemos que: $R_1=R_s$

$$V_{cc} = V_1 + V_s$$

$$V_{cc} = I_1 R_1 + I_s R_s$$

$$I_1 = I_s$$

$$\text{Como } R_1 = R_s$$

$$V_{cc} = I_1 (2R_1)$$

$$\therefore I_1 = \frac{V_{cc}}{2R_1}$$

$$V_1 = I_1 R_1$$

$$V_1 = \frac{V_{cc}}{2R_1} R_1$$

$$\therefore V_1 = \frac{V_{cc}}{2}$$

$$V_s = I_s R_s$$

$$V_s = \frac{V_{cc}}{2R_1} R_s$$

$$\therefore V_s = \frac{V_{cc}}{2}$$

$$V_{cc} = V_1 + V_s$$

$$V_{cc} = \frac{V_{cc}}{2} + \frac{V_{cc}}{2}$$

$$V_{cc} = V_{cc}$$

Ec. 2.46.

Ahora tomando la siguiente consideración: $R_s = \frac{1}{2} R_1$

$$V_{cc} = V_1 + V_s$$

$$V_{cc} = I_1 R_1 + I_s R_s$$

$$I_1 = I_s$$

$$\text{Como } R_s = \frac{1}{2} R_1$$

$$V_{cc} = I_1 R_1 + I_s \frac{1}{2} R_1$$

$$V_{cc} = I_1 \left(R_1 + \frac{1}{2} R_1 \right)$$

$$V_{cc} = I_1 \left(\frac{3}{2} R_1 \right)$$

$$I_1 = \frac{V_{cc}}{\left(\frac{3}{2} R_1 \right)}$$

$$\therefore I_1 = \frac{2V_{cc}}{3R_1}$$

$$V_1 = I_1 R_1$$

$$V_1 = \frac{2V_{cc}}{3R_1} R_1$$

$$\therefore V_1 = \frac{2}{3} V_{cc}$$

$$V_s = I_s R_s$$

$$V_s = \frac{2V_{cc}}{3R_1} \frac{1}{2} R_1$$

$$\therefore V_s = \frac{1}{3} V_{cc}$$

$$V_{cc} = V_1 + V_s$$

$$V_{cc} = \frac{2}{3} V_{cc} + \frac{1}{3} V_{cc}$$

$$V_{cc} = V_{cc}$$

Ec. 2.47.

Se puede observar como a los diferentes valores de R_s se tienen diferentes valores de V_s (Ec. 2.45, 2.46 y 2.47). Esta variación en V_s es la señal con la que se mide la variación de la posición angular de la estructura.

2.6.7.1. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE POSICIÓN

Como ya se mencionó el sensor se colocó en el eje de giro de la estructura que sujeta a la sección experimental, figura 2.41. Así cuando la estructura empiece a moverse, el sensor gira y por lo tanto varía su resistencia. El sensor de posición es conectado a una fuente de alimentación de corriente directa, regulada, con esto el cambio de resistencia se traduce en un cambio de voltaje. El intervalo de variación del ángulo de inclinación será de 0° a 90° .



Fig. 2.41. Colocación del sensor de posición.

2.6.8. VELOCIDAD

Para controlar la velocidad de giro de los motores de la bomba, del dosificador de sólidos y de los malacates para el posicionamiento de la tubería experimental, se utilizan inversores, de los cuales se pueden obtener señales eléctricas proporcionales a las velocidades de giro de los motores.

De los inversores usados se puede obtener una señal eléctrica proporcional a la velocidad del motor. Esta señal analógica se puede controlar desde el panel del control del inversor o desde otro medio fuera del instrumento.

Los inversores usados se muestran a continuación (Fig. 2.42).



Fig. 2.42. Panel de potencia.

2.6.8.1. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE VELOCIDAD DE GIRO DE LA BOMBA

El inversor que controla la velocidad de giro del motor de la bomba es de la marca Siemens modelo MicroMaster 440^{2.9} (Fig. 2.43), se encuentra localizado en frente del panel principal, “panel de potencia”.

Las características de este inversor son:

Voltaje: 200-240 VCA, trifásico.

Potencia de 0.12 a 45 kW (0.16 a 60 HP).



Fig. 2.43. Motor e inversor de la bomba.

2.6.8.2. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE VELOCIDAD DE GIRO DEL DOSIFICADOR DE SÓLIDOS

Para controlar la velocidad de giro del motor del dosificador, se utilizó un inversor de la marca TBWood's modelo SM1C2S02-0B^{2.10} (Fig. 2.39) y se encuentra colocado en el “panel de potencia”. Posee las siguientes características:

Voltaje: 200-240 VCA, bifásico.

Potencia de 0.12 a 5.5 kW (0.16 a 7.5 HP).



Fig. 2.44. Motor e Inversor del dosificador de sólidos

^{2.9} Para mas detalles del inversor Micromaster 440 consultar el “Manual del usuario Micromaster 440 de Siemens”.

^{2.10} Para mas detalles del inversor SM1C2S02 consultar el “User’s Manual for the SM1 AC Inverter of TBWood’s Incorporated”.

2.6.8.3. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE VELOCIDAD DE GIRO DEL MALACATE PRINCIPAL

El inversor que controla la velocidad de giro del motor del malacate principal es de la marca Siemens modelo MicroMaster 420^{2.11} (Fig. 2.40), se encuentra localizado en el “panel de potencia”.

Las características de este inversor son:

Voltaje: 200-240 VCA, trifásico.

Potencia de 0.12 a 5.5 kW (0.16 a 7.5 HP).



Fig. 2.45. Inversor del motor del malacate principal.

2.6.8.4. COLOCACIÓN DEL SENSOR DE VELOCIDAD DE GIRO PARA EL MALACATE SECUNDARIO

Para controlar la velocidad de giro del motor del malacate secundario se utilizó un inversor de la marca Siemens modelo MicroMaster 420^{2.11}. Este inversor se encuentra localizado en el “panel de potencia”.

Las características de este inversor son:

Voltaje: 200-240 VCA, trifásico.

Potencia de 0.12 a 3 kW (0.16 a 4 HP).

A continuación se muestra el inversor (Fig. 2.41).



Fig. 2.46. Inversor del motor del malacate secundario.

^{2.11} Para mas detalles del inversor Micromaster 420 consultar el “Manual del usuario Micromaster 420 de Siemens”.

CAPÍTULO 3

ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES Y ADQUISICIÓN DE DATOS

En el capítulo anterior se describieron los diversos sensores utilizados para medir las variables que se requiere conocer en la instalación experimental de flujos multifásicos. Cada uno de ellos entrega señales eléctricas diferentes, algunos entregan señales en corriente y otros en voltaje. Así mismo. Muchos de ellos requieren de voltajes de polarización con características distintas.

Por ello fue necesario seleccionar y en algunos casos diseñar y construir acondicionadores de señal que garanticen la correcta operación de los sensores y permitan adecuar las señales de salida a un intervalo de medición característico de una tarjeta de adquisición de datos.

3.1. ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE PRESIÓN

Los sensores utilizados para medir esta variable, son de la marca Omega modelo PX-440^{3.1}. Los cuales entregan una señal en corriente de 4-20 mA. La forma física del sensor se presenta en la figura 3.1.



Fig. 3.1. Sensor de presión Omega modelo PX-440.

Los sensores usados para medir la presión en los distintos puntos de interés de la instalación, entregan una señal en corriente. Para convertirla en una señal en voltaje es necesario colocar una resistencia, para provocar en ella una caída de voltaje proporcional a la corriente.

Además requieren de un voltaje de polarización de entre 12 a 36 Volts (Fig. 3.3.) que puede ser no regulado. En el diagrama de la figura 3.2. se presenta el circuito eléctrico del acondicionador de señal para este tipo de sensor. La resistencia que se escogió fue de un valor de 220Ω ya que con una señal de 20mA se tendrá un voltaje de 4.4 Volts que quedan dentro del intervalo de operación de la tarjeta de adquisición de datos.



Fig. 3.2. Circuito eléctrico para la conversión I-V.

^{3.1} Para mas detalles de este sensor revisar la hoja especificaciones. Propiedad del IMP.

$$\text{Si } I = 20\text{mA} \quad \text{Ec. 3.1.}$$

$$V = IR = (20 \times 10^{-3})(220) \quad \text{Ec. 3.2.}$$

$$V = 4.4\text{V} \quad \text{Ec. 3.3.}$$

$$\text{Si } I = 4\text{mA} \quad \text{Ec. 3.4.}$$

$$V = IR = (4 \times 10^{-3})(220) \quad \text{Ec. 3.5.}$$

$$V = 0.88\text{V} \quad \text{Ec. 3.6.}$$

De las ecuaciones 3.1, 3.3, 3.4 y 3.6, se observa que el intervalo de medición es de 0.88 a 4.4V

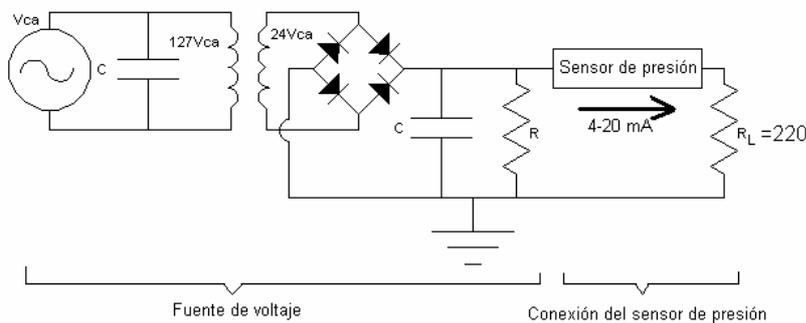


Fig. 3.3. Diagrama esquemático de las fuentes de voltaje.

Es importante destacar que para que el sensor opere correctamente bajo cualquier condición, la diferencia de voltaje en las terminales del sensor debe ser mayor o igual a 10 Volts.

También se realizó el diseño del circuito impreso (Fig. 3.4.), con la característica que debería contener 8 fuentes totalmente independientes y que debían poderse instalar en el gabinete del resto de los acondicionadores de señal usados, los cuales son equipos comerciales de la marca National Instruments.

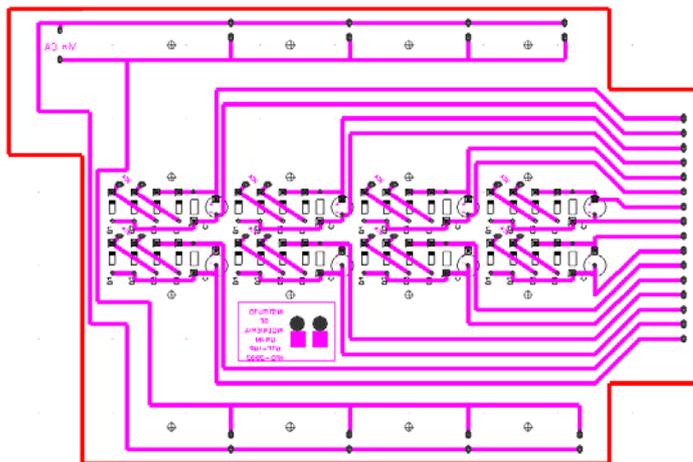


Fig. 3.4. Circuito impreso para las fuentes de voltaje.

3.2. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Los sensores de presión diferencial utilizados son de la marca Validyne^{3,2}, modelo DP15-TL. Este tipo de sensores pueden usarse para diferentes intervalos de medición, instalando la membrana adecuada al intervalo requerido.

En la figura 3.5. se muestran el sensor y las membranas existentes para este tipo de sensor, las marcadas con (*) son con las que se cuenta.



Fig. 3.5. Sensor de presión diferencial.

El acondicionador utilizado para adecuar la señal proveniente de las celdas diferenciales, es un ATA 2001 LVDT Signal Conditioner Schevitz® (Fig. 3.6.), que provee una señal de excitación de 3.5 VCA a una frecuencia de 2.5, 5 y 10 KHz. a una corriente de 45mA máximo. La señal analógica de salida es de ±10 VCD/ 10mA en modo bipolar o 0 a 10 VCD/10 mA en modo unipolar. Este equipo se conecta a un voltaje de 127VCA/50 a 400Hz o 220VCA/50 a 400Hz.

Contiene un panel frontal desde donde se pueden ajustar ciertos parámetros como son: el zero, el span y la fase, en el panel trasero se seleccionan otros valores como son: la

^{3,2} Para más detalle de este sensor consultar las hojas de especificaciones.

ganancia, la frecuencia de oscilación, el voltaje de alimentación del sensor y la propia señal de entrada proveniente del sensor.^{3.3}

Controlando los parámetros del span y el zero se logra ajustar la señal de salida a un valor dentro del intervalo de medición que se requiere.



Fig. 3.6. Acondicionadores de señal ATA 2001 LVDT de SCHEVITZ.

3.3. ACONDICIONAMIENTO PARA LAS SEÑALES DE TEMPERATURA

En el capítulo anterior se describió el procedimiento para medir la temperatura. De la figura 2.33 se observa que la señal de salida es en voltaje por lo que está lista para conectarla en con la tarjeta de adquisición de datos. Este sensor también fue alimentado con las fuentes anteriormente diseñadas.

3.4. ACONDICIONAMIENTO PARA LA SEÑAL DE PESO

Como se mencionó anteriormente este sensor entrega una señal en voltaje de 4mv/Kg. Se alimenta con las fuentes diseñadas, pero en este caso se le agregó un regulador de voltaje de 5 Volts. Con esto la señal esta lista para ser conectada en la tarjeta de adquisición de datos.

3.5. ACONDICIONAMIENTO PARA LA SEÑAL DE POSICIÓN ANGULAR

El sensor de posición angular de la estructura en la que está instalada la tubería experimental también se alimenta con las fuentes diseñadas, solo que al igual que el sensor de temperatura y peso se le coloca un regulador de voltaje pero a 8Volts. R_1 es una resistencia de $2k\Omega$ y R_s es un potenciómetro de alambre de una sola vuelta de $2k\Omega$, Fig. 2.40, para tener un intervalo de salida de 0 a 4v. Se debe considerar también que el intervalo de medición será solo de 90° .

^{3.3} Para mas detalles consultar el manual “ATA 2001 LVDT Signal Conditioner” de Schaevitz.

De la ecuación 2.45 se tiene que $V_s = 0$ volts y de la ecuación 2.46 $V_s = 4$ volts.

La señal proveniente del sensor de posición ya está en condiciones de conectarse a la tarjeta de adquisición de datos.

3.6. ACONDICIONAMIENTO DE LAS SEÑALES DE VELOCIDAD

Los inversores utilizados y descritos anteriormente poseen muchas bondades, una de ellas es que se pueden programar para controlarlos con señales digitales o a través del panel de control; desde este panel se pueden ajustar sus rampas de aceleración y desaceleración y varios parámetros que se deben revisar antes de su puesta en servicio, como son: las unidades en las que se van a manejar la potencia y la potencia nominal del motor, la tensión nominal, la corriente nominal, la frecuencia nominal y la velocidad nominal. Parámetros que se obtienen de la placa de datos del motor.

Todos estos datos se meterán en la etapa de programación de los inversores. En el parámetro P0700 de programación, para los inversores Siemens, se seleccionará la opción 2 que permite controlar el inversor con señales digitales, en el parámetro P1000 se deberá seleccionar la opción 2 que activa la entrada analógica para poder controlar la velocidad.^{3.4}

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, el inversor utilizado para el dosificador, es de la marca TB Wood's Incorporated. En este inversor también es necesario programar ciertos parámetros como son: potencia nominal del motor, la tensión nominal, la corriente nominal, la frecuencia nominal y la velocidad. Con el jumper J1 se debe activar la señal analógica de entrada para control de la velocidad.^{3.5}

Cada uno de los inversores internamente mide la velocidad del motor y tiene una señal analógica (en voltaje) de salida proporcional a ella que puede conectarse a la tarjeta de adquisición de datos.

3.7. ACONDICIONADORES DE SEÑAL NATIONAL INSTRUMENTS

En algunos casos es necesario mejorar la calidad de las señales provenientes de los sensores, ya sea filtrándolas o simplemente amplificándolas. Para ello se seleccionaron acondicionadores National Instruments® : SCXI 1121, SCXI 1141, 1142 y 1143, y para montar estos acondicionadores se seleccionó un chasis SCXI.

^{3.4} Para mas detalles de cómo programar el inversor , consultar el manual “Micromaster 420 y 440 Instrucciones de uso 6SE6400-5AA00-0EP0” de Siemens.

^{3.5} Para mas detalles de cómo programar el inversor , consultar el manual “User's Manual for the SM1 AC Inverter” de TB Wood's Incorporated.

® National Instruments y todos los accesorios National Instruments son una marca registrada.

3.7.1. ACONDICIONADOR NATIONAL INSTRUMENTS SCXI 1141, 1142 Y 1143

Este tipo de acondicionador contiene 8 canales de filtros pasobajas, con intervalos de entrada y salida de $\pm 5V$. Las ganancias se pueden ajustar entre 1, 2, 5, 10, 20, 50 y 100. El tipo de filtro depende del tipo de módulo que se tenga, por ejemplo para el modelo 1141 el filtro es de octavo orden elíptico, para el modelo 1142 el filtro es de octavo orden Bessel y para el modelo 1143 el filtro es de octavo orden Butterworth^{3,6}.

El diagrama de bloque se muestra en la figura 3.7.

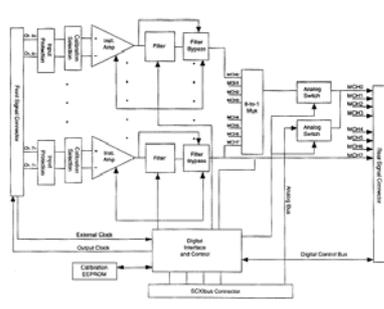


Fig. 3.7. Diagrama de bloques para el SCXI 1141,1142 y 1143 de National Instruments.

La asignación de pines del panel frontal y posterior para el SCXI 1141,1142, 1143 de National Instruments es el siguiente (Fig. 3.8):

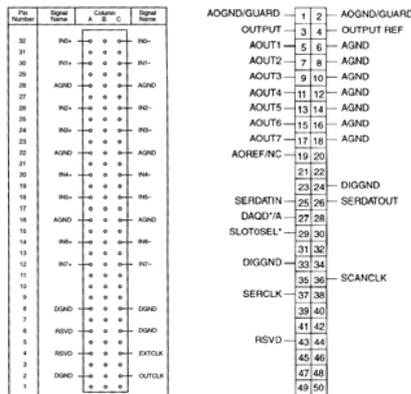


Fig. 3.8. Panel frontal y posterior del SCXI 1141,1142 y 1143 de National Instruments .

3.7.2. ACONDICIONADOR NATIONAL INSTRUMENTS SCXI 1121

Este módulo consta de cuatro canales aislados para acondicionamiento de señales, cuyas ganancias pueden ser seleccionadas de entre 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500,

^{3,6} Para más información del SCXI 1141,1142, 1143 de National Instruments consultar el manual “User Manual SCXI 1141,1142, 1143”.

1000 y 2000, rango de la señal de salida $\pm 5V$. Compensación por temperatura, posibilidad para conectar RTD y Strain Gauges^{3.7}.

El diagrama de bloques es el siguiente (Fig. 3.9):

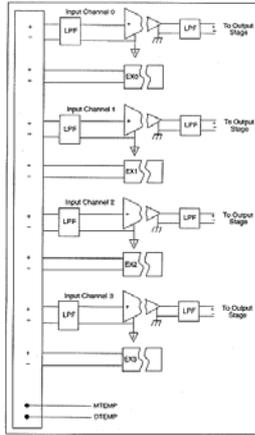


Fig. 3.9. Diagrama de bloques para el SCXI 1121 de National Instruments.

La asignación de pines del panel frontal y posterior para el SCXI 1121 de National Instruments es la siguiente (Fig. 3.10.):

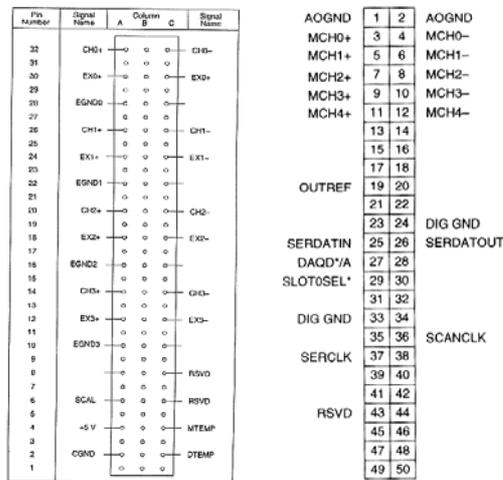


Fig. 3.10. Panel frontal y posterior del SCXI 1121 de National Instruments.

3.7.3. CHASIS NATIONAL INSTRUMENTS

Los módulos antes descritos se insertan en el chasis de National Instruments y en el además se colocaron las fuentes diseñadas. Figura 3.11.

^{3.7} Para más información del SCXI 1121 de National Instruments consultar el manual "User Manual SCXI 1121".



Fig. 3.11. Chasis SCXI de National Instruments.

Este tipo de de módulos, SCXI, se comunican por medio de un protocolo de comunicación y mediante un cable que se conecta en la parte posterior de cada uno de los módulos se comunican a la tarjeta de adquisición de datos. Debido al tipo de tarjeta de adquisición de datos que se utilizó, ATMIO64, no cuenta con entrada SCXI, solo se ocupan las señales de salida que se toman del panel posterior de los módulos pero no se comunican por medio del protocolo. Las señales entran a una caja receptora y de ahí por medio de un cable a la tarjeta de adquisición de datos “DAQ”.

3.7.4. CAJA RECEPTORA “SCB 100 PIN CONNECTOR BLOCK”

Para interconectar todos los cables de señales con la tarjeta de adquisición es necesario utilizar una caja de conexiones. La SCB 100 PIN CONNECTOR BLOCK de National Instruments (Fig. 3.12.).



Fig. 3.12. Caja de interconexión SCB 100 PIN CONNECTOR BLOCK de National Instruments.

Esta caja receptora por un lado tiene la entrada de todos los cables y que se conectan a terminales de tornillo que tienen asignados los canales de la DAQ; en el circuito impreso están debidamente marcados los nombres asignados a cada terminal^{3.8}.

La comunicación entre la caja de conexiones y la DAQ es por medio de un cable de comunicación modelo SH100-100F de National Instruments (figura 3.13)^{3.9}.



Fig. 3.13. Cable de interconexión SH100-100-F de National Instruments.

3.8. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NATIONAL INSTRUMENTS

La tarjeta de adquisición de datos utilizada es una AT-MIO 64 E Series, que contiene 64 canales de entrada y 2 de salida, analógicos y 8 canales de entrada/salida digitales. Esta tarjeta esta diseñada para instalarse en un slot PCI.

Por medio de software se selecciona la dirección que ocupa dicha tarjeta y el intervalo de medición de los canales analógicos, que pueden ser configurados como single-ended o diferenciales. Posee un intervalo de muestreo de 500 kilomuestras por segundo con una resolución de 12 bits. Su estabilización llega después de un calentamiento de 15 minutos.

Los canales analógicos de salida también tienen una resolución de 12 bits, el voltaje de salida es de corriente directa en un rango de $\pm 10V$ o $10V$, seleccionado por software. Los canales digitales son compatibles con la tecnología TTL/CMOS, en donde el nivel bajo es por debajo de $0.8V$ y el nivel alto es por arriba de $2V$.

En la figura 3.14. se muestra el diagrama a bloques del la tarjeta de adquisición de datos DAQ.

^{3.8} Para mas detalles de la SCB 100 PIN CONNECTOR BLOCK referirse al "Installation Guide SCB 100 PIN CONNECTOR BLOCK".

^{3.9} Para mas detalles del SH100-100F referirse al "Installation Guide for Digital I/O Accesories and Cables".

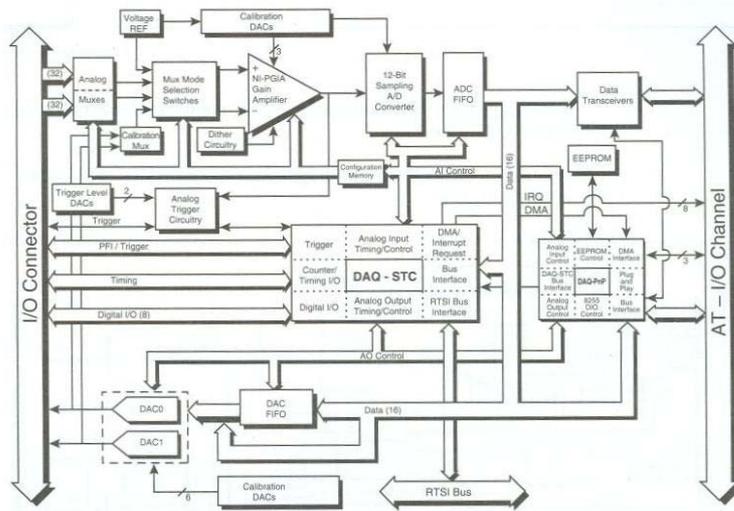


Fig. 3.14. Diagrama de bloques de la tarjeta AT-MIO-64-E de National Instruments.

En la figura 3.15. se presentan la asignación de pines y una fotografía de la tarjeta de adquisición de datos AT-MIO-64-E de National Instruments.

AIGND	1	51	ACH16
AIGND	2	52	ACH24
ACH0	3	53	ACH17
ACH8	4	54	ACH25
ACH1	5	55	ACH18
ACH9	6	56	ACH26
ACH2	7	57	ACH19
ACH10	8	58	ACH27
ACH3	9	59	ACH20
ACH11	10	60	ACH28
ACH4	11	61	ACH21
ACH12	12	62	ACH29
ACH5	13	63	ACH22
ACH13	14	64	ACH30
ACH6	15	65	ACH23
ACH14	16	66	ACH31
ACH7	17	67	ACH32
ACH15	18	68	ACH40
AISENSE	19	69	ACH33
DAC0OUT	20	70	ACH41
DAC1OUT	21	71	ACH34
EXTREF	22	72	ACH42
AOGND	23	73	ACH35
DGND	24	74	ACH43
DIO0	25	75	AISENSE2
DIO4	26	76	AIGND
DIO1	27	77	ACH36
DIO5	28	78	ACH44
DIO2	29	79	ACH37
DIO6	30	80	ACH45
DIO3	31	81	ACH38
DIO7	32	82	ACH46
DGND	33	83	ACH39
+5 V	34	84	ACH47
+5 V	35	85	ACH48
SCANCLK	36	86	ACH56
EXTSTROBE*	37	87	ACH49
PFI0/TRIG1	38	88	ACH57
PFI1/TRIG2	39	89	ACH50
PFI2/CONVERT*	40	90	ACH58
PFI3/GPCTR1_SOURCE	41	91	ACH51
PFI4/GPCTR1_GATE	42	92	ACH59
GPCTR1_OUT	43	93	ACH52
PFI5/UPDATE*	44	94	ACH60
PFI6/WFTTRIG	45	95	ACH53
PFI7/STARTSCAN	46	96	ACH61
PFI8/GPCTR0_SOURCE	47	97	ACH54
PFI9/GPCTR0_GATE	48	98	ACH62
GPCTR0_OUT	49	99	ACH55
FREQ_OUT	50	100	ACH63

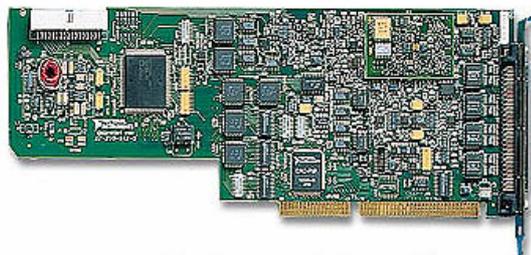


Fig. 3.15. Tarjeta AT-MIO-64-E de National Instruments.

Para controlar los cuatro inversores, desde la computadora personal, se requieren cuatro señales analógicas. Como se explicó anteriormente la DAQ solo cuenta con dos señales analógicas de salida y 64 de entrada, además de 8 señales digitales de entrada/salida, por lo que es necesario multiplexar las señales analógicas de salida.

3.9. MULTIPLEXEO

Como únicamente se cuenta con dos señales analógicas de salida en la DAQ, los cuatro inversores se dividieron en dos grupos, el primero consta del inversor de la bomba y del dosificador de sólidos y el segundo consta de los dos inversores de los malacates.

Para multiplexar las señales analógicas de salida de la DAQ se diseñó y construyó una tarjeta electrónica basada en el circuito CD4053, que es un multiplexor/demultiplexor, figura 3.16, el cual funciona con un voltaje de alimentación de 5 a 15Vcd. Las señales analógicas se pueden manejar en un intervalo de 3 hasta 15 Vpp, mientras que las digitales van de 3 a 15 V.

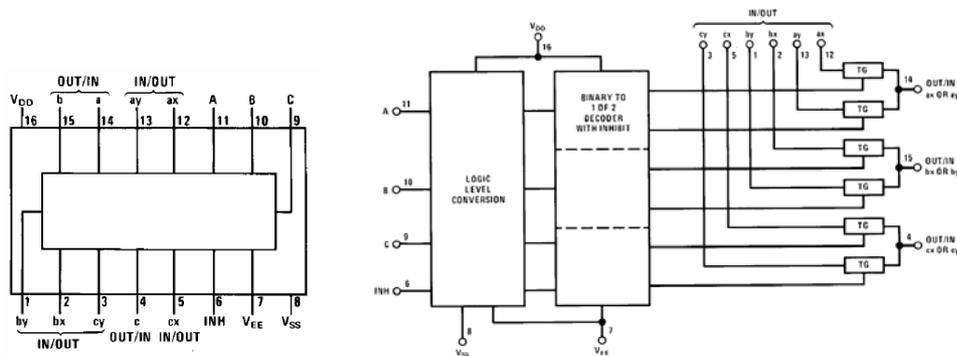


Fig. 3.16. Patigrama y diagrama a bloques del CD4053BC.

Las terminales 9, 10 y 11 realizan la activación del multiplexor/demultiplexor utilizando uno de los canales digitales de entrada/salida de la DAQ. En este caso las terminales 4, 14 y 15 son entradas analógicas, mientras que las terminales 1, 2, 3, 5, 12 y 13 son las salidas analógicas.

La tabla de verdad del circuito es la siguiente, tabla 3.1:

Estado de la Entrada				Canales Activados		
Inhibit	C	B	A	cx	bx	ax
0	0	0	0	cx	bx	ax
0	0	0	1	cx	bx	ay
0	0	1	0	cx	by	ax
0	0	1	1	cx	by	ay
0	1	0	0	cy	bx	ax
0	1	0	1	cy	bx	ay
0	1	1	0	cy	by	ax
0	1	1	1	cy	by	ay
1	*	*	*	nada	nada	nada

* Condición "no importa"

Tab. 3.1. Tabla de verdad del CD4053BC.

Se requiere que para cierto momento estén activadas bx y ax y para otro instante se activen by y ay. Revisando la tabla de verdad se puede observar que esto se logra haciendo las entradas A y B cero en un instante y 1 en otro. Por lo que el circuito quedó como se muestra en la figura 3.17. El optoacoplador solo sirve para proteger la tarjeta de adquisición de datos.

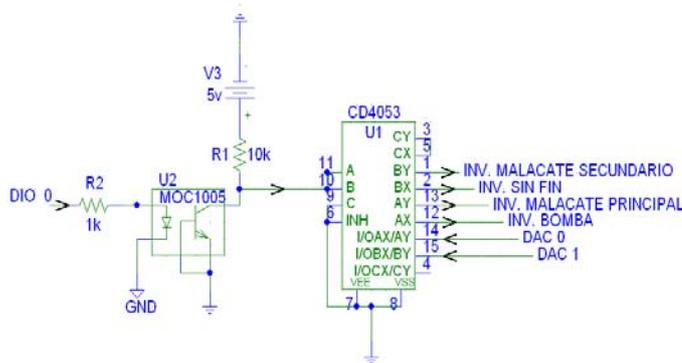


Fig. 3.17. Circuito para seleccionar entre la bomba, el sin fin y los malacates.

La selección del canal del multiplexor se realiza con una de las señales digitales de la DAQ, DIO 0. El resto de las señales digitales se utilizan para controlar el encendido apagado de los inversores y para seleccionar el sentido de giro de los motores de los malacates según se muestra en la siguiente tabla (Tab. 3.2).

Señal Digital	Acción que realiza
DIO 0	Activa y desactiva el CD4053
DIO 1	Enciende y apaga el inversor de la bomba
DIO 2	Enciende y apaga el inversor del malacate principal
DIO 3	Selección del sentido de giro del malacate principal
DIO 4	Enciende y apaga el inversor del malacate secundario
DIO 5	Selección del sentido de giro del malacate secundario
DIO 6	Enciende y apaga el inversor del dosificador de sólidos
DIO 7	N/C

Tab. 3.2. Asignación de las señales digitales.

La tabla de verdad para la interconexión de los inversores queda de la siguiente manera (Tab. 3.3).

Señal analógica	Estado de la señal digital	Instrumento que se activa
DAC0OUT	DIO 0 (0)	Control de velocidad de la Bomba
	DIO 1 (1/0)	Encendido/Apagado de la Bomba
DAC1OUT	DIO 0 (0)	Control de velocidad del Dosificador
	DIO 6 (1/0)	Encendido/Apagado del motor del Dosificador
DAC0OUT	DIO 0 (1)	Control de velocidad del Malacate Principal
	DIO 2 (1/0)	Encendido/Apagado del Malacate Secundario
	DIO 3 (1/0)	Sentido de giro horario/Sentido de giro antihorario
DAC1OUT	DIO 0 (1)	Control de velocidad del Malacate Secundario
	DIO 4 (1/0)	Encendido/Apagado del Malacate Secundario
	DIO 5 (1/0)	Sentido de giro horario/Sentido de giro antihorario

Tab. 3.3. Tabla de verdad para las señales analógicas y digitales.

3.9.1. CONEXIÓN DEL INVERSOR DE LA BOMBA

Cuando la señal DIO 0 está en un nivel lógico 0, la señal analógica DAC0OUT se localiza en la terminal 12, del CD4053, es decir en la terminal asociada a Ax. Esta terminal está conectada con el pin 3 del inversor de la bomba para poder controlar la velocidad de la bomba. La señal que proviene de DIO 1 tiene la función de apagar y encender el inversor, el nivel lógico de 1 enciende el inversor y el nivel 0 lo apaga. Esta señal activa un relevador que cierra el circuito y se interconectan los pines 9 y 5 del inversor. Con ello, el pin 5 se activa a un nivel lógico 1 con un valor de 24V y se enciende el inversor.

Para visualizar y registrar la velocidad de giro de la bomba, la señal "AO" que proviene del inversor y que es proporcional a dicha velocidad se conectó a la DAQ.

El circuito de interconexión se muestra en la siguiente figura (Fig. 3.18.).

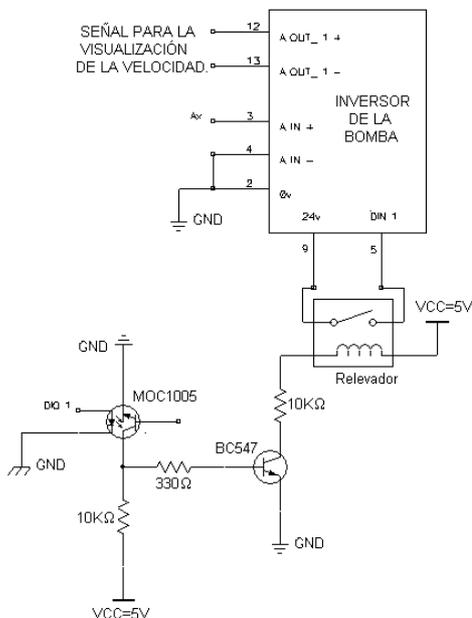


Fig. 3.18. Circuito para la interconexión del inversor de la bomba con la computadora.

3.9.2. CONEXIÓN DEL INVERSOR DEL DOSIFICADOR DE SÓLIDOS

Si la señal DIO 0 está en un nivel lógico 0, la señal analógica DAC1OUT se localiza en la terminal 2, del CD4053, es decir en la terminal asociada a Bx. Esta terminal está conectada al pin correspondiente a "AI" del inversor del dosificador de sólidos para poder controlar su velocidad de giro. La señal que proviene de DIO 6 tiene la función de apagar y encender el inversor, el nivel lógico 1 enciende el inversor y el nivel de 0 lo apaga. Esta señal activa un relevador que cierra el circuito entre los pines M0 y GND del inversor y así se enciende.

Para visualizar y registrar la velocidad de giro del dosificador de sólidos, la señal “AO” que proviene del inversor y que es proporcional a la velocidad de giro se conectó a la DAQ.

La señal que proviene de AO del inversor es una señal analógica proporcional a la velocidad. Esta señal entra a la tarjeta de adquisición y se monitorea la velocidad del motor del dosificador.

El circuito de interconexión se muestra en la siguiente figura (Fig. 3.19.).

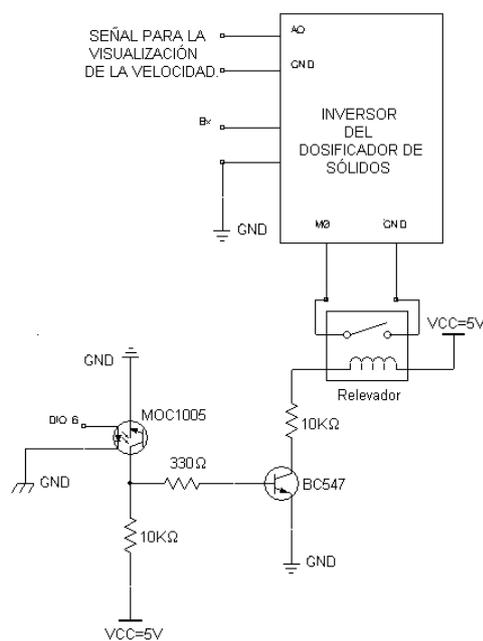


Fig. 3.19. Circuito para la interconexión del inversor del dosificador con la computadora.

3.9.3. CONEXIÓN DEL INVERSOR DEL MALACATE PRINCIPAL

Cuando la señal DIO 0 está en un nivel lógico 1, la señal analógica DAC0OUT se localiza en la terminal 13, del CD4053, es decir en la terminal asociada a Ay. Esta terminal se conecta al pin 3 del inversor del malacate principal, para controlar su velocidad de giro. La señal que proviene de DIO 2 tiene la función de apagar y encender el inversor, el nivel lógico 1 enciende el inversor y el nivel 0 lo apaga. La señal que proviene de DIO 3 tiene la finalidad de cambiar el sentido de giro, el nivel lógico 1 hace girar al motor en sentido horario, el nivel lógico 0 lo hace girar en sentido antihorario. Cada una de las señales DIO 2 y DIO 3 activan un relevador, que cierran los circuitos entre los pines 5 y GND y 6 y GND del inversor, con esto el inversor se enciende y cambia el sentido de giro del motor respectivamente.

El circuito de interconexión se muestra en la figura 3.21.

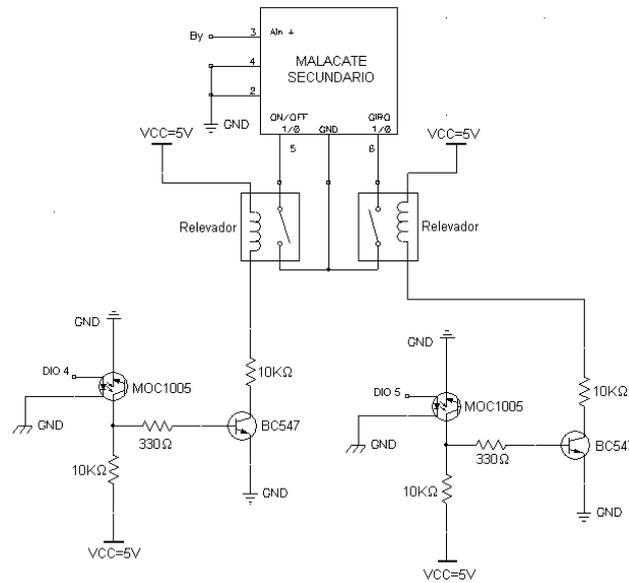


Fig. 3.21. Circuito para la interconexión del inversor del malacate secundario con la computadora.

3.10. DISEÑO DEL SOFTWARE PARA EL REGISTRO Y LA VISUALIZACIÓN DE LAS VARIABLES A MEDIR EN EL EEFMTR Y PARA CONTROL DE LA OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS

Para visualizar, procesar y registrar la información proveniente de todos los sensores colocados en la instalación, así como para controlar la operación de los inversores utilizados, se desarrolló un programa en LabView®.

Labview es la plataforma de programación en la se programa en “Lenguaje G”, que es un lenguaje gráfico. LabView tiene dos pantallas principales: el “front panel”, figura 3.22, que es donde se colocan los iconos de visualización y el “back panel”, figura 3.23, que es propiamente donde se hace la programación.

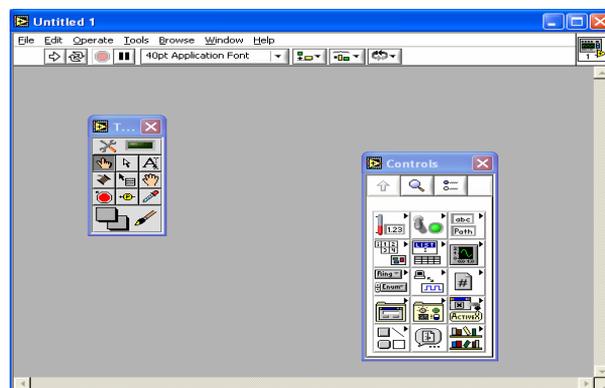


Fig. 3.22. Front Panel en Lab View.

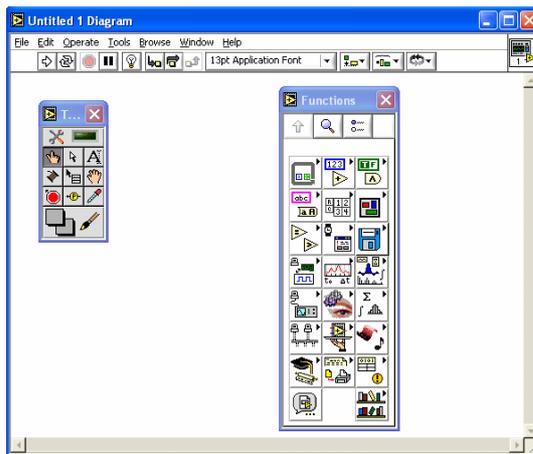


Fig. 3.23. Back Panel en Lab View.

Tanto el “front panel” como en el “back panel” tienen paletas con diferentes herramientas como son: “Tools palette”, “Functions palette” y “Controls palette”.

La paleta de herramientas “Tools palette” la podemos ocupar tanto en el “front panel” como en el “back panel”, debido a que encontramos herramientas para poner títulos, seleccionar y mover íconos, para alambrear y mucho más.

La paleta de funciones “Functions palette” la podemos utilizar solamente en el “back panel”, ya que en esta paleta encontramos funciones como son: condicionales, arreglos, operadores matemáticos, booleanos y muchos más.

La paleta de controles “Controls palette” se utiliza en el “front panel”, ya que contiene los íconos de visualización como: termómetros, manómetros, tanques, botones, switches y muchos más.

El “front panel” es la parte en donde se colocan todos los objetos de visualización, instrumentos virtuales, como son botones, gráficas, manómetros, etc. (Fig. 3.24). Aquí es donde se diseña la presentación del tablero virtual.

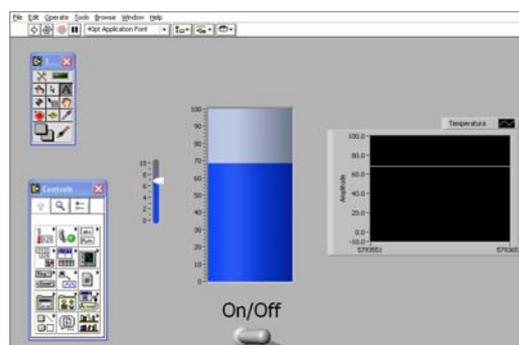


Fig. 3.24. Ayudas en el Front Panel.

En el “back panel” se realiza la configuración de los canales de entrada, procesamiento de la señal, almacenamiento, colocación de condicionales y mucho más (Fig. 3.25). Es decir, es donde se desarrolla el programa.

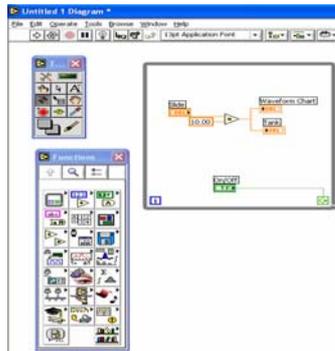


Fig. 3.25. Ayudas en el Back Panel.

A continuación se desglosará el programa desarrollado para las mediciones y control en el EEFMTR.

El programa cuenta con siete cuadros referentes a: parámetros para la adquisición de datos, selección de la acción que se va a realizar (experimento o colocación de la estructura), visualización de la etapa de sólidos, líquidos, gases, mezclado y colocación de la estructura. Figura 3.26.

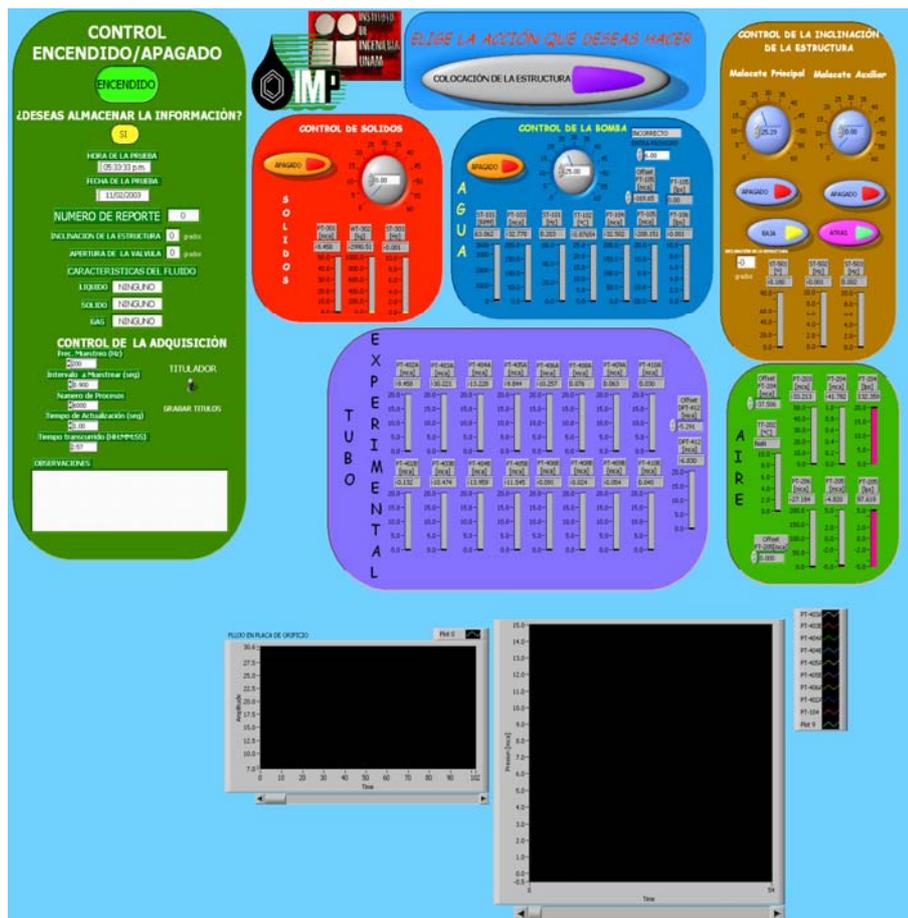


Fig. 3.26. Tablero virtual del EEFMTR.

Antes de empezar cada una de las pruebas es necesario fijar las condiciones para la adquisición de datos, que se realiza en el cuadro referente a “Control Encendido/Apagado”. Aquí se ajustan parámetros como la frecuencia de muestreo, el intervalo a muestrear, el número de procesos, el número de reporte, las características del fluido, además se pueden colocar comentarios para identificar la prueba. Con el switch de almacenamiento de información se selecciona si los datos se guardan en disco o no. Estos datos se guardan en formato tabular por columnas y cada una de ellas lleva un título correspondiente a la variable que se está registrando en ese canal. Con el switch de titulador se selecciona entre quitar o dejar los títulos.

En la figura 3.27 se presenta el cuadro tal como aparece en el programa.

Fig. 3.27. Tablero virtual para ajustar los parámetros de la adquisición de datos.

Habiendo ajustado los parámetros de la adquisición de datos se debe ejecutar y entonces es necesario seleccionar con el botón del cuadro “Elige la acción que deseas hacer” entre “Realizar experimento” o “Colocación de la estructura”.

Suponiendo que se seleccionó “Colocación de la estructura”, se activan los botones para controlar los malacates, tanto el malacate principal y el malacate secundario. El usuario puede ajustar las velocidades de ellos variando la aguja del indicador circular o escribiendo un valor en el recuadro dentro del indicador.

En este mismo recuadro se tienen botones para el encendido de los motores de los malacates y para el cambio de giro de los mismos. Además se cuenta con un cuadro de visualización de la inclinación de la estructura.

El malacate principal es el que tiene mayor uso. Con el botón se puede seleccionar entre subir o bajar la estructura. El malacate secundario se utiliza a partir de los 75° de inclinación de la estructura para llevarla hasta los 90° y cuando se requiere bajar llevarla de lo 90° a los 75°. Por ello el botón, para el control de este malacate, tiene la posibilidad de elegir entre adelante y atrás, entendiéndose por “adelante” la parte en donde la estructura queda en la posición vertical y “atrás” donde queda en posición horizontal.

En la figura 3.28 se presenta la imagen de los cuadros “Acción que deseas realizar” y “Control de la inclinación de la estructura”.

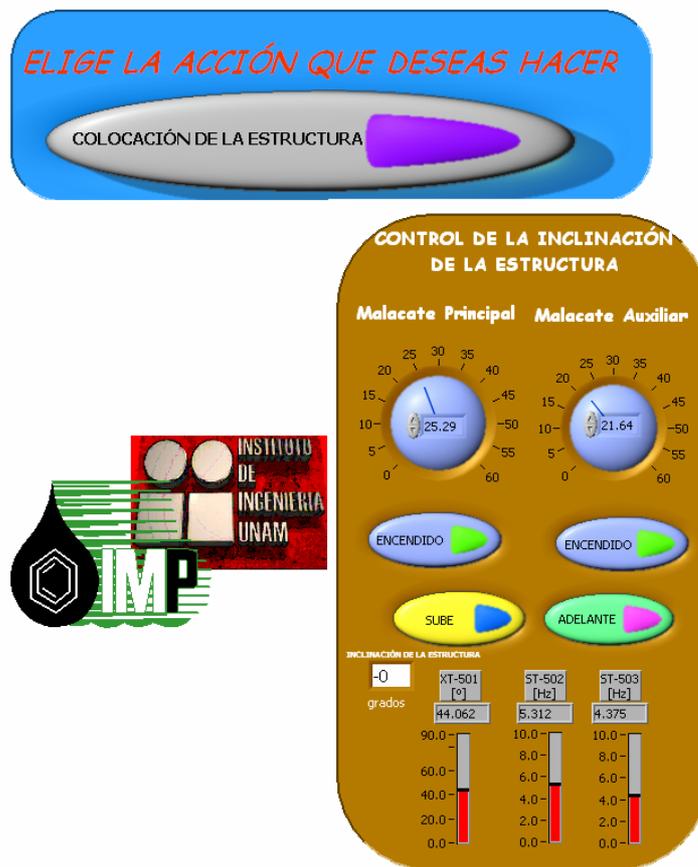


Fig. 3.28. Tablero virtual para ajustar los parámetros para la colocación de la estructura.

Suponiendo ahora que la acción que se quiere es “realizar experimento”, se activarán los recuadros restantes como son: control de sólidos, control de la bomba, aire y tubería experimental. A continuación se explicará cada uno por separado.

Dependiendo del experimento se activarán todos los recuadros o solo algunos, por ejemplo: si el experimento es una sola fase (líquido), solo se utilizarán los recuadros de “control de la bomba” y el de “tubo experimental”. Si el experimento es en dos fases (líquido/sólido, líquido/gas) se utilizarán los recuadros de “control de la bomba”, “control de sólidos” y el de “tubo experimental” para la primera y “control de la bomba”, “aire” y el de “tubo experimental” para la segunda. Si el experimento es en tres fases (líquido/sólido/gas) se utilizarán todos los recuadros.

El recuadro “control de sólidos” tiene un botón con el cual se enciende o apaga el motor que hace que el dosificador de sólidos gire. En este mismo cuadro se visualizan el peso en el tanque y la velocidad de giro del dosificador de sólidos.

El recuadro de “control de la bomba” cuenta con un botón para encender o apagar la bomba y en el se visualiza la presión de descarga, la velocidad de giro de la bomba y el gasto (Fig. 3.29.).



Fig. 3.29. Tablero virtual para ajustar los parámetros para el control de sólidos y líquidos.

En el recuadro “tubo experimental” se visualizan todas las presiones a lo largo de la tubería así como el de la presión diferencial colocado en la sección experimental (Fig. 3.30.).

El recuadro de “aire” presenta íconos en los cuales se observan: la presión absoluta y temperatura del gas, además de la presión diferencial en la placa de orificios y el gasto de gas (Fig. 3.30.).

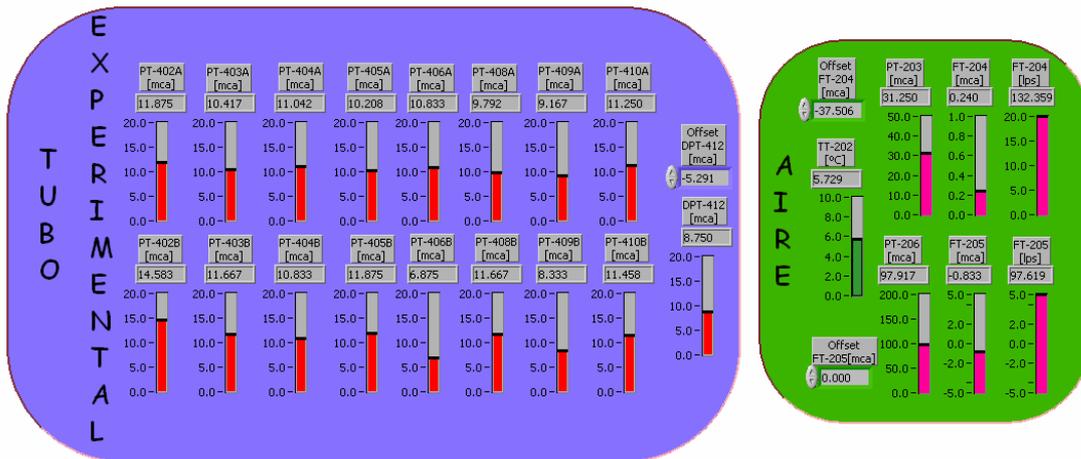


Fig. 3.30. Tablero virtual para ajustar los parámetros para el control de gases y de la tubería experimental.

Por último, se pueden seleccionar varias señales para visualizar en forma gráfica su comportamiento durante la prueba (Fig. 3.31.).

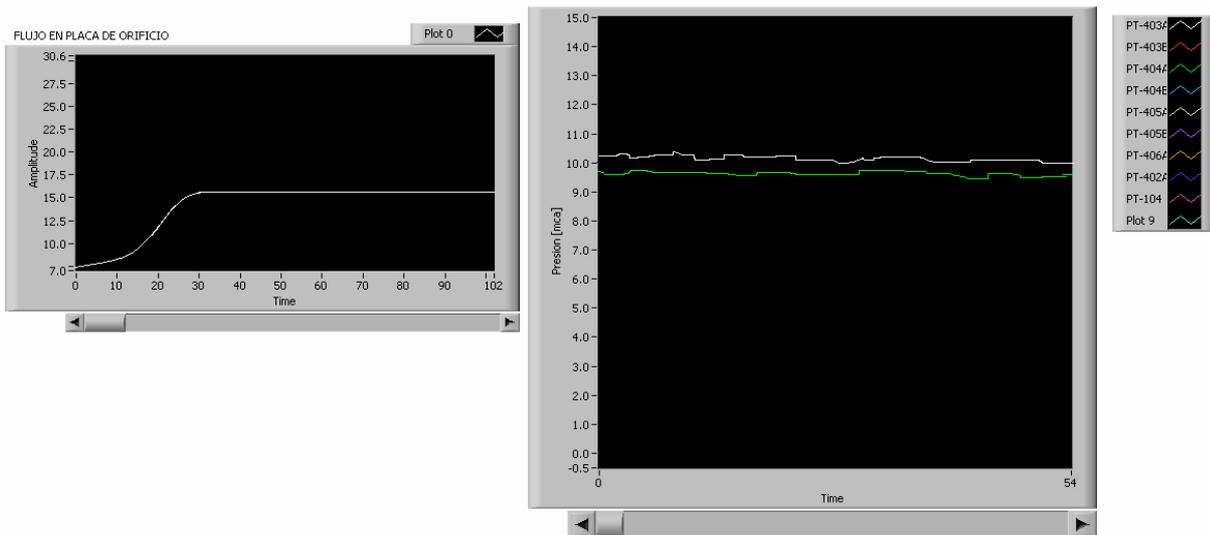


Fig. 3.31. Tablero virtual para graficar.

CAPÍTULO 4

PUESTA EN OPERACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL DE FLUJO MULTIFÁSICO Y TRANSPORTE DE RECORTES

Una vez definidos los puntos de medición en el equipo experimental, fue necesario seleccionar nombres para cada uno de ellos, lo cual se realizó con base en la nomenclatura establecida en las normas de la Sociedad de Instrumentistas de América (ISA), que garantizan que cada nombre tenga un código único e intransferible, con lo que será muy fácil recordar su ubicación y evitar posibles confusiones.

4.1. NOMENCLATURA

En las normas ISA se explica como se debe nombrar a cada uno de los puntos de medición y a sus periféricos.

Según la norma, cada instrumento debe de contener un nombre, el cual servirá para su rápida ubicación en el sistema. Por ejemplo: si se tiene un medidor de presión que se conecta a un registrador y a un indicador en pantalla, el lazo de control quedaría de la siguiente manera (Fig. 4.1.):

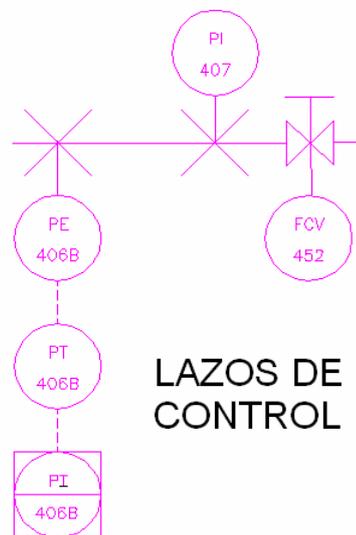


Fig. 4.1. Uso de la nomenclatura según la ISA.

Cada círculo tiene una forma determinada que indica si el instrumento se encuentra en campo, en un tablero principal o en algún otro lugar, además de identificar el lazo al cual pertenece (Fig. 4.2.):

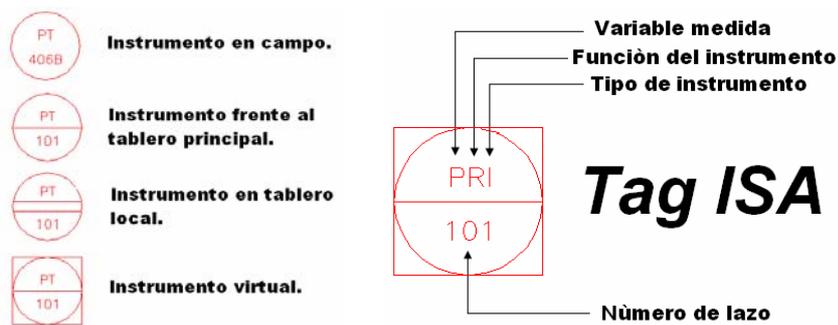


Fig. 4.2. Identificación de los instrumentos según la ISA.

La norma ISA también distingue los distintos tipos de alimentación a los instrumentos, los cuales se representan en forma simbólica en la siguiente figura (Fig. 4.3.).

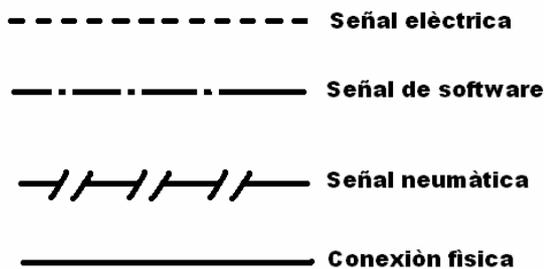


Fig. 4.3. Identificación de los tipos de señal según la ISA.

En la siguiente tabla (Tab. 4.1.), se presenta la simbología que la ISA propone para identificar los instrumentos de medición.

CÓDIGO DE LETRAS		
LETRA	VARIABLE	FUNCIÓN
A	ANÁLISIS	ALARMA
B	FLAMA	
C	CONDUCTIVIDAD	CONTROL
D	DENSIDAD	
E	VOLTAJE	ELEMENTO
F	FLUJO	
G	ESPESOR	MIRILLA
H	MANUAL	ALTO
I	CORRIENTE	INDICADOR
J	POTENCIA	
K	TIEMPO	
L	NIVEL	LUZ/BAJO
M	HUMEDAD	MEDIO
N		
O	OXIGENO	ORIFICIO
P	PRESIÓN	PUNTO
Q	TOTALIZAR	
R	RADIACIÓN	REGISTRO
S	VELOCIDAD	SWITCH
T	TEMPERATURA	TRANSMISOR
U	MULTIVARIABLE	MULTIFUNCIÓN
V	VISCOSIDAD	VALV LA
W	PESO	POZO
X		
Y		RELEVADOR
Z	POSICIÓN	POSICIONADOR

Tab. 4.1. Identificación de las letras según la ISA.

Para este caso en particular se decidió numerar los lazos de control de la siguiente manera (Fig. 4.2.).

LAZO DE CONTROL	IDENTIFICADOR
Líquido	1XX
Gas	2XX
Sólido	3XX
Mezcla	4XX
Posicionador	5XX

Tab. 4.2. Identificación de los lazos de control.

Así con base en estas normas se generó el Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) del EEFMTR, que se muestra en la figura 4.4.

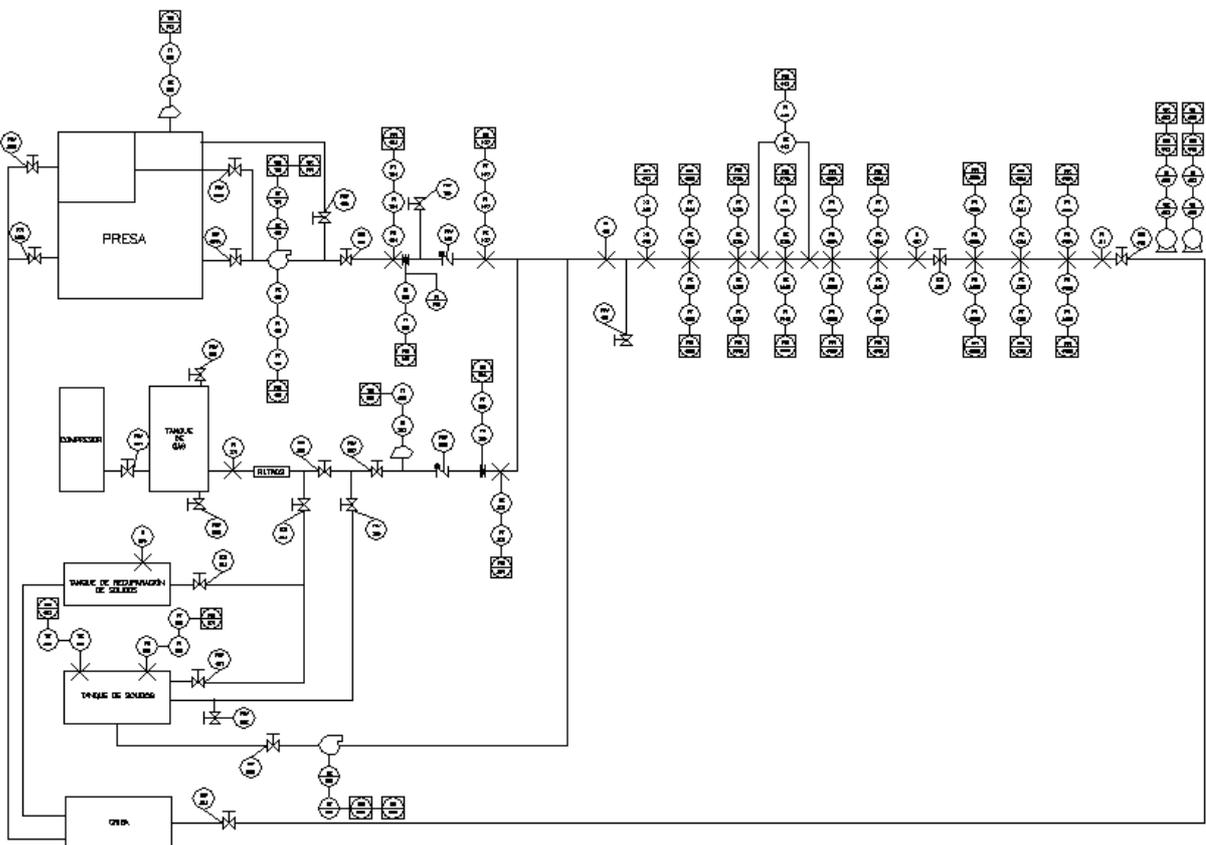


Fig. 4.4. Diagrama de Tubería e Instrumentación.

En las tablas siguientes se describen todos los elementos usados en cada sección de la instalación experimental a través de: el número de sensor, el nombre asignado según la norma de la ISA, el instrumento que se usa, su función y por último el canal que corresponde a la tarjeta de adquisición de datos (Tabs. 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7).

No.	VARIABLE	PUNTO DE MEDICION	INSTRUMENTO	DESCRIPCION	DAQ Ch
1	FCV	151A	VALVULA DE MARIPOSA	VALVULA EN LA SUCCION DE LA BOMBA	
2	FCV	151B	VALVULA DE MARIPOSA	VALVULA EN LA SUCCION DE LA BOMBA	
3	SE	101	BOMBA	BOMBA PRINCIPAL	
	ST	101	INVERSOR – BOMBA	VELOCIDAD DE GIRO DE LA BOMBA (0–10 V)	CANAL 35
4	TE	102	TERMOPAR	TEMPERATURA DEL AGUA EN LA PRESA	
	TT	102	TERMOPAR	TEMPERATURA DEL AGUA EN LA PRESA	CANAL 20
5	PI	103	MANOMETRO	PRESION A LA SALIDA DE LA BOMBA	
	PE	103	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION A LA SALIDA DE LA BOMBA	
	PT	103	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION A LA SALIDA DE LA BOMBA (4–20 mA)	CANAL
6	FCV	152	VALVULA DE MARIPOSA	VALVULA PARA RETORNO A LA PRESA	
7	FCV	153	VALVULA DE MARIPOSA	VALVULA PARA CONTROL DE FLUJO	
8	PI	104	MANOMETRO	PRESION ANTES DE LA PLACA DE ORIFICIO	
	PE	104	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION ANTES DE LA PLACA DE ORIFICIO	
	PT	104	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION ANTES DE LA PLACA DE ORIFICIO (4–20 mA)	CANAL
9	FE	105	PLACA DE ORIFICIO	GASTO DE AGUA	
	FT	105	TRANSDUCTOR DE PRESION DIFERENCIAL	GASTO DE AGUA (PLACA DE ORIFICIO) 0–5 V	CANAL 32
10	FCV	154	VALVULA DE MARIPOSA	VALVULA PARA DESFOGUE	
11	FCV	155	VALVULA CHECK	VALVULA PARA NO RETORNO DE FLUJO	
12	FT	106	TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDO	GASTO DE AGUA (MEDIDOR DE ULTRASONIDO)	CANAL
13	PI	107	MANOMETRO	PRESION ANTES DE LA MEZCLA CON AIRE	
	PE	107	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION ANTES DE LA MEZCLA CON AIRE	
	PT	107	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION ANTES DE LA MEZCLA CON AIRE (4–20 mA)	CANAL

Tab. 4.3. Sección de líquido.

No.	VARIABLE	PUNTO DE MEDICION	INSTRUMENTO	DESCRIPCION	DAQ Ch
14	FCV	251	VALVULA DE BOLA	VALVULA DE DESCARGA DEL COMPRESOR	
15	PI	201	MANOMETRO	PRESION EN EL TANQUE DE AIRE	
16	FCV	252	VALVULA DE BOLA	VALVULA DE PURGA DEL TANQUE DE AIRE	
17	FCV	253	VALVULA DE SEGURIDAD	VALVULA DE SEGURIDAD DEL TANQUE DE AIRE	
18	FCV	254	VALVULA DE BOLA	VALVULA PARA ALIMENTAR AIRE	
19	FCV	255	VALVULA DE BOLA	VALVULA PARA EL TRANSPORTE DE SOLIDOS	
20	TE	202	TERMOPAR	TEMPERATURA DEL AIRE	
	TT	202	TERMOPAR	TEMPERATURA DEL AIRE (0–5 V)	CANAL
21	FCV	256	VALVULA DE AHUJA	VALVULA PARA CONTROLAR AIRE	
22	FCV	257	VALVULA DE AHUJA	VALVULA PARA CONTROLAR SUMINISTRO DE AIRE	
23	FE	204	PLACA DE ORIFICIO	GASTO DE AGUA	
	FT	204	TRANSDUCTOR DE PRESION DIFERENCIAL	GASTO DE AGUA (PLACA DE ORIFICIO) 0–5 V	CANAL 34
24	PE	203	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION ANTES DE LA PLACA DE ORIFICIO	
	PT	203	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION ANTES DE LA PLACA DE ORIFICIO (4–20 mA)	CANAL 17
25	FCV	258	VALVULA CHECK	VALVULA PARA NO RETORNO DE FLUJO	
26	FCV	259	VALVULA CHECK	VALVULA PARA NO RETORNO DE FLUJO	
27	FE	205	PLACA DE ORIFICIO	GASTO DE AGUA	
	FT	205	TRANSDUCTOR DE PRESION DIFERENCIAL	GASTO DE AGUA (PLACA DE ORIFICIO) 0–5 V	CANAL
28	PE	206	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION ANTES DE LA PLACA DE ORIFICIO	
	PT	206	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION ANTES DE LA PLACA DE ORIFICIO (4–20 mA)	CANAL

Tab. 4.4. Sección de gas.

No.	VARIABLE	PUNTO DE MEDICION	INSTRUMENTO	DESCRIPCION	DAQ Ch
29	PI	301	MANOMETRO	PRESION EN EL TANQUE DE SOLIDOS	
	PE	301	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TANQUE DE SOLIDOS	
	PT	301	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TANQUE DE SOLIDOS	CANAL 18
30	WE	302	CELDA DE CARGA	PESO DE SOLIDOS EN EL TANQUE	
	WT	302	CELDA DE CARGA	PESO DE SOLIDOS EN EL TANQUE	CANAL 19
31	FCV	351	VALVULA DE BOLA	VALVULA PARA LLENADO DEL TANQUE DE SOLIDOS	
32	FCV	352	VALVULA DE BOLA	VALVULA PARA PURGA DEL TANQUE DE SOLIDOS	
33	FCV	353	VALVULA DE MARIPOSA	VALVULA PARA DOSIFICAR SOLIDOS	
34	SE	303	SIN FIN	DOSIFICAR SOLIDOS	
	ST	303	INVERSOR – SIN FIN	VELOCIDAD DE GIRO DEL SIN FIN	CANAL 36
35	PI	304	MANOMETRO	PRESION EN EL TANQUE DE RECUPERACION DE SOLIDOS	
36	FCV	354	VALVULA DE MARIPOSA	VALVULA PARA DESFOGUE DE SOLIDOS	

Tab. 4.5. Sección de sólidos.

No.	VARIABLE	PUNTO DE MEDICION	INSTRUMENTO	DESCRIPCION	DAQ Ch
37	PI	401	MANOMETRO	PRESION AL INICIO DEL TUBO EXPERIMENTAL	
	PE	401	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION AL INICIO DEL TUBO EXPERIMENTAL	
	PT	401	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION AL INICIO DEL TUBO EXPERIMENTAL (4-20 mA)	CANAL
38	FCV	451	VALVULA DE MARIPOSA	VALVULA PARA DESFOGUE	
39	XE	412	POTENCIOMETRO	POSICION DEL TUBO EXPERIMENTAL	
	XT	412	POTENCIOMETRO	POSICION DEL TUBO EXPERIMENTAL	CANAL 22
40	PE	402A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 1)	
	PT	402A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 1)	CANAL 0
41	PE	402B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 1)	
	PT	402B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 1)	CANAL 1
42	PE	413	TRANSDUCTOR DE PRESION DIFERENCIAL	DIFERENCIAL DE PRESION	
	PT	413	TRANSDUCTOR DE PRESION DIFERENCIAL	DIFERENCIAL DE PRESION (0-5 V)	CANAL
43	PE	403A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 2)	
	PT	403A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 2)	CANAL 2
44	PE	403B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 2)	
	PT	403B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 2)	CANAL 3
45	PE	404A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 3)	
	PT	404A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 3)	CANAL 4
46	PE	404B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 3)	
	PT	404B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 3)	CANAL 5
47	PE	405A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 4)	
	PT	405A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 4)	CANAL 6
48	PE	405B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 4)	
	PT	405B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 4)	CANAL 7
49	PE	406A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 5)	
	PT	406A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 5)	CANAL 8
50	PE	406B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 5)	
	PT	406B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 5)	CANAL 9
51	PI	407	MANOMETRO	PRESION EN EL RETORNO DEL TUBO EXPERIMENTAL	
	PE	407	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL RETORNO DEL TUBO EXPERIMENTAL	
	PT	407	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL RETORNO (4-20 mA)	CANAL
52	FCV	452	VALVULA DE ADMISION EXPULSION	VALVULA PARA ADMITIR Y EXPULSAR AIRE	
53	PE	408A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 6)	
	PT	408A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 6)	CANAL 10
54	PE	408B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 6)	
	PT	408B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 6)	CANAL 11
55	PE	414	TRANSDUCTOR DE PRESION DIFERENCIAL	DIFERENCIAL DE PRESION	
	PT	414	TRANSDUCTOR DE PRESION DIFERENCIAL	DIFERENCIAL DE PRESION (0-5 V)	CANAL
56	PE	409A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 7)	
	PT	409A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 7)	CANAL 12
57	PE	409B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 7)	
	PT	409B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 7)	CANAL 13
58	PE	410A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 8)	
	PT	410A	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ARRIBA (PUNTO 8)	CANAL 14
59	PE	410B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 8)	
	PT	410B	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION EN EL TUBO EXPERIMENTAL ABAJO (PUNTO 8)	CANAL 15
60	PI	411	MANOMETRO	PRESION A LA SALIDA DEL TUBO EXPERIMENTAL	
	PE	411	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION A LA SALIDA DEL TUBO EXPERIMENTAL	
	PT	411	TRANSDUCTOR DE PRESION ABSOLUTA	PRESION A LA SALIDA (4-20 mA)	CANAL
61	FCV	453	VALVULA DE MARIPOSA	VALVULA A LA SALIDA DEL TUBO EXPERIMENTAL	
62	FCV	454	VALVULA DE COMPUERTA	VALVULA PARA DESCARGA A LOS SEPARADORES	
63	FCV	455	VALVULA DE MARIPOSA	VALVULA PARA DESCARGA AL SEPARADOR	
64	FCV	456	VALVULA DE MARIPOSA	VALVULA EN LA DESCARGA DE SOLIDOS DE LA CRIBA	
65	FCV	457	VALVULA DE MARIPOSA	VALVULA EN LA DESCARGA A LA PRESA "A"	
66	FCV	458	VALVULA DE MARIPOSA	VALVULA EN LA DESCARGA A LA PRESA "B"	

Tab. 4.6. Sección experimental.

No.	VARIABLE	PUNTO DE MEDICION	INSTRUMENTO	DESCRIPCION	DAQ Ch
67	SE	502	MALACATE PRINCIPAL	LEVANTAMIENTO DEL TUBO EXPERIMENTAL	
	ST	502	INVERSOR - MALACATE PRINCIPAL	VELOCIDAD DE GIRO DEL MALACATE PRINCIPAL	CANAL 28
68	SE	503	MALACATE SECUNDARIO	DESPLAZAMIENTO DEL TUBO EXPERIMENTAL	
	ST	503	INVERSOR - MALACATE SECUNDARIO	VELOCIDAD DE GIRO DEL MALACATE SECUNDARIO	CANAL 29

Tab. 4.7. Sección de los malacates.

Para seleccionar adecuadamente el intervalo de medición de cada sensor se debe hacer una estimación de los valores esperados para cada variable a medir, que depende en gran medida de las condiciones bajo las que se realizará el experimento.

Antes de hacer alguna prueba es necesario realizar el proceso de calibración de cada sensor para obtener sus curvas de comportamiento.

4.2. CALIBRACIÓN DE SENSORES

El proceso de calibración de un sensor permite establecer una constante de correlación entre la variable física medida y la señal eléctrica que se registra en la tarjeta de adquisición de datos, lo cual incluye el proceso de acondicionamiento de señales

Esta constante de correlación es considerada en el programa de adquisición de datos, para visualizar que en la pantalla de la computadora el valor de la variable física se presente en las unidades que corresponde.

En la siguiente figura (Fig. 4.5.) se presenta una curva típica obtenida en el proceso de calibración de un sensor o transductor d presión y un ejemplo de cómo reconsidera en el programa la ecuación de calibración obtenida.

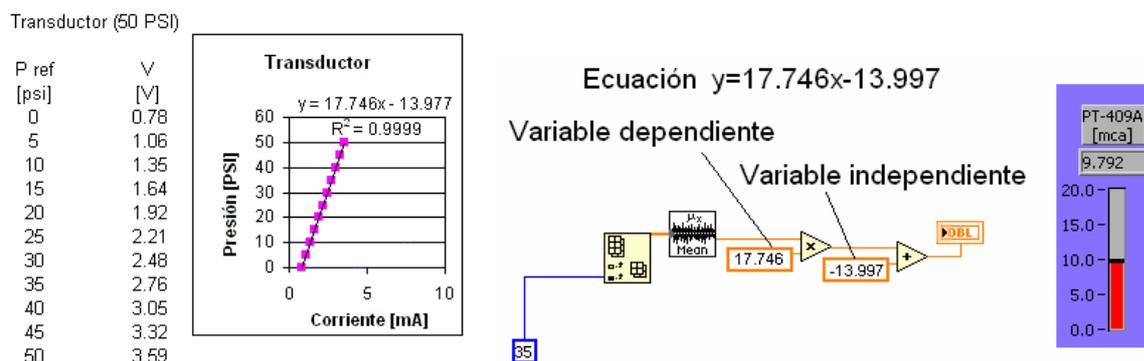


Fig. 4.5. Obtención de la curva de calibración y programación en LabView.

Este proceso se realizó para cada sensor usado en la instalación; a continuación se presentarán las curvas de cada uno de ellos.

4.2.1. CALIBRACION DE LOS SENSORES DE PRESIÓN

Para realizar la calibración de los sensores de presión se utilizó una balanza de pesos muertos (Fig. 4.6), que permite establecer una presión conocida que depende del peso que se coloque sobre el plato del pistón hidráulico central y que a su vez se equilibra con la presión ejercida por otro pistón con manivela, así la presión establecida se transmite, por el principio hidráulico de vasos comunicantes, a la conexión hidráulica donde se coloca el sensor. El sensor convierte entonces la amplitud de la variable física establecida a una señal eléctrica proporcional a ella. Siendo este procedimiento para

varios valores de la variable física. Se genera un registro de presiones y voltajes que permiten la elaboración de la curva de calibración.

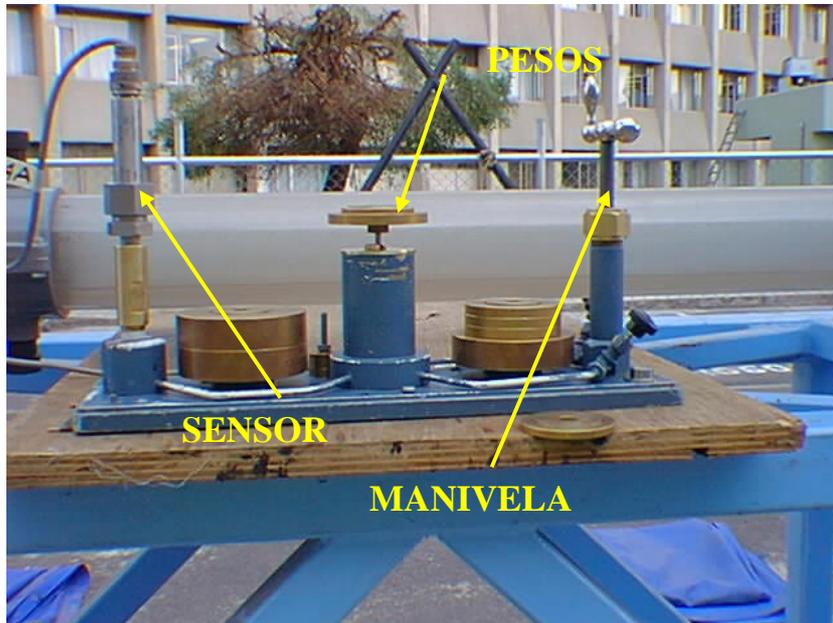
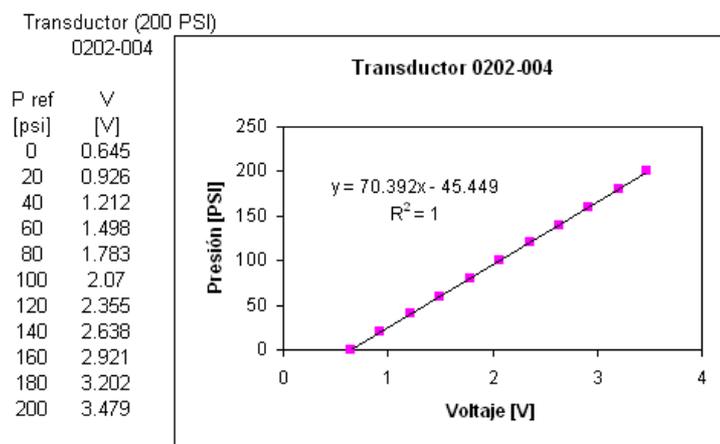


Fig. 4.6. Balanza de pesos muertos.

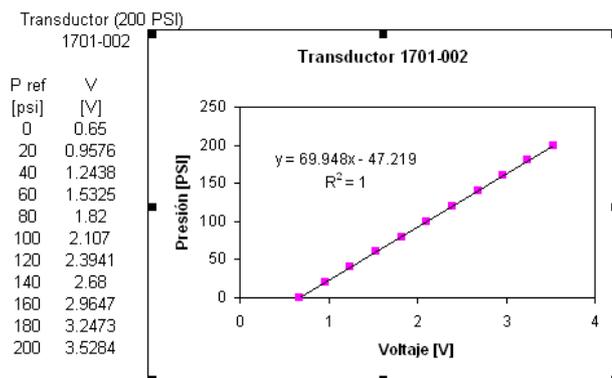
Haciendo una revisión analítica de las características del sistema hidráulico; bomba, tubería, accesorios, con base en los modelos matemáticos de la hidráulica se establecieron las presiones máximas esperadas a lo largo de la instalación para la condición de gasto máximo y poder entonces seleccionar el intervalo de los sensores a utilizar.

En la descarga de la bomba, punto de medición 103, tal como se señala en el DTI, se colocó un sensor de presión de 200PSI cuya curva de calibración es la siguiente.



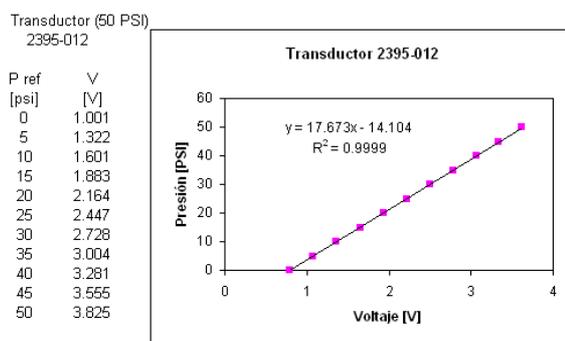
Graf. 4.1. Curva de calibración para el transductor 0202-004 de 200PSI.

Antes de la placa de orificio, punto 104, se colocó un sensor de presión de 200PSI.



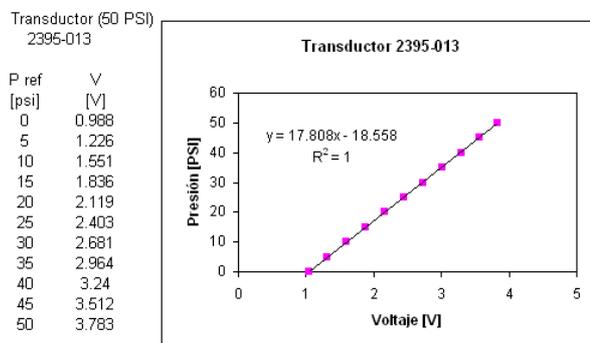
Graf. 4.2. Curva de calibración para el transductor 1701-002 de 200PSI.

En el punto 107 que se encuentra en “el carrito” se colocó un sensor de 50PSI.



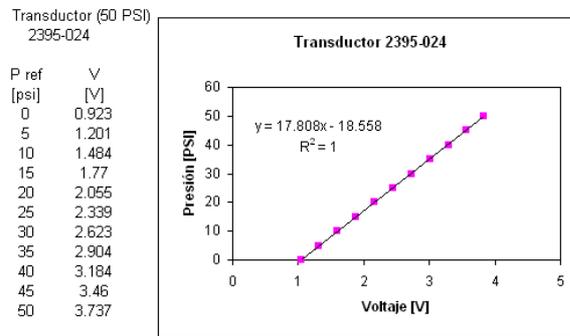
Graf. 4.3. Curva de calibración para el transductor 2395-012 de 50PSI.

El tanque de sólidos debe tener la misma presión que en la línea de inyección de la mezcla. Para esto se colocó un sensor de presión de 50PSI en el punto 301, cuya curva de calibración es la siguiente.



Graf. 4.4. Curva de calibración para el transductor 2395-013 de 50 PSI.

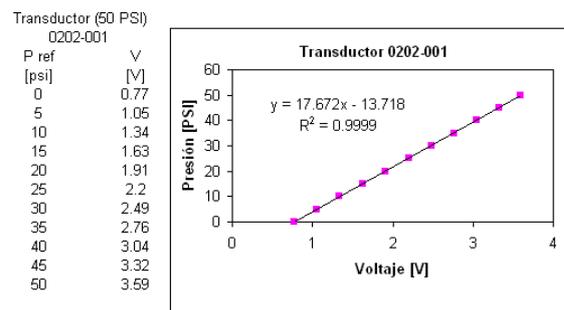
Para conocer el gasto másico de gas es necesario determinar la presión en la línea de aire, para ello se colocó un sensor de 50PSI en el punto 203.



Graf. 4.5. Curva de calibración para el transductor 2395-024 de 50 PSI.

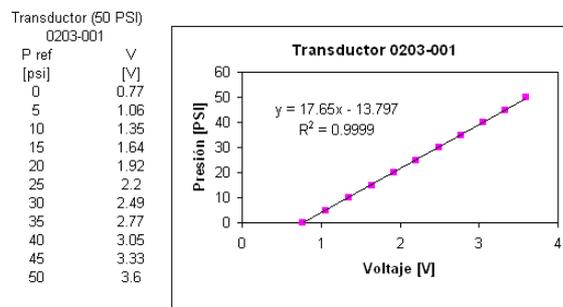
En la tubería experimental se tienen colocados 10 sensores en la parte superior, “de ida”, de 50PSI distribuidos en 5 puntos y 6 en la parte inferior, “de regreso”, de 15PSI distribuidos en 3 puntos. Las curvas de calibración son las siguientes.

Para el punto 402A.



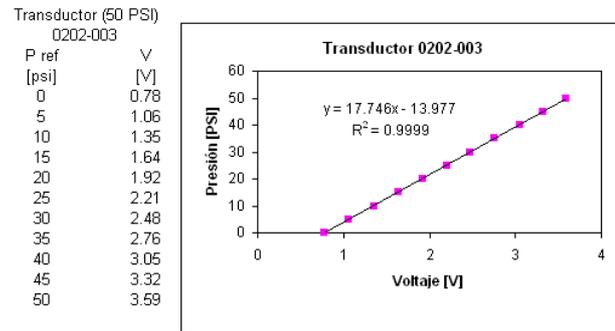
Graf. 4.6. Curva de calibración para el transductor 0202-001 de 50 PSI.

Para el punto 402B.



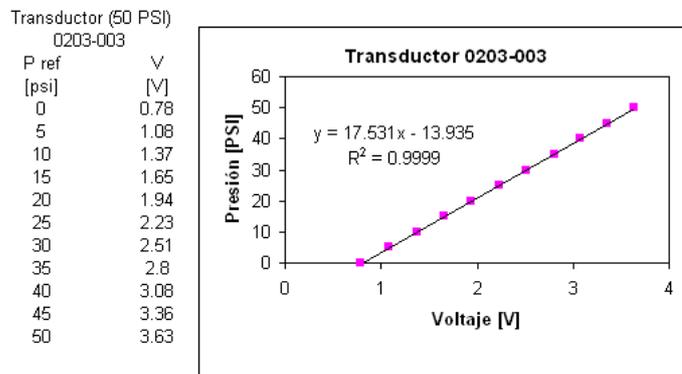
Graf. 4.7. Curva de calibración para el transductor 0203-001 de 50 PSI.

Para el punto 403A.



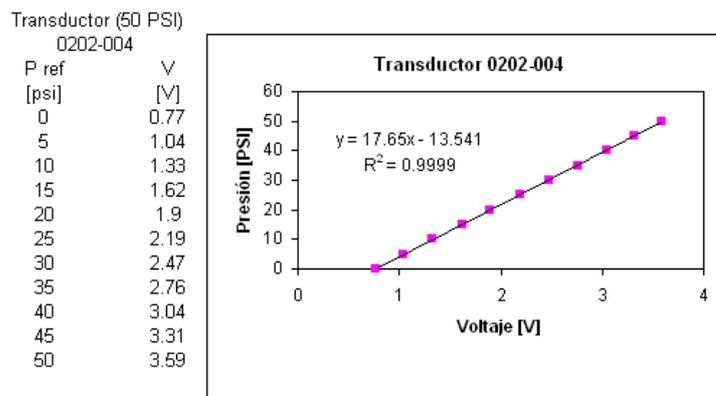
Graf. 4.8. Curva de calibración para el transductor 0202-003 de 50 PSI.

Para el punto 403B.



Graf. 4.9. Curva de calibración para el transductor 0203-003 de 50 PSI.

Para el punto 404A.

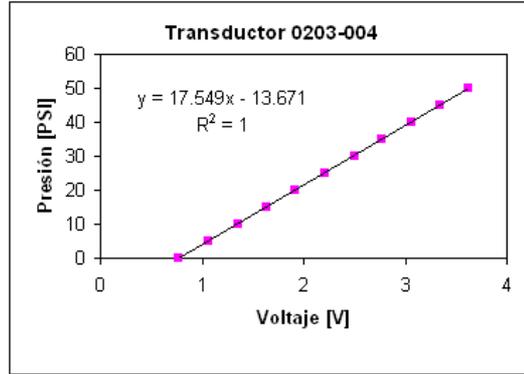


Graf. 4.10. Curva de calibración para el transductor 0202-004 de 50 PSI.

Para el punto 404B.

Transductor (50 PSI)
0203-004

P ref [psi]	V [V]
0	0.77
5	1.06
10	1.35
15	1.64
20	1.92
25	2.21
30	2.5
35	2.77
40	3.06
45	3.34
50	3.62

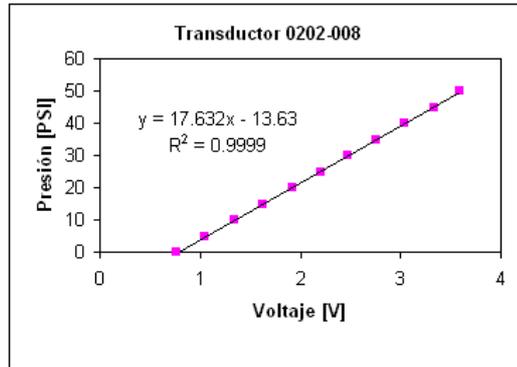


Graf. 4.11. Curva de calibración para el transductor 0203-004 de 50 PSI.

Para el punto 405A.

Transductor (50 PSI)
0202-008

P ref [psi]	V [V]
0	0.76
5	1.05
10	1.34
15	1.63
20	1.92
25	2.2
30	2.48
35	2.76
40	3.04
45	3.33
50	3.59

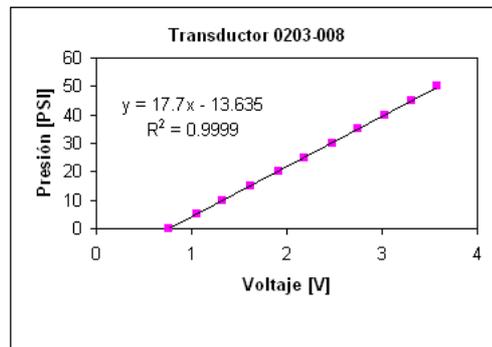


Graf. 4.12. Curva de calibración para el transductor 0202-008 de 50 PSI.

Para el punto 405B.

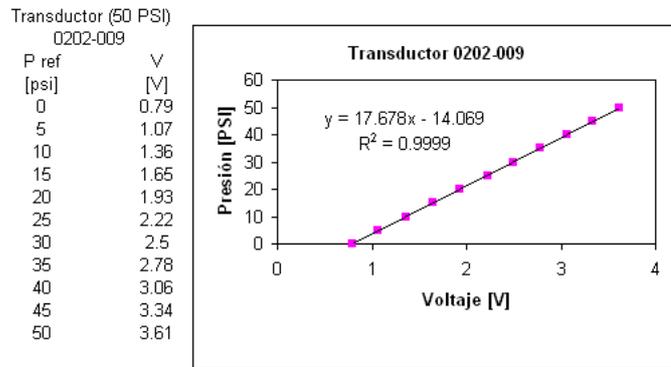
Transductor (50 PSI)
0203-008

P ref [psi]	V [V]
0	0.76
5	1.05
10	1.33
15	1.62
20	1.91
25	2.19
30	2.48
35	2.75
40	3.03
45	3.31
50	3.58



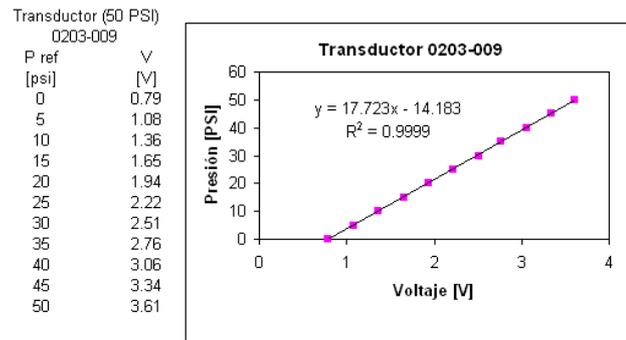
Graf. 4.13. Curva de calibración para el transductor 0203-008 de 50 PSI.

Para el punto 406A.



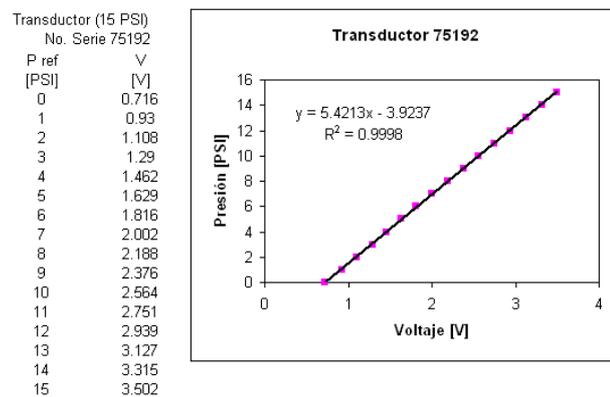
Graf. 4.14. Curva de calibración para el transductor 0202-009 de 50 PSI.

Para el punto 406B.



Graf. 4.15. Curva de calibración para el transductor 0203-009 de 50 PSI.

Para el punto 408A.

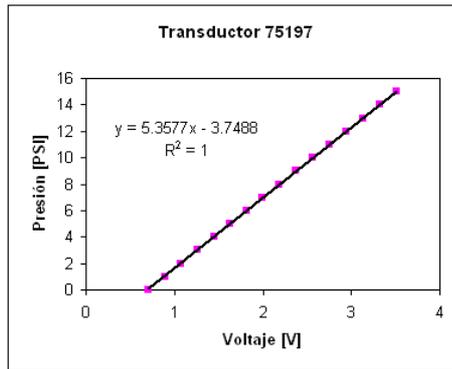


Graf. 4.16. Curva de calibración para el transductor 75192 de 15 PSI.

Para el punto 408B.

Transductor (15 PSI)
No. Serie 75197

P ref [PSI]	V [V]
0	0.711
1	0.893
2	1.076
3	1.257
4	1.446
5	1.625
6	1.813
7	1.999
8	2.186
9	2.375
10	2.565
11	2.752
12	2.941
13	3.13
14	3.318
15	3.506

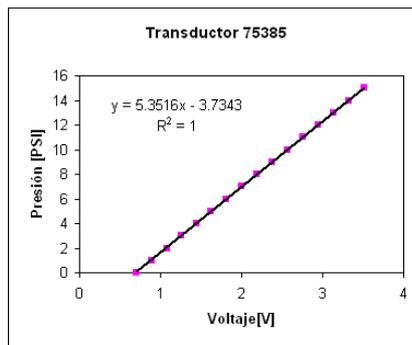


Graf. 4.17. Curva de calibración para el transductor 75197 de 15 PSI.

Para el punto 409A.

Transductor (15 PSI)
No. Serie 75385

P ref [PSI]	V [V]
0	0.708
1	0.892
2	1.076
3	1.258
4	1.44
5	1.624
6	1.812
7	1.999
8	2.187
9	2.377
10	2.564
11	2.753
12	2.942
13	3.13
14	3.319
15	3.507

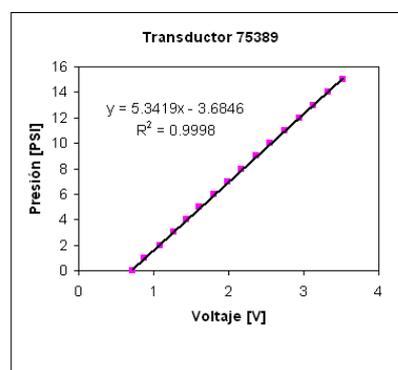


Graf. 4.18. Curva de calibración para el transductor 75385 de 15 PSI.

Para el punto 409B.

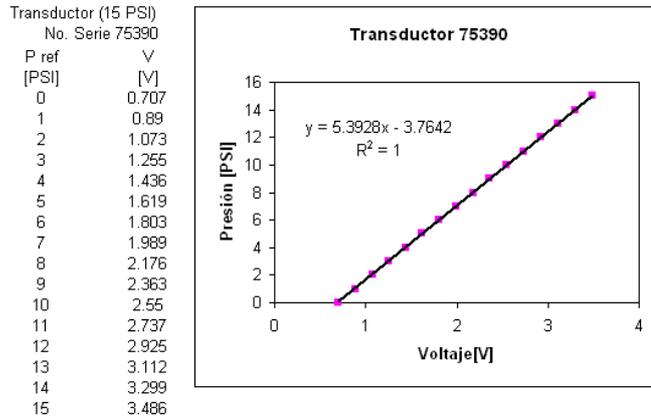
Transductor (15 PSI)
No. Serie 75389

P ref [PSI]	V [V]
0	0.712
1	0.873
2	1.078
3	1.273
4	1.431
5	1.611
6	1.797
7	1.984
8	2.173
9	2.364
10	2.553
11	2.744
12	2.937
13	3.13
14	3.323
15	3.517



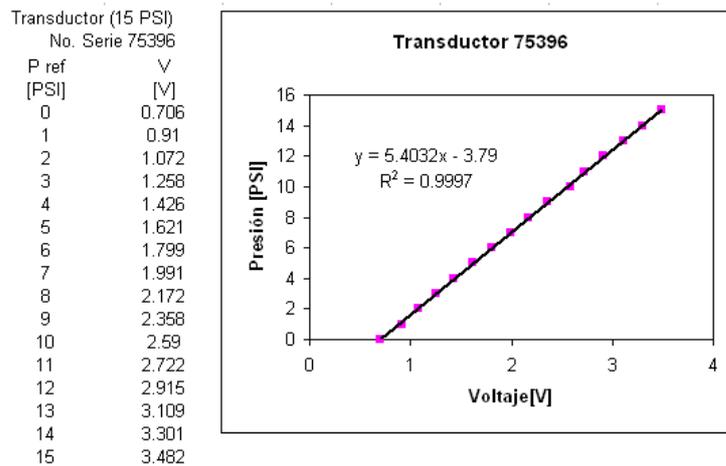
Graf. 4.19. Curva de calibración para el transductor 75389 de 15 PSI.

Para el punto 410A.



Graf. 4.20. Curva de calibración para el transductor 75390 de 15 PSI.

Para el punto 410B.

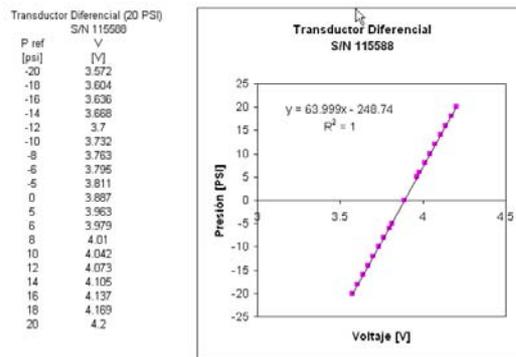


Graf. 4.21. Curva de calibración para el transductor 75396 de 15 PSI.

4.2.2. CALIBRACION DE LOS SENSORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL

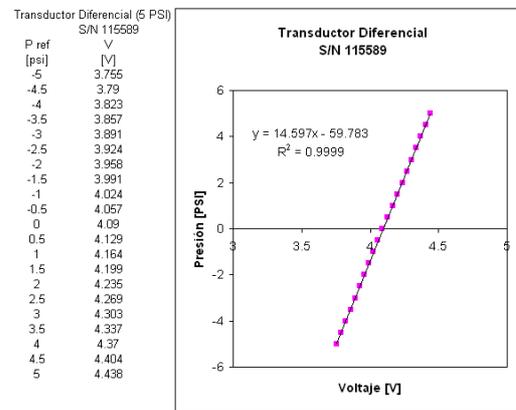
La forma de calibrar los sensores de presión diferencial es muy similar a la calibración de los sensores de presión, con la diferencia de que a este tipo de sensores se les debe aplicar presión en dos puntos, por el lado de baja presión y por el lado de alta presión. Cuando se excita por el lado de alta presión se obtienen valores positivos y cuando se excita por el lado de baja presión se obtienen valores negativos.

El gasto de agua se calcula a partir de la medición de la caída de presión en una placa de una placa de orificio, punto 105, para ello se utilizó un sensor de presión diferencial de 20PSI (Graf. 4.22).



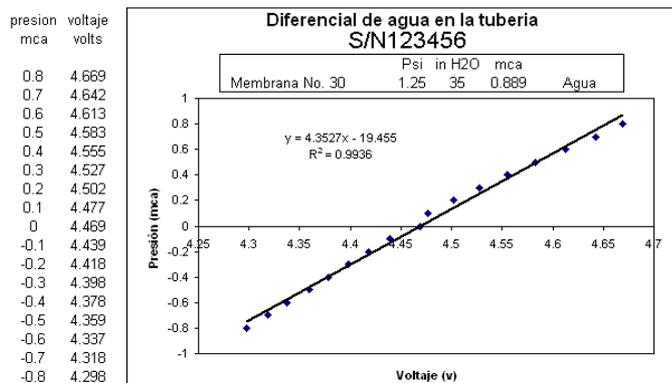
Graf. 4.22. Curva de calibración para el transductor 115588.

Para la medición de la caída de presión en la placa de orificio instalada en la tubería de gas, punto 204, se utilizó un sensor de presión diferencial de 5PSI (Graf. 4.23).



Graf. 4.23. Curva de calibración para el transductor 115589.

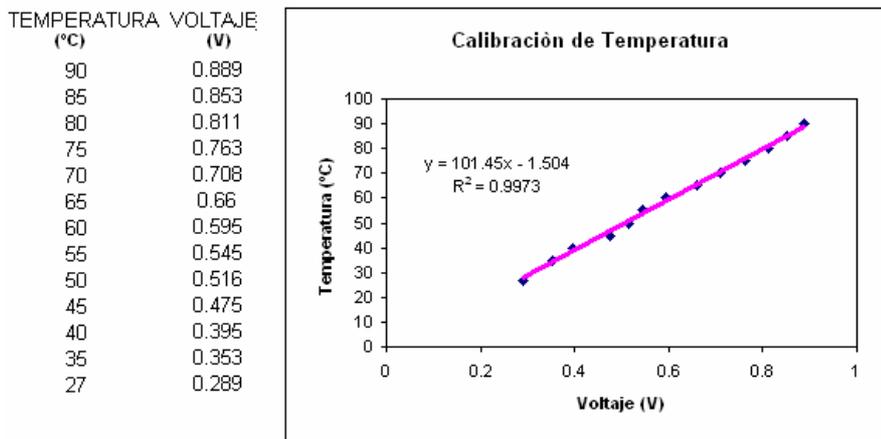
Para medir la pérdida de carga en la tubería experimental y poder calcular el coeficiente de fricción para este tipo de tubería, punto 413, se utilizó el siguiente sensor de presión diferencial de 1.25PSI (Graf. 4.24).



Graf. 4.24. Curva de calibración para el transductor 123456.

4.2.3. CALIBRACION DEL SENSOR DE TEMPERATURA

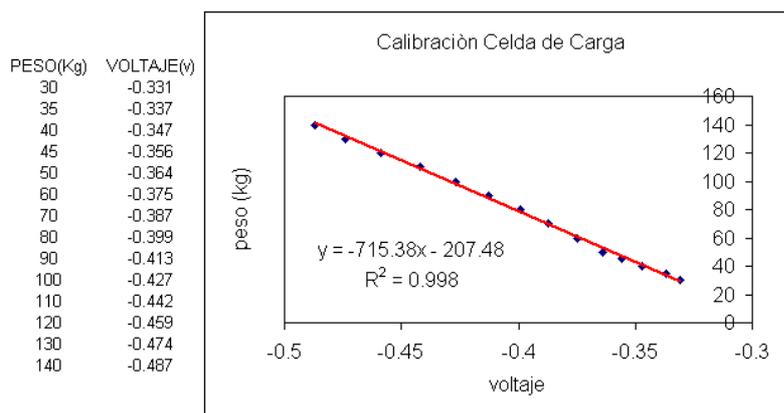
La calibración del sensor utilizado en la tubería de gas, punto 202, se realizó de manera directa utilizando un termómetro de mercurio como elemento de medición, de referencia. Con este proceso se generó la siguiente curva de calibración (Graf. 4.25).



Graf. 4.25. Curva de calibración para el sensor de temperatura.

4.2.4. CALIBRACION DEL SENSOR DE PESO

En el tanque de sólidos se colocó un sensor de peso, también conocido como celda de carga, punto 302, y para obtener su curva de calibración se le fue agregando peso al tanque. Con la tabla generada se obtuvo la siguiente curva de calibración (Graf. 4.26).

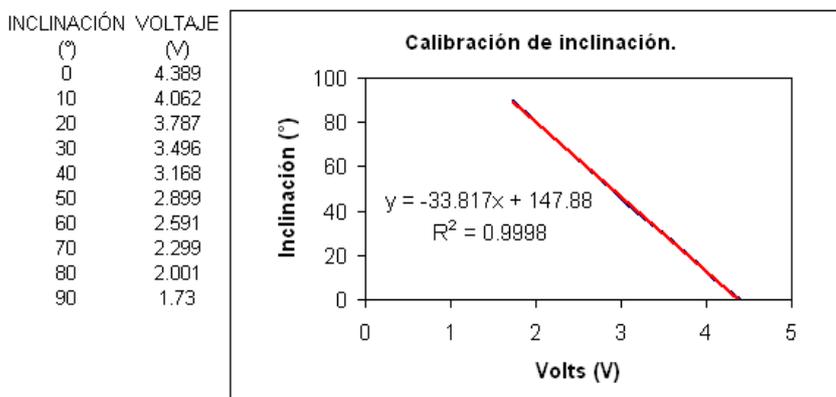


Graf. 4.26. Curva de calibración para el sensor de peso.

4.2.5. CALIBRACION DEL SENSOR DE POSICIÓN

Para determinar la inclinación de la tubería experimental se colocó un sensor en la misma, punto 412. La calibración de este sensor se realizó moviendo la estructura, a la

cual se le coloco un medidor de inclinación, cada 10° se tomo la lectura del sensor y se genero la siguiente tabla y a partir de esta la curva de calibración del sensor (Graf. 4.27).

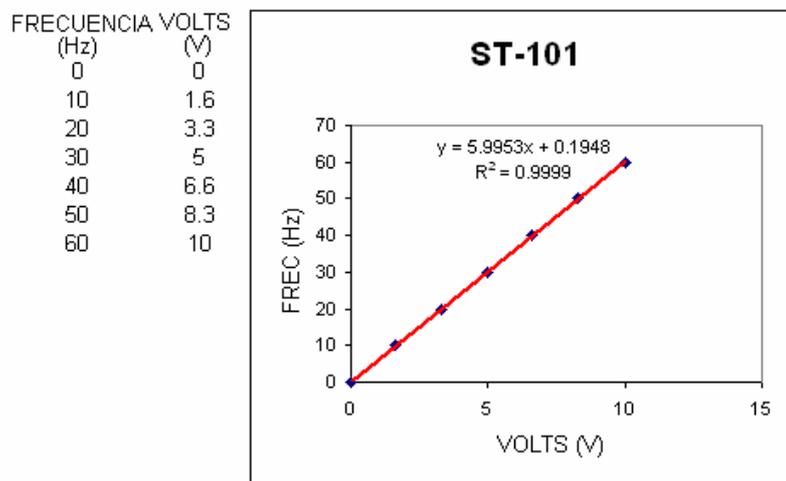


Graf. 4.27. Curva de calibración para el sensor de posición.

4.2.6. CALIBRACION DE LOS SENSORES DE VELOCIDAD

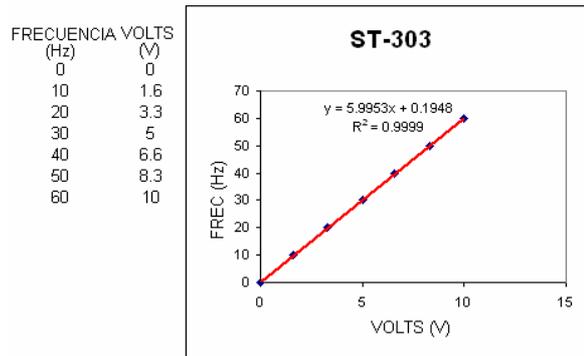
Para controlar la velocidad de giro de los motores eléctricos de inducción, los inversores modifican la frecuencia del voltaje de alimentación al motor, en este caso desde 0Hz hasta 60Hz. Estos equipos además entregan una señal analógica entre 0 y 10 Volts, proporcional a la frecuencia y por lo tanto proporcional a la velocidad de giro del motor

Para el inversor de la bomba, la curva del sensor de velocidad de giro es la siguiente (Graf. 4.28), que está colocado en el punto 101.



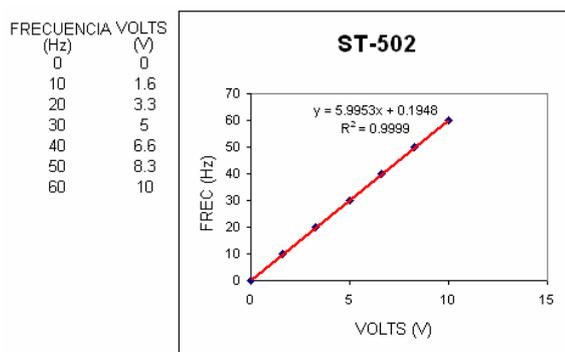
Graf. 4.28. Curva de calibración para la salida analógica del inversor de la bomba.

En la gráfica 4.29 se presenta la curva de calibración para el sensor de velocidad de giro del inversor del dosificador de sólidos, que se encuentra en el punto 303.



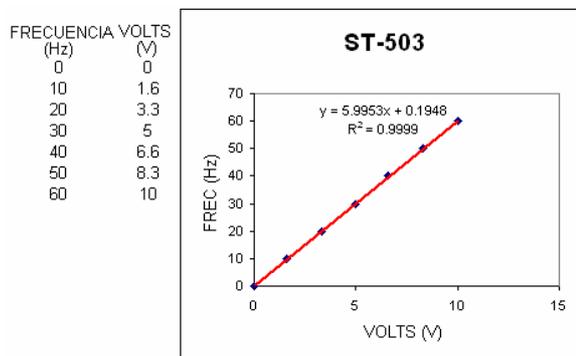
Graf. 4.29. Curva de calibración para la salida analógica del inversor del dosificador de sólidos.

La curva que rige el comportamiento del sensor de la velocidad de giro del malacate principal es la siguiente (Graf. 4.30), que está colocado en el punto 502.



Graf. 4.30. Curva de calibración para la salida analógica del inversor del malacate principal.

La curva de calibración para el sensor de la velocidad de giro del malacate secundario es la siguiente (Gaf. 4.31), que está colocado en el punto 503.



Graf. 4.31. Curva de calibración para la salida analógica del inversor del malacate secundario.

CAPÍTULO 5

PRUEBAS EN EL EQUIPO EXPERIMENTAL DE FLUJOS MULTIFÁSICOS Y DE TRANSPORTE DE RECORTES

Una vez terminada la instalación de todos los sensores y hechas sus respectivas calibraciones, se realizaron una serie de pruebas en el equipo experimental de flujos multifásicos. Las primeras pruebas que se hicieron fueron preliminares, en las que no se usó el sistema de adquisición de datos, y se utilizaron únicamente medidores convencionales (manómetros de carátula, manómetros diferenciales en “U”, tacómetro digital, etc.), para empezar con la caracterización del sistema hidráulico.

Posteriormente se realizaron pruebas, utilizando el equipo de adquisición de datos, en las que se continuó con la caracterización del sistema hidráulico. Otras más para obtener el coeficiente de fricción de la tubería experimental, ambas trabajando únicamente con agua.

Se hicieron pruebas con flujo bifásico (líquido-gas) para comprobar diferentes patrones de este tipo de flujo y también se realizaron otras pruebas en flujo trifásico (sólidos-líquido-gas) para medir velocidad de arrastre de sólidos.

5.1. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO

Para tener una visión más amplia del comportamiento del sistema hidráulico, se realizaron una serie de pruebas con las que se obtuvieron las curvas del sistema bajo distintas condiciones de operación.

5.1.1. OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DEL SISTEMA CON DISTINTAS CONDICIONES DE APERTURA DE LA VÁLVULA DE ESTRANGULAMIENTO

La primera prueba consistió en obtener la curva de comportamiento del sistema con la tubería en posición horizontal (inclinación de 0°) y con distintas condiciones de apertura de la válvula de estrangulamiento, FVC-153.

En esta prueba no se utilizó el sistema de adquisición de datos y se colocaron únicamente instrumentos de medición convencionales como manómetros de carátula para medir la presión en distintos puntos a lo largo de la tubería experimental (Fig. 5.1.), manómetros diferenciales en “U” para conocer la caída de presión en la placa orificio, un tacómetro para medir la velocidad de giro del motor de la bomba; también se utilizó un medidor de gasto por ultrasonido para conocer el gasto suministrado por al bomba.



Fig. 5.1. Mediciones directamente en manómetros.

La instalación experimental cuenta con un medidor de gasto por ultrasonido, marca Panametrics, modelo DF868^{5.1}, con transductores portátiles con sujeción por cadenas. Este modelo soporta dos canales de medición simultánea, cada uno con dos modos de detección, denominados: “Transit-time” y “Trans-Flection” y su intervalo de medición es de -12.2 a 12.2 m/s (-40 a 40 ft/s), que para la tubería de 4” de diámetro representa un gasto máximo de 100 l/s.



Fig. 5.2. Medidor de gasto Panametrics.

^{5.1} Para más detalle del medidor de gasto por ultrasonido consultar el “User Manual of Panametrics DF868”.

El modo "Transit-time", mide el tiempo de tránsito de una señal ultrasónica emitida y recibida entre dos transductores a favor y a contra flujo, en este modo los transductores son instalados uno después del otro de forma tal que la trayectoria de emisión coincida con la ubicación del transductor opuesto, a través de una línea cercana a 45° respecto al eje del tubo. De esta forma, cuando la emisión ultrasónica viaja en el sentido del flujo el tiempo de tránsito es menor que cuando viaja en sentido opuesto, a contra flujo. La diferencia entre los tiempos de arribo en un sentido y el otro, es proporcional a la velocidad del fluido, además, este equipo tiene la capacidad de medir la velocidad de propagación de la onda ultrasónica y mediante un análisis estadístico, validar la estimación del gasto medido. Una característica importante de este modo de operación (transit-time) es que la medición del gasto se puede hacer en flujo limpio y no requiere de partículas en suspensión que reflejen la señal ultrasónica emitida por los transductores.

El modo "Trans-flection", mide la señal ultrasónica reflejada en partículas en suspensión y fue desarrollado para realizar mediciones de flujo en aquellas situaciones en que el modo "Transit-time" no pueda emplearse por problemas de dispersión de la señal ultrasónica. Dado que esta técnica permite una medición indirecta del flujo, a través de la medición de velocidad de las partículas arrastradas, debe calibrarse para garantizar la medición del gasto. Teóricamente, con esta técnica es posible medir el gasto del fluido aún con arrastre de burbujas de aire en poca proporción; por esta razón se adquirió este equipo para realizar la medición de flujo bifásico agua-aire, pero desgraciadamente no se han podido efectuar este tipo de mediciones con el equipo.

El correcto funcionamiento del medidor por ultrasonido depende de una buena ubicación y colocación de los transductores, lo que requiere ubicarlos lejos de cualquier fuente de turbulencia ya que esto tiende a dispersar la lectura al alterar el perfil del flujo en la zona de medición. La recomendación general para establecer el sitio de colocación de los transductores es que deben instalarse al menos 10 diámetros de tubería recta aguas abajo y 5 diámetros aguas arriba de cualquier perturbación (codos, válvulas, etc.) para garantizar un perfil del flujo uniforme.

En la instalación pudimos observar que debe dejarse mayor distancia a cualquier perturbación, al menos el doble de lo recomendado por el fabricante, y aún así se tuvieron problemas para tener una medición confiable. Para la realización de esta prueba, los transductores se colocaron en el punto de medición 106.

Como se muestra en la tabla 5.1, se registraron, en forma manual, los valores de frecuencia del voltaje de alimentación a los motores, velocidad de giro de la bomba, gasto, presión en la descarga de la bomba PI-101, presión antes de la mezcla PI-107, presión a la entrada de la tubería experimental PI- 401, presión en el retorno de la tubería experimental PI-407y la presión a la salida de dicha tubería PI-411. Se hicieron pruebas para distintos grados de apertura de la válvula de estrangulamiento FCV-153.

PRUEBAS EN EL MODELO EXPERIMENTAL DE FLUJO MULTIFÁSICO DEL "IMP"
Inclinación de la tubería = 0°

Apertura Válvula 90°

f	N	Qultra	Pdesc			Ptang			Pin			Pinter			Pout		
			Lectura		Ajuste												
[Hz]	[rpm]	[l/s]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]
25	1490	18.3	24		14.47	10		7.48	7.5		5.27	5.75		4.45	5		4.60
30	1784	20.9	32		20.04	13		9.64	10		7.06	8		6.03	6.75		5.82
35	2077	24.2	42		27.01	16.5		12.17	13		9.20	10.75		7.96	8.75		7.21
40	2370	28	53		34.67	21		15.41	16.5		11.69	13.5		9.90	11		8.78
45	2660	31.8	66		43.72	26		19.02	20		14.19	16.75		12.19	13.25		10.35
50	2942	37	80		53.48	31		22.63	24		17.04	20.5		14.83	16		12.26
55	3189	40	93		62.53	36		26.23	28		19.90	23.5		16.94	18.5		14.01

200.2

Apertura Válvula 60°

f	N	Qultra	Pdesc			Ptang			Pin			Pinter			Pout		
			Lectura		Ajuste												
[Hz]	[rpm]	[l/s]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]
25	1486	16.6	24.5		14.81	9.5	0.67	7.13	7.5	0.5	5.13	6.25	0.44	4.80	5.25	0.38	4.83
30	1780	20.8	32.5		20.39	12	0.85	8.95	9.5	0.65	6.61	8	0.56	6.01	6.25	0.44	5.47
35	2072	24.7	42.5		27.35	15.5	1.1	11.49	12	0.85	8.51	10.25	0.72	7.61	8	0.56	6.68
40	2363	28.2	54		35.37	19.5	1.4	14.47	15	1.1	10.85	13	0.92	9.57	10.25	0.72	8.25
45	2651	31.6	68.5		45.47	24	1.7	17.64	19	1.3	13.29	16	1.12	11.63	12.5	0.88	9.83
50	2934	35.5	81		54.17	29	2	20.98	22.5	1.6	16.06	19	1.34	13.79	15	1.05	11.54

Apertura Válvula 50°

f	N	Qultra	Pdesc			Ptang			Pin			Pinter			Pout		
			Lectura		Ajuste												
[Hz]	[rpm]	[l/s]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]
25	1486	15.8	24.5		14.81	6.7	0.6	5.76	6.7	0.47	4.69	5.5	0.4	4.34	4.25	0.32	4.18
30	1781	20.1	33		20.74	8.5	0.8	7.43	8.5	0.6	6.00	7.25	0.51	5.50	5.75	0.41	5.15
35	2072	23.5	43		27.70	11	1	9.36	11	0.78	7.80	9.25	0.65	6.90	7.25	0.51	6.17
40	2364	26.1	55		36.06	13.5	1.22	11.39	13.5	0.95	9.55	11.5	0.8	8.45	9	0.63	7.37
45	2653	29.4	68		45.12	16.5	1.5	13.91	16.5	1.17	11.74	14	0.98	10.23	11	0.77	8.76
50	2937	33.1	83		55.57	20	1.8	16.71	20	1.4	14.15	16.75	1.18	12.19	13	0.92	10.20
55	3198	36	97		65.32	23	2.1	19.32	23	1.6	16.24	19.5	1.36	14.06	15	1.06	11.59

Apertura Válvula 40°

f	N	Qultra	Pdesc			Ptang			Pin			Pinter			Pout		
			Lectura		Ajuste												
[Hz]	[rpm]	[l/s]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]
25	1489	11.9	26		15.86	6.5	0.45	4.92	5	0.36	3.48	4.25	0.3	3.40	3.25	0.26	3.54
30	1784	14.3	35		22.13	8	0.55	5.97	6.2	0.45	4.42	5.25	0.37	4.10	4.5	0.31	4.22
35	2078	16.8	45		29.10	9.5	0.68	7.18	7.5	0.5	5.13	6.25	0.44	4.80	5.25	0.38	4.83
40	2371	19.3	58.5	4	37.92	11	0.75	8.08	8.5	0.6	6.00	7	0.5	5.36	5.75	0.4	5.10
45	2663	21.4	72	5	47.58	12.8	0.9	9.50	10	0.7	7.04	8.25	0.58	6.20	6.5	0.46	5.66
50	2951	23.6	86	6	57.40	15	1.05	11.06	11.5	0.8	8.08	9.5	0.68	7.14	7.75	0.54	6.49
55	3227	25.3	103		69.50	16.5	1.15	12.11	13	0.9	9.12	11	0.77	8.12	8.75	0.6	7.14

Apertura Válvula 30°

f	N	Qultra	Pdesc			Ptang			Pin			Pinter			Pout		
			Lectura		Ajuste												
[Hz]	[rpm]	[l/s]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]	[lb/in ²]	[kg/cm ²]	[mca]
25	1493	2.9	25		15.16	3.5	0.25	2.81	2.5	0.17	1.68	2	0.14	1.80	2	0.14	2.51
30	1789	3.3	34		21.43	4	0.27	3.09	2.5	0.18	1.73	2	0.17	1.95	2	0.16	2.61
35	2085	3.7	44		28.40	4	0.27	3.09	3	0.2	2.01	2	0.17	1.95	2.25	0.18	2.79
45	2676	4.3	72		47.90	4	0.28	3.14	3	0.2	2.01	2.2	0.18	2.07	2.25	0.18	2.79
55	3260	4.8	100		67.41	4	0.3	3.25	3	0.2	2.01	2	0.17	1.95	2.25	0.18	2.79

Tab. 5.1. Variables hidráulicas para la primera prueba.

Así mismo, se tomaron datos de variables eléctricas para ver conocer el funcionamiento del inversor. En la siguiente tabla se muestran los datos de las variables eléctricas registradas: voltajes entre fases, corrientes por fase, potencias, tanto del lado de la línea y como del lado del inversor.

VARIALES ELÉCTRICAS

Apertura Válvula 90°

LINEA											MOTOR												
f [Hz]	V ₁₂ [V]	V ₂₃ [V]	V ₃₁ [V]	i ₁ [A]	i ₂ [A]	i ₃ [A]	P ₁₂ [kW]	P ₂₃ [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	V _{UV} [V]	V _{WV} [V]	V _{WU} [V]	i _u [A]	i _v [A]	i _w [A]	P _{UV} [kW]	P _{WV} [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	η _{INV}
25	216.9	217.3	216.9	20.8	21.7	15.7	2.7	1.6	4.3	7.29	0.590	160.6	160.4	160.1	41.5	42.7	42	0.4	3.3	3.7	11.68	0.317	0.537
30	217.7	217.7	217.4	33.4	32.3	21	4.7	2.3	7	10.89	0.643	173.3	173.4	173.8	49.1	49.3	49.3	1.4	5	6.4	14.80	0.433	0.673
35	216	216.7	214.7	51.2	49.8	27.7	7.9	3.2	11.1	16.01	0.693	185.8	186.2	186.2	59.4	59.2	59.4	2.9	7.5	10.4	19.12	0.544	0.784
40	215.1	214.4	213.4	75.1	71.6	36.1	12.5	4	16.5	22.62	0.730	197.3	197.3	197.4	74	74.3	73.3	4.9	10.7	15.6	25.25	0.618	0.847
45	215.5	214	212.6	105.9	102.3	43.4	18.4	5	23.4	31.09	0.753	208.8	208.5	208.9	88.9	88.3	88.5	7.4	14.9	22.3	32.02	0.696	0.925
50	213.5	210	207	150.5	140.4	54.2	26.3	6.3	32.6	41.87	0.779	217	217.5	217.6	109.9	109.1	109.6	10.5	20.7	31.2	41.24	0.757	0.972
55	211.2	206.6	210	210.2	205.8	76	38	7.8	45.8	59.44	0.770	213.8	213.8	214	163	161.5	161.5	14.7	30.2	44.9	60.01	0.748	0.971

Apertura Válvula 60°

LINEA											MOTOR												
f [Hz]	V ₁₂ [V]	V ₂₃ [V]	V ₃₁ [V]	i ₁ [A]	i ₂ [A]	i ₃ [A]	P ₁₂ [kW]	P ₂₃ [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	V _{UV} [V]	V _{WV} [V]	V _{WU} [V]	i _u [A]	i _v [A]	i _w [A]	P _{UV} [kW]	P _{WV} [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	η _{INV}
25	218.4	219.3	218.4	18.1	18.4	13.7	2.4	1.4	3.8	6.34	0.600	161	161	160.8	38.5	40	41.5	0.5	3.4	3.9	11.15	0.360	0.583
30	219	219	218.2	29.3	28.4	19.4	4.2	2.2	6.4	9.74	0.657	174	174.3	174.7	46.4	46.9	48.1	1.3	4.7	6.3	14.23	0.433	0.673
35	219	218.6	217.6	46	44.3	25.7	7.5	3.1	10.6	14.63	0.725	187	187	187	56.7	56.7	58.4	2.8	7.2	10	18.55	0.539	0.744
40	218.7	217	217	67.2	63.8	32.8	11.6	3.8	15.4	20.58	0.748	199	199.2	199.1	68.4	68.3	69.4	4.5	10.1	14.6	23.69	0.616	0.823
45	218.5	217.2	215.2	94.5	90.2	40.9	17.3	5	22.3	28.26	0.789	210	210	210.1	83.7	83.7	84.1	6.8	14.2	21	30.50	0.689	0.931
50	217.4	214.9	215.2	130.8	125.6	52.1	24.3	6.4	30.7	38.44	0.799	219.8	219.8	220	103.8	103.3	103.5	9.9	19.4	29.3	39.43	0.743	0.931
55	217.2	214.5	212.2	139.3	132.6	52.7	25.1	6.3	31.4	40.22	0.781	219.7	219.6	219.1	106.3	106.2	107.1	10.2	20.3	30.5	40.50	0.753	0.965

Apertura Válvula 50°

LINEA											MOTOR												
f [Hz]	V ₁₂ [V]	V ₂₃ [V]	V ₃₁ [V]	i ₁ [A]	i ₂ [A]	i ₃ [A]	P ₁₂ [kW]	P ₂₃ [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	V _{UV} [V]	V _{WV} [V]	V _{WU} [V]	i _u [A]	i _v [A]	i _w [A]	P _{UV} [kW]	P _{WV} [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	η _{INV}
25	219.5	220.5	220	17	17.4	14.4	2.6	1.7	4.3	6.20	0.694	161.2	161.2	161.2	39.2	40.6	41.6	0.3	3	3.3	11.30	0.292	0.421
30	218.5	218.5	218.2	29.6	28	19.6	4.6	2.4	7	9.73	0.719	174.5	174.5	176.6	45.7	46.7	47.4	1.2	4.7	6.9	14.14	0.417	0.580
35	219.3	219	219.1	44.9	42.7	26.1	7.4	3.1	10.5	14.38	0.730	187.2	187.2	187.2	56.1	56.2	57.8	2.6	7	9.6	18.38	0.522	0.715
40	218.7	217	217	67.2	63.8	32.8	11.6	3.8	15.4	20.58	0.748	199	199.2	199.1	68.4	68.3	69.4	4.5	10.1	14.6	23.69	0.616	0.823
45	218.5	217.2	215.2	94.5	90.2	40.9	17.3	5	22.3	28.26	0.789	210	210	210.1	83.7	83.7	84.1	6.8	14.2	21	30.50	0.689	0.931
50	217.4	214.9	215.2	130.8	125.6	52.1	24.3	6.4	30.7	38.44	0.799	219.8	219.8	220	103.8	103.3	103.5	9.9	19.4	29.3	39.43	0.743	0.931
55	216	212	208.4	181.9	179.8	68.2	34.5	7.7	42.2	52.65	0.801	222.3	222.5	222.1	138	138.3	137.2	13.8	27.2	41	53.07	0.773	0.964

Apertura Válvula 40°

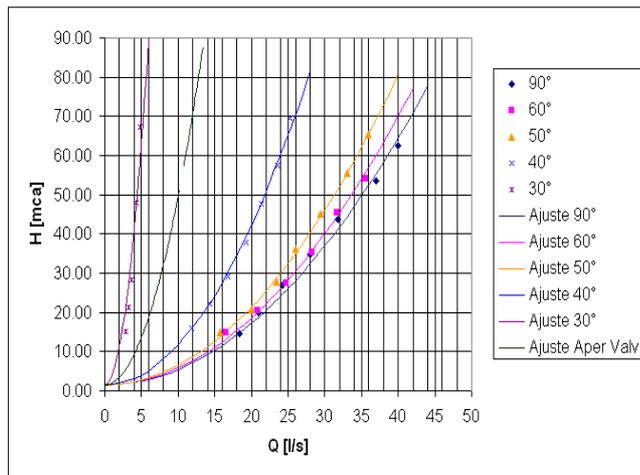
LINEA											MOTOR												
f [Hz]	V ₁₂ [V]	V ₂₃ [V]	V ₃₁ [V]	i ₁ [A]	i ₂ [A]	i ₃ [A]	P ₁₂ [kW]	P ₂₃ [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	V _{UV} [V]	V _{WV} [V]	V _{WU} [V]	i _u [A]	i _v [A]	i _w [A]	P _{UV} [kW]	P _{WV} [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	η _{INV}
25	217.2	218.2	217.5	15.4	16.3	13.1	2.1	1.5	3.6	5.63	0.640	160.1	160.8	160.8	37.4	38.8	39.8	0.1	2.9	3	10.75	0.279	0.436
30	218.2	218.6	218	24.9	24.6	18.8	3.8	2.2	6	8.61	0.697	174.9	174.6	171.9	43.1	43.5	44.5	0.9	4.4	6.3	13.16	0.403	0.578
35	217.5	218.5	217.7	36.9	37.3	23.6	6.3	2.8	9.1	12.56	0.725	187.5	187.4	187.5	50.5	51	51.9	2.2	6.5	8.7	16.60	0.524	0.723
40	217	216.7	216.1	58.9	56.8	30	9.9	3.5	13.4	18.22	0.735	199	199	198.9	61	61.3	62.2	3.8	9.1	12.9	21.19	0.609	0.828
45	216.1	215.4	213.8	84	80.4	36.9	14.6	4.3	18.9	25.00	0.756	210.2	210.1	209.9	73.4	73.6	74.3	5.9	12.6	18.5	26.84	0.689	0.912
50	215.8	214.2	212	113.4	108.9	46.2	20.3	5.5	25.8	33.17	0.778	219.7	219.6	219.7	88.5	88.7	89.2	8.5	16.9	25.4	33.79	0.752	0.967
55	215.2	212.8	208.5	153.8	148.7	59.1	28	6.5	34.5	44.29	0.779	223.8	224.5	224.7	113.2	112.8	113.4	11.8	22.6	34.4	43.96	0.783	1.005

Apertura Válvula 30°

LINEA											MOTOR												
f [Hz]	V ₁₂ [V]	V ₂₃ [V]	V ₃₁ [V]	i ₁ [A]	i ₂ [A]	i ₃ [A]	P ₁₂ [kW]	P ₂₃ [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	V _{UV} [V]	V _{WV} [V]	V _{WU} [V]	i _u [A]	i _v [A]	i _w [A]	P _{UV} [kW]	P _{WV} [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	η _{INV}
25	216	216.5	216	13.3	14.4	13.8	1.5	1	2.5	5.18	0.483	161.8	161.8	162	36.3	38.4	37.5	0	2.9	2.9	10.49	0.277	0.573
30	219	217.9	217.4	19.6	20.2	16.5	2.6	1.6	4.2	4.95	0.848	175.4	175.2	175.4	38.2	39.2	39.6	0.1	3.6	3.7	11.84	0.312	0.388
35	217.6	218	217.1	28.1	27.7	19.1	4.1	2.4	6.5	9.41	0.691	188.3	188.8	188.5	40.9	41.8	42.4	0.8	4.7	5.5	13.62	0.404	0.585
45	216.9	216.9	217.9	56.8	54.2	29.3	9.3	3.7	13	17.60	0.739	211.3	211.2	211.4	54.2	54.3	54.8	3.1	8.8	11.9	19.92	0.597	0.809
55	216.1	214.3	213	101.8	97.5	42.9	17.9	5	22.9	29.99	0.764	228.6	228.1	227.3	74.3	74.7	74.8	7.3	15.1	22.4	29.46	0.760	0.996

Tab. 5.2. Variables eléctricas para la primera prueba.

Con los datos obtenidos se construyó la siguiente gráfica en la que se presentan las curvas del sistema para distintas aperturas de la válvula, gráfica 5.1.



Graf. 5.1. Curva del sistema para diferentes grados de estrangulación de la válvula FC-153, prueba 1.

Como se puede observar en la gráfica anterior, el sistema responde diferente al modificar el grado de apertura de la válvula; un dato importante es, que conforme más se abre la válvula, el sistema varía menos. Se puede notar que entre la apertura a 90° (válvula totalmente abierta) y 50° las curvas están muy cerca, pero al cerrar más la válvula el cambio es muy abrupto, que corresponde con el comportamiento clásico del tipo de válvula usada.



Graf. 5.2. Curva de comportamiento para una válvula de mariposa.

Cabe mencionar que en todas las curvas, para gasto nulo ya existe presión, esto se debe a la carga estática establecida por el nivel del agua en el tanque (presa), que está por encima de la bomba.

Debido a que no se encontraron variaciones notables en las curvas del sistema con la apertura de la válvula de 90° y 50°, y sí entre las aperturas de 30° y 40°, se realizó una incisión en la placa guía de la válvula de mariposa, para poder colocarla a una apertura de 35°.

En la segunda prueba se hicieron mediciones a 90°, 40°, 35° y 30° de apertura de la válvula, cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla (Tab. 5.3). Las variables hidráulicas medidas fueron en los mismos puntos que en los de la primera prueba.

PRUEBAS EN EL MODELO EXPERIMENTAL DE FLUJO MULTIFÁSICO DEL "IMP"
Inclinación de la tubería = 0°

Apertura Válvula 90°																					
f [Hz]	N [rpm]	Δh [cmHg]	Oultra [l/s]	Pdesc		Pplaca		Ptang		Pin		Pinter		Pout							
				Lectura [kg/cm²]	Ajuste [mca]																
10	598.1	3.5	5.6	9	0.5	3.01	5	0.3	3.65	4	0.3	3.25	3	0.2	2.01	2.25	0.16	1.95	2.25	0.16	2.69
15	895.6	11	11.1	11	0.8	5.54	9	0.6	6.56	6	0.4	4.48	5	0.35	3.48	3.75	0.27	3.07	3.25	0.23	3.39
20	1191	23	16.8	16	1.15	9.01	13	0.9	9.46	8.5	0.6	6.41	6.5	0.49	4.67	5.25	0.38	4.15	4.25	0.3	4.08
25	1487	38	19.9	23	1.6	13.44	13	1.3	13.58	11.5	0.8	8.51	9	0.7	6.68	7.5	0.52	5.64	6	0.42	5.29
30	1779	55	24	30	2.1	18.59	26	1.8	18.54	15.5	1.1	11.49	12	0.85	8.51	10.5	0.72	7.69	8	0.58	6.78
35	2070	75	27.9	40	2.8	25.54	34	2.4	24.35	20	1.4	14.66	16	1.15	11.46	13.5	0.94	9.85	11	0.75	8.66
40	2361	99	32.4	50	3.5	32.49	44	3	30.07	25.5	1.8	18.69	20	1.4	14.15	17	1.2	12.38	13	0.92	10.20
45	2652	127	36.7	63	4.8	43.45	55	3.8	38.74	32	2.25	23.34	25	1.75	17.71	21	1.48	15.19	16.25	1.18	12.62
50	2943	155	41.1	77	6.1	54.41	66	5.1	49.03	40	3	30.07	32	2.25	23.34	25	1.75	17.71	21	1.48	15.19
55	3234	183	45.4	91	7.4	65.37	77	6.4	60.99	47	3.6	34.93	39	2.7	26.26	31	2.0	18.66	18.25	1.42	16.12

Apertura Válvula 40°																					
f [Hz]	N [rpm]	Δh [cmHg]	Oultra [l/s]	Pdesc		Pplaca		Ptang		Pin		Pinter		Pout							
				Lectura [kg/cm²]	Ajuste [mca]																
10	599.2	2.2	4.6	8	0.45	2.76	3	0.3	2.95	4	0.275	3.12	3	0.2	2.01	2.1	0.16	1.94	2.1	0.16	2.64
15	895.9	8	9.5	12	0.8	5.89	7.5	0.5	6.53	5.1	0.4	4.16	4	0.3	2.87	3.5	0.23	2.78	3	0.2	3.15
20	1192	17	13.5	17	1.4	10.60	10	0.7	7.41	7	0.5	5.35	6	0.4	4.09	4.75	0.33	3.72	4	0.28	3.90
25	1489	27	17.4	24	1.7	14.52	15	1	10.67	10	0.7	7.46	8	0.55	5.56	6.25	0.45	4.85	5	0.35	4.59
30	1783	41	21.6	32	2.5	21.27	20	1.4	14.43	12	0.85	8.95	9	0.6	6.17	8	0.55	6.01	6.1	0.44	5.42
35	2075	56	25.1	43	3	27.57	26	1.6	17.54	15.1	1.1	11.35	12	0.85	8.51	10	0.7	7.42	8	0.56	6.68
40	2365	72	28.4	54	3.8	35.37	32	2.4	23.66	20	1.4	14.66	15	1.05	10.60	12.75	0.9	9.38	10	0.7	8.07
45	2657	90	31.8	67	4.7	44.35	40	2.6	27.46	23	1.6	16.76	18	1.25	12.68	15.25	1.04	10.97	12	0.84	9.46
50	2948	108	35.2	80	5.6	53.33	47	3.6	34.93	27	1.9	19.74	21	1.5	15.02	18	1.23	12.88	14	0.98	10.85
55	3239	126	38.6	93	6.5	62.30	54	4.5	43.90	34	2.25	23.34	27	1.75	17.71	21	1.48	15.19	16.25	1.18	12.62

Apertura Válvula 35°																					
f [Hz]	N [rpm]	Δh [cmHg]	Oultra [l/s]	Pdesc		Pplaca		Ptang		Pin		Pinter		Pout							
				Lectura [kg/cm²]	Ajuste [mca]																
10	598.4	1.8	3.9	7.5	0.5	2.83	3	0.3	2.95	3.5	0.25	2.81	2.5	0.2	1.83	2	0.15	1.85	2	0.15	2.56
15	896.3	6	8.3	11	0.8	5.54	5	0.5	4.65	5	0.35	3.86	4	0.3	2.87	3	0.22	2.56	2.5	0.19	2.93
20	1192	13	11.9	18	1.25	10.20	10	0.7	7.41	6.5	0.45	4.92	5	0.35	3.48	4	0.28	3.21	3.5	0.24	3.52
25	1489	21	15.1	25	1.75	15.12	11	0.9	8.76	8.5	0.6	6.41	6.5	0.45	4.52	5.5	0.38	4.24	4.5	0.32	4.27
30	1782	31	18.3	32	2.4	20.77	16	1.2	12.02	10	0.7	7.46	8	0.55	5.56	6.75	0.48	5.17	5.75	0.4	5.10
35	2086	42	21.8	44	3.2	28.91	20	1.4	14.43	12.5	0.85	9.13	10	0.7	7.04	8	0.56	6.01	6.25	0.44	5.47
40	2389	53.5	24.6	56	3.9	36.56	25	1.75	17.94	15	1.05	11.06	12	0.8	8.26	9.75	0.68	7.23	6.75	0.5	5.94
45	2693	65	27.1	70	4.9	46.38	30	2.1	15.95	17.5	1.25	12.98	14	1	9.99	11.5	0.8	8.45	9	0.62	7.32
50	2997	77.5	29.4	82	5.8	55.02	35	2.4	24.70	20	1.4	14.66	16	1.1	11.21	13.5	0.94	9.85	10.5	0.74	8.44
55	3243	87	31.2	100	7	67.23	36	2.5	25.56	23	1.6	16.76	17.5	1.25	12.50	15	1.03	10.83	11.5	0.8	9.08

Apertura Válvula 30°																					
f [Hz]	N [rpm]	Δh [cmHg]	Oultra [l/s]	Pdesc		Pplaca		Ptang		Pin		Pinter		Pout							
				Lectura [kg/cm²]	Ajuste [mca]																
10	598	1.3	2.9	7.5	0.5	2.93	5	0.4	4.15	3.5	0.25	2.91	2.5	0.2	1.83	2	0.15	1.85	2	0.14	2.51
15	898.3	4	6.4	12	0.85	6.13	5	0.4	4.15	4.5	0.3	3.43	3	0.22	2.11	2.75	0.2	2.37	2.5	0.18	2.88
20	1194	8	9.4	18	1.5	11.44	7.5	0.5	5.53	5.5	0.4	4.30	4	0.3	2.87	3.5	0.24	2.83	3	0.2	3.15
25	1489	13	12	25	1.8	15.71	10	0.7	7.41	6.5	0.45	4.92	5	0.35	3.48	4.25	0.3	3.40	3.5	0.24	3.52
30	1784	18.5	14.3	35	2.5	22.31	12	0.85	8.86	8	0.55	5.97	6	0.42	4.19	5	0.35	3.91	4.1	0.3	4.03
35	2078	24	16.4	45	3.2	29.26	14	1	10.32	9	0.62	6.69	7	0.5	4.95	6	0.42	4.81	5	0.35	4.59
40	2371	30.5	18.2	57	4	37.40	15	1.1	11.17	10	0.7	7.46	8	0.55	5.72	6.75	0.48	5.17	5.75	0.4	5.10
45	2663	36	20.1	71	5	47.23	18	1.25	12.97	11	0.8	8.33	8.5	0.6	6.00	7	0.5	5.36	5.75	0.4	5.10
50	2955	41	21.7	86	6	57.40	20	1.4	14.43	12	0.9	8.16	9.75	0.68	6.95	8	0.56	6.01	6.25	0.44	5.47
55	3247	45	22.8	103	7.5	70.75	21	1.5	15.28	13	0.9	8.97	10	0.7	7.04	8.5	0.6	6.39	6.75	0.48	5.73

Tab. 5.3. Variables hidráulicas para la segunda prueba.

Las mediciones de las variables eléctricas se realizaron de la misma forma que en la primera prueba.

VARIABLES ELÉCTRICAS

Apertura Válvula 90°																								
LINEA										MOTOR														
f [Hz]	V ₁₂ [V]	V ₂₃ [V]	V ₃₁ [V]	I ₁ [A]	I ₂ [A]	I ₃ [A]	P ₁₂ [kW]	P ₂₃ [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	V _{UV} [V]	V _{VW} [V]	V _{WU} [V]	I _u [A]	I _v [A]	I _w [A]	P _{UV} [kW]	P _{VW} [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	η _{UV}	
10	220.1	221.5	219.9	5.8	6.6	13.9	0.6	0.4	0.8	3.36	0.239	106.7	106.7	106.5	37.8	44.6	45.4	0.5	0.4	0.3	7.67	0.114	0.479	
15	219.7	221	220.2	8.4	8.3	14.8	0.7	0.7	1.4	4.01	0.349	127.8	127.8	127.8	38.5	43.5	42.2	0.5	1.1	1.6	9.16	0.175	0.500	
20	221.2	221.9	221.3	13.1	12.6	16.5	1.4	1.1	2.5	5.27	0.475	145.8	145.9	146	39	44.3	44.2	0.1	2	2.1	10.74	0.196	0.412	
25	219.1	219.9	219.9	22.3	20	20.4	3.1	1.9	5	7.95	0.629	161.4	161.4	161.4	46.2	51.2	51.3	0.9	3.1	4	13.86	0.289	0.459	
30	219.6	219.7	219.2	34.1	31.1	24.7	5.1	2.6	7.7	11.39	0.676	174.4	174.4	174.4	53.6	56.3	56.6	1.3	5.1	6.4	16.76	0.382	0.665	
35	218.5	218.7	218.7	53.4	49.9	29.1	7.5	2.6	10.1	16.71	0.604	187.1	187	186.9	62.6	63.8	64.2	3.9	9.1	13	20.58	0.632	1.045	
40	217.7	217.3	216.4	75.3	72.4	38.3	12.9	4.1	17	23.44	0.725	198.3	198.3	198.3	75.7	77	77.8	5.1	11.3	16.4	26.60	0.819	0.853	
45	217.6	215.9	214.2	106.8	102.2	45.3	19	5.3	24.3	31.70	0.674	208.7	208.5	208.7	93.4	93.3	93.2	7.9	15.8	23.7	33.72	0.703	0.917	
50									0											0				

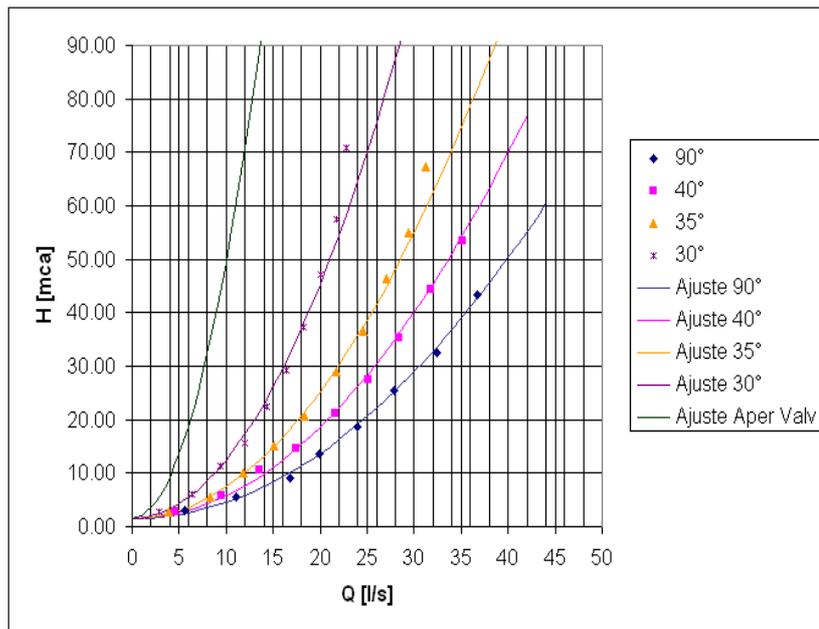
Apertura Válvula 40°																							
LINEA										MOTOR													
f [Hz]	V ₁₂ [V]	V ₂₃ [V]	V ₃₁ [V]	I ₁ [A]	I ₂ [A]	I ₃ [A]	P ₁₂ [kW]	P ₂₃ [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	V _{UV} [V]	V _{VW} [V]	V _{WU} [V]	I _u [A]	I _v [A]	I _w [A]	P _{UV} [kW]	P _{VW} [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	η _{UV}
10	220.4	221.7	220.5	5.5	6.3	11.2	0.4	0.4	0.8	2.93	0.273	106.4	106	106.4	37.5	42.2	42.2	0.4	0.6	1	7.48	0.134	0.490
15	219.7	220.8	219.9	8.2	9	14.1	0.6	0.5	1.1	3.85	0.286	127.7	127.8	127.8	40	43.4	44.1	0.3	1.3	1.5	9.41	0.170	0.596
20	220.8	221.9	220.8	12.4	12.3	14.4	1.3	1	2.3	4.89	0.461	145.9	145.7	145.6	39.2	43.3	44.2	0.1	2	2.1	10.66	0.197	0.423
25	219.3	220.3	219.3	19.7	18.8	18.2	2.7	1.6	4.3	7.19	0.598	160.8	160.9	161	43.3	46.4	44.9	0.2	3.1	3.3	12.50	0.264	0.441
30	220	220	219.4	32.9	31	23.5	4.8	2.3	7.1	11.09	0.640	174.6	174.8	174.8	52.6	56.6	56.2	1.2	5.1	6.3	16.69	0.378	0.590
35	219	218.4	217.5	49.5	46.2	27.4	7.9	3.1	11	16.51	0.703	187	187	186.9	59.9	60.9	63.1	2.6	7.2	9.8	19.86	0.494	0.696
40	219.6	218.8	217.4	73.3	69.1	34.7	12.2	4	16.2	22.35	0.725	198.7	198.9	199.1	72.7	72.9	73.9	4.6	10.4	15	26.21	0.695	0.821
45	219	217.4	215.5	103	98.2	42.6	17.9	4.9	22.8	30.59	0.745	210.1	209.5	209.9	87.1	86.7	87.5	7.1	14.6	21.7	31.66	0.895	0.920
50	217.9	215.4	212.6	136.5	131.6	53.2	24.8	6.2	31	40.19	0.771	219.2	218.8	218.8	106.8	105.6	105.6	10.1	19.9	30	40.47	0.741	0.961

Apertura Válvula 35°																							
LINEA										MOTOR													
f [Hz]	V ₁₂ [V]	V ₂₃ [V]	V ₃₁ [V]	I ₁ [A]	I ₂ [A]	I ₃ [A]	P ₁₂ [kW]	P ₂₃ [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	V _{UV} [V]	V _{VW} [V]	V _{WU} [V]	I _u [A]	I _v [A]	I _w [A]	P _{UV} [kW]	P _{VW} [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	η _{UV}
10	220.5	222	221	4.7	4.5	7.9	0.5	0.5	1	2.18	0.458	106.7	106.7	106.7	35.6	36.5	35.2	0.7	0.4	1.1	5.73	0.163	0.357
15	221.3	222.5	220.1	7.6	7.7	12.1	0.9	0.7	1.6	3.60	0.457	128.2	128.4	128.5	37.8	41.9	42.1	0.7	1.1	1.8	9.03	0.199	0.436
20	221.1	222.1	221.4	11.4	11.3	11.3	1.3	1	2.3	4.39	0.524	146.3	146.3	146.1	36	38.2	38.3	0.2	2.2	2.4	9.50	0.253	0.482
25	220.8	221.5	220.8	18.5	18.2	14.4	2.4	1.5	3.9	6.52	0.589	161.7	161.7	161.7	39.7	42	42	0.3	3.4	3.7	11.55	0.320	0.536
30	220.4	221.3	220.8	29.9	27.7	21.8	4.3	2.3	6.6	10.12	0.652	174.5	175.5	175.3	49.1	52	51.5	1.2	4.9	6.1	15.45	0.395	0.605
35	221	220.8	220.1	46.2	43.3	27.8	7.2	2.9	10.1	14.94	0.676	188.1	187.9	188.1	57.2	61.2	60.3	2.5	6.8	9.3	19.40	0.479	0.709
40	220.4	220.1	219.9	66.4	52.1	34.5	11.2	3.8	15	20.88	0.725	199.7	199.6	199.6	63.1	70.3	70.1	4.2	10.2	14.4	24.15	0.596	0.822
45	220.6	219.2	217.2	95.2	89.4	40.4	16.6	4.7	21.3	28.45	0.749	210.7	210.6	210.8	82.8	83.1	83.5	6.4	13.7	20	30.34	0.663	0.885
50	220.5	217.6	215.5	126.3	118.1	51.2	22.8	5.9	26.7	37.06	0.774	220.6	220.6	221	99.5	99.5	100	9.4	18.6	28	38.10	0.735	0.949
55	217.2	214.3	210.9	168.6	158.1	64.3	31.4	7.3	38.7	48.34	0.801	225.5	226	226	124.4	124.1	124.4	12.8	26	37.8	48.62	0.777	0.971

Apertura Válvula 30°																							
LINEA										MOTOR													
f [Hz]	V ₁₂ [V]	V ₂₃ [V]	V ₃₁ [V]	I ₁ [A]	I ₂ [A]	I ₃ [A]	P ₁₂ [kW]	P ₂₃ [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	V _{UV} [V]	V _{VW} [V]	V _{WU} [V]	I _u [A]	I _v [A]	I _w [A]	P _{UV} [kW]	P _{VW} [kW]	P _{TOTAL} [kW]	S _{TOTAL} [kVA]	F.P.	η _{UV}
10	222.7	224.7	223.3	5.9	6.5	12.7	0.5	0.6	1.1	3.24	0.340	106.9	106.9	106.9	41.4	45.3	45.4	0.6	0.4	1	8.15	0.123	0.361
15	222.6	224.8	223	7.1	7.2	12.9	0.6	0.7	1.2	3.61	0.342	129.3	129.1	128.9	39.9	44	43.3	0.5	1.3	1.8	9.48	0.190	0.555
20	223.1	224.4	223.2	10.4	9.9	13.8	1.3	1.1	2.4	4.40	0.545	146.4	146.5	146.6	40.2	43.2	46.2	0.4	1.9	2.3	10.96	0.210	0.385
25	223.1	224	222.7	16.5	15.2	16.9	2.4	1.8	4.2	6.26	0.670	162.8	163	163.1	43.8	46.8	46.1	0	3.2	3.2	12.86	0.249	0.371
30	223.4	223.3	222.4	25.4	24.2	21.3	4	2.4	6.4	9.13	0.701	176.7	176.6	176.5	47.1	48.1	50.8	0.7	4.2	4.9	14.89	0.329	0.470
35	222.5	223.1	222	39.2	36.1	27.2	6.3	2.9	9.2	13.17	0.699	189.2	189.2	189.1	54.1	55.3	55.8	2	6.6	8.6	18.04	0.477	0.682
40	222	222.2	221.4	57.3	53.5	31.8	9.9	3.9	13.8	18.27	0.755	200.9	200.9	200.9	63.1	63.5	67	3.3	9.2	12.6	22.46	0.657	0.737
45	221.5	220.1	219	79.9	74.5	38.6	13.8	4.3	18.1	24.54	0.738	211.6	211.7	212	74.1	74.8	75.6	5.7	12.5	18.2	27.45	0.683	0.859
50	223.3	221.5	219	107.4	103.3	44.8	19	5.1	24.1	32.64	0.738	223	222.8	222.9	86.2	86.5	87	8.2	16.6	24.8	33.42	0.742	1.005
55	222.2	219.4	216.1	144	134.6	55.1	25.8	6.6	32.3	42.24	0.765	230.6	230.8	230.8	103.4	103	103.6	11.2	21.4	32.6	41.30	0.789	1.032

Tab. 5.4. Variables eléctricas para la segunda prueba.

A continuación se presenta la curva del sistema obtenida a partir de los datos de la prueba número dos.



Graf. 5.3. Curva del sistema para diferentes grados de estrangulación de la válvula FC-153, prueba 2.

Con esta prueba se pudo hacer un barrido más amplio por todo el espectro de comportamiento del sistema.

5.1.2. OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DEL SISTEMA PARA DISTINTAS INCLINACIONES DE LA TUBERÍA EXPERIMENTAL

El objetivo de esta prueba fue obtener las curvas del sistema a diferentes inclinaciones de la estructura experimental manteniendo fija la posición de la válvula FCV153. Al igual que en la prueba anterior, las condiciones del flujo, se establecieron variando la velocidad de giro de la bomba para un intervalo de la frecuencia del voltaje de alimentación al motor de 10 a 55 Hz.

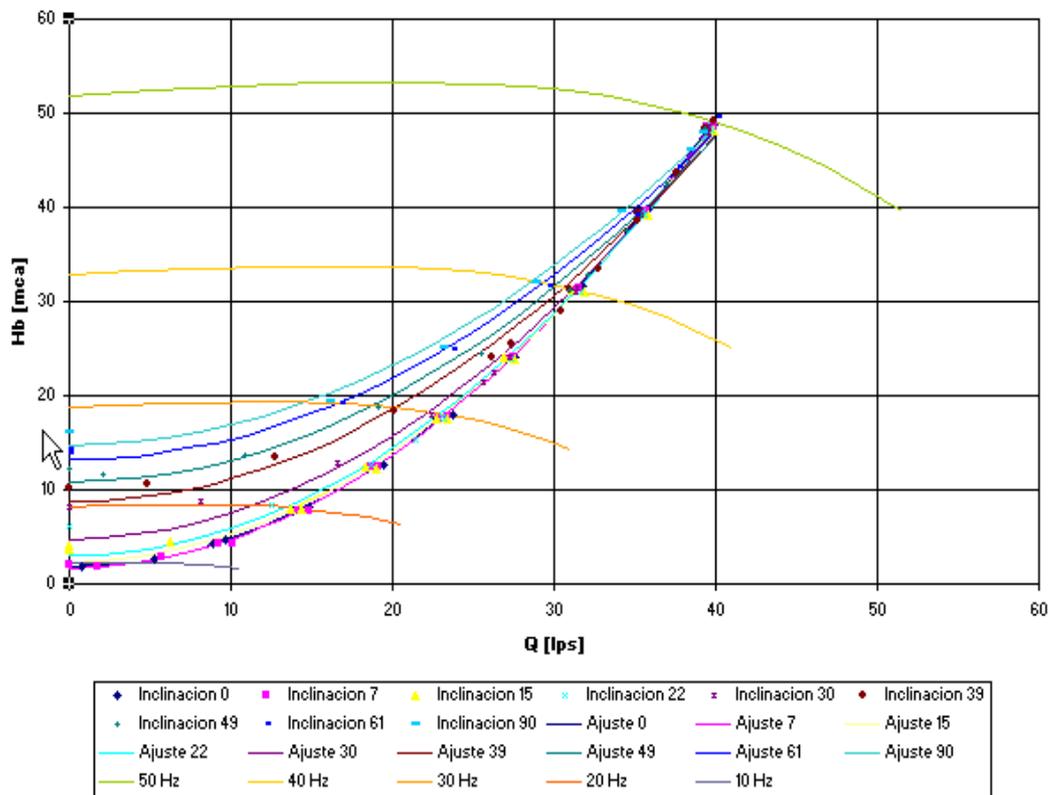
En esta prueba se utilizó por primera vez el sistema de adquisición de datos, por lo que fue necesario instalar los sensores en los puntos de medición, previo proceso de calibración de cada uno de ellos.



Fig. 5.3. Inclinación de la estructura experimental.

Datos de las Pruebas													Sensor
Frecuencia	ST-101	ST-101	Δh	Gasto	P desc	P placa	P tanque	P entrada	P retorno	P salida		inclinacion	
Bomba [Hz]	[Hz]	[RPM]	(FT-105) [mca]	(FT-105) [l/s]	(FT-101) [mca]	(FT-104) [mca]	(FT-301) [mca]	(PT-404) [mca]	(PT-405A) [mca]	(PT-402B) [mca]		(FT-412) [°]	
15	15.053	921.002	1.131	9.626	5.482	6.007	3.534	3.125	2.9	3.223	0	0	
20	20.035	1208.07	2.699	14.045	8.903	9.206	5.021	4.509	4.038	4.082	0	0	
25	25.038	1491.904	4.65	19.466	13.392	13.36	6.941	6.209	5.543	5.197	0	0	
30	29.977	1783.231	6.334	23.759	18.738	18.311	9.234	8.419	7.337	6.553	0	0	
35	34.95	2069.414	9.338	27.562	24.95	24.057	11.689	10.893	9.424	8.144	0	0	
40	39.981	2361.234	12.399	31.749	32.334	30.87	14.962	13.778	11.877	10.015	0	0	
45	44.966	2648.62	15.796	36.828	40.52	38.333	18.301	16.903	14.529	12.047	0	0	
50	49.952	2937.307	19.557	39.859	49.492	46.605	21.967	20.341	17.473	14.308	0	0	
50	49.959	2937.684	19.171	39.454	48.337	46.421	21.759	20.196	17.304	14.159	0	0	
45	44.932	2647.246	15.351	35.332	40.271	38.107	18.081	16.721	14.343	11.891	0	0	
40	39.956	2359.706	12	31.235	32.09	30.634	14.759	13.614	11.7	9.871	0	0	
35	34.955	2070.656	8.991	27.045	24.734	23.928	11.747	10.796	9.317	8.050	0	0	
30	30.016	1786.512	6.374	22.782	18.431	18.096	9.102	8.338	7.244	6.495	0	0	
25	25.06	1499.181	4.172	18.442	13.061	13.189	6.841	6.253	5.486	5.171	0	0	
20	20.046	1209.505	2.343	13.853	8.584	8.584	4.546	4.492	4	4.069	0	0	
15	15.095	923.478	0.956	8.953	5.156	5.877	3.477	3.115	2.862	3.235	0	0	
12	12.078	749.16	0.335	5.23	3.486	4.384	2.791	2.474	2.335	2.954	0	0	
10	10.062	632.651	0.04	0.76	2.657	3.607	2.382	2.085	2.015	2.62	0	0	
15	15.087	923.01	1.245	10.098	5.19	5.896	3.537	3.118	0.652	3.053	7	7	
20	20.054	1209.955	2.705	14.861	8.62	9.08	5.014	4.5	1.796	3.898	7	7	
25	24.995	1495.431	4.484	19.118	13.163	13.23	6.918	6.281	3.304	5.018	7	7	
30	29.99	1783.971	6.71	23.373	18.455	18.181	9.21	8.403	5.088	6.353	7	7	
35	34.941	2070.048	9.247	27.427	24.863	24.013	11.86	10.865	7.193	7.936	7	7	
40	39.959	2359.915	12.247	31.555	32.143	31.143	14.825	13.636	9.52	11.247	7	7	
45	44.969	2648.757	15.706	35.726	40.29	38.218	18.278	16.827	12.244	11.77	7	7	
50	49.947	2936.972	19.538	39.84	49.301	46.516	21.957	20.304	15.208	14.036	7	7	
50	50.017	2941.022	19.199	39.493	49.303	46.425	21.784	20.174	15.282	13.921	7	7	
45	44.99	2650.604	15.416	35.396	40.165	38.087	18.1	16.726	12.326	11.653	7	7	
40	39.988	2361.625	12.028	31.212	32.084	30.886	14.792	13.62	9.892	9.255	7	7	
35	34.988	2073.304	9.031	27.106	24.728	23.955	11.769	10.812	7.309	7.827	7	7	
30	30.031	1786.384	6.445	22.909	18.419	18.15	9.134	8.369	5.252	6.265	7	7	
25	25.034	1497.69	4.277	18.673	13.147	13.232	6.868	6.274	3.494	4.939	7	7	
20	20.038	1209.039	2.447	14.136	8.659	9.104	4.959	4.512	2.016	3.836	7	7	
15	15.089	923.043	1.049	9.265	5.173	5.924	3.453	3.145	0.877	2.959	7	7	
12	12.097	749.679	0.398	5.722	3.629	4.429	2.801	2.501	0.352	2.624	7	7	
10	10.046	631.731	0.043	1.769	2.682	3.555	2.389	2.111	0.033	2.391	7	7	
20	20.037	1208.952	2.548	14.425	8.69	9.054	4.96	4.452	0.376	3.57	15	15	
25	25.019	1495.802	4.42	18.981	13.054	13.204	6.899	6.258	1.101	4.709	15	15	
30	29.983	1783.6	6.701	23.357	18.334	18.078	9.162	8.328	2.832	6.01	15	15	
35	34.942	2070.094	9.346	27.573	24.601	23.869	11.79	10.776	4.886	7.56	15	15	
40	39.99	2361.733	12.457	31.824	31.89	30.556	14.814	13.575	7.264	9.352	15	15	
45	44.943	2647.995	15.816	35.851	40.028	37.961	18.132	16.674	9.91	11.359	15	15	
50	49.943	2935.357	19.433	39.873	49.879	46.142	21.765	20.086	12.8	13.562	15	15	
50	50.034	2942.001	19.004	39.292	49.123	46.328	21.763	20.162	12.808	13.639	15	15	
45	44.965	2650.298	15.269	35.226	40.109	38.038	18.091	16.713	9.866	11.391	15	15	
40	40.015	2363.209	11.923	31.136	32.015	30.617	14.774	13.626	7.235	9.383	15	15	
35	35.001	2073.513	8.938	26.966	24.764	23.943	11.789	10.825	4.882	7.592	15	15	
30	30.02	1785.756	6.372	22.779	18.402	18.156	9.131	8.365	2.837	6.045	15	15	
25	25.016	1496.613	4.125	18.339	13.208	13.287	6.887	6.309	1.095	4.729	15	15	
20	20.047	1209.536	2.297	13.699	8.733	9.151	4.958	4.573	-0.393	3.625	15	15	
15	15.015	918.855	0.478	6.267	5.354	6.317	4.119	4.14	-0.536	2.892	15	15	
13	13.064	806.106	-0.392	0	4.465	5.412	4.288	-2.192	0.005	1.984	15	15	
28	28.024	1670.443	5.656	21.463	16.047	15.891	8.174	7.469	0.507	5.343	22	22	
30	29.972	1782.953	6.591	23.165	18.303	18.042	9.115	8.332	1.195	5.864	22	22	
35	34.93	2069.424	9.206	27.366	24.574	23.837	11.76	10.78	3.213	7.378	22	22	
40	39.952	2359.523	12.315	31.643	31.826	30.504	14.772	13.572	5.583	9.165	22	22	
45	44.954	2648.547	15.641	35.652	39.925	37.875	18.072	16.881	8.208	11.156	22	22	
50	49.919	2935.357	19.433	39.733	49.827	46.075	21.699	20.039	11.123	13.562	22	22	
50	49.995	2939.759	18.368	39.656	49.543	46.762	21.974	20.227	11.337	13.051	22	22	
45	44.974	2649.661	15.491	35.481	40.369	38.323	18.235	17.121	8.346	10.948	22	22	
40	39.932	2358.378	12.167	31.452	32.196	30.859	14.9	13.604	5.699	9.129	22	22	
35	34.913	2069.439	9.095	27.201	24.913	24.135	11.871	10.825	3.317	7.7	22	22	
30	30.027	1784.565	6.511	23.025	18.533	18.298	9.216	8.365	1.233	6.095	22	22	
25	24.941	1492.298	4.304	18.13	13.349	13.445	7.091	6.451	-0.306	4.731	22	22	
20	19.957	1204.334	1.913	12.506	9.161	9.792	6.079	5.618	-0.36	3.28	22	22	
15	15.075	922.278	0.109	2.748	5.718	6.702	5.72	30.326	0.118	1.454	22	22	
12	12.059	748.031	0.148	3.434	3.777	4.782	5.712	4.028	0.107	1.574	22	22	
10	10.006	629.425	0.159	3.449	2.769	3.718	5.703	4.034	0.091	1.788	22	22	
34	33.917	2010.86	8.493	26.288	23.254	22.555	11.157	10.261	0.602	6.845	30	30	
40	39.966	2360.375	12.092	31.354	31.818	30.451	14.752	13.61	3.436	8.953	30	30	
45	44.932	2647.239	15.449	35.433	39.857	37.826	18.086	16.891	6.053	10.942	30	30	
50	49.951	2937.219	19.234	39.526	49.789	46.966	21.674	20.02	9.95	11.445	30	30	
50	49.937	2936.399	19.22	39.514	49.257	46.511	21.948	20.227	9.214	10.191	30	30	
45	44.975	2649.733	15.436	35.418	40.254	38.201	18.261	17.121	6.264	8.33	30	30	
40	39.983	2361.352	12.114	31.364	32.119	30.753	14.921	13.817	3.609	6.656	30	30	
35	34.927	2069.244	9.084	27.2	24.827	24.025	11.861	10.827	1.201	5.007	30	30	
30	30.066	1785.653	6.857	25.606	22.189	21.596	10.785	9.757	0.971	4.497	30	30	
30	29.977	1783.236	6.159	22.396	18.693	18.516	9.708	8.814	-0.092	3.642	30	30	
25	25.051	1498.633	3.362	16.562	13.748	14.146	6.493	37.807	-0.202	2.072	30	30	
20	20	1206.821	0.813	8.164	9.504	10.392	7.463	-2.382	-0.183	1.166	30	30	
19	19	1149.09	0.07	2.226	8.761	9.828	7.817	39.648	0.663	0.179	30	30	
39	38.988	2303.873	11.394	30.438	29.679	29.243	14.193	13.085	1.139	8.447	39	39	
42	41.938	2474.281	13.18	32.733	34.203	33.492	16.11	14.867	2.667	9.583	39	39	
45	44.966	2648.621	15.186	35.131	39.266	37.888	18.123	16.74	4.266	10.83	39	39	
48	47.982	2823.469	17.351	37.647	44.511	42.836	20.27	18.74	5.975	12.13	39	39	
51	50.982	2996.799	19.538	39.839	49.884	47.792	22.455	20.782	7.745	13.485	39	39	
50	49.973	2938.519	19.064	39.354	49.15	46.396	21.905	38.753	7.257	10.057	39	39	
45	44.966	2649.231	15.194	35.14	40.067	38.101	18.219	17.033	4.327	8.053	39	39	
40	40.003	2362.495	11.833	31.018	31.971	30.674	14.884	-2.432	1.692	6.256	39	39	
35	35.006	2131.575	9.226	27.396	25.478	24.723	12.723	39.293	0.207	6.242	39	39	
30	34.921	2068.888	8.404	26.15	24.932	24.294	12.388	39.293	0.163	4.842	39	3	

De los datos de la tabla anterior se obtuvieron las curvas del sistema para distintas inclinaciones de la estructura experimental.



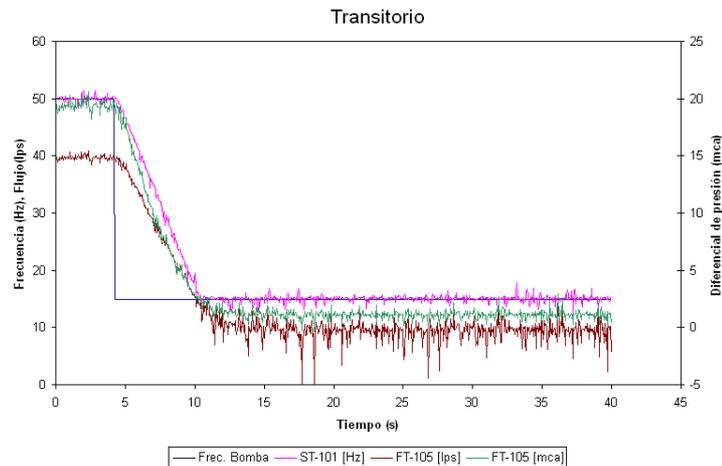
Graf. 5.4. Curva del sistema a diferentes inclinaciones.

Como se puede observar en la gráfica, a diferencia de la curva de la prueba anterior (Graf. 5.3), a gasto nulo, $Q=0$ la presión (H_b) es distinta en cada curva, esto se debe a que conforme aumenta la inclinación de la estructura experimental, aumenta la carga estática debida a que el punto más alto de la instalación está cada vez más arriba y por lo tanto la diferencia con el nivel del agua en el tanque (presa) es cada vez mayor.

5.2. TRANSITORIO HIDRÁULICO

Si el sistema dejara de bombear abruptamente, como en el caso de una interrupción en el suministro de la energía eléctrica, se puede presentar un transitorio hidráulico que podría ocasionar el colapso de la tubería. Para evitar este problema se colocó una válvula de admisión de aire en el extremo del retorno de la tubería, que es el punto que queda más alto cuando se trabaja con la tubería inclinada. Además, para que este fenómeno no se presente durante la operación normal de la instalación, en el inversor se programaron los parámetros de la rampa de aceleración y desaceleración para que las magnitudes máximas y mínimas de las variables hidráulicas, durante un cambio de régimen de operación, queden dentro de los intervalos de operación confiable del sistema.

Para comprobar que la tubería estaba fuera de riesgo para situaciones como la antes mencionada, se realizaron pruebas de transitorios, en la cual el se iba a iniciar el funcionamiento del sistema a una velocidad del inversor de 50Hz y en cierto momento se bajaría a 15Hz abruptamente. El resultado es el siguiente.



Graf. 5.5. Curva de un transitorio.

Se puede observar que la curva "Frec. Bomba", que es la señal analógica que manda la computadora para controlar el comando de velocidad en el inversor, cambia abruptamente, mientras que el gasto y la presión siguen la tendencia de la velocidad de giro del motor ST-101, que corresponde a la pendiente de desaceleración programada en el inversor. Con esto se comprueba que no se presentaron los problemas hidráulicos característicos en un transitorio.

5.3. COEFICIENTE DE FRICCIÓN

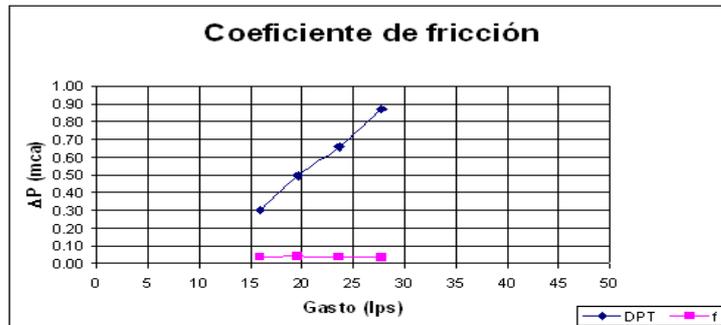
Un parámetro muy importante del sistema hidráulico es el coeficiente de fricción de la tubería experimental, que en este caso es una tubería de acrílico de 4" de diámetro. Para conocerlo se colocó un sensor de presión diferencial en la parte inferior del tubo, con una separación de 4m entre la toma de baja presión y la de alta. Con el sistema de medición se hicieron registros para diferentes gastos. Los datos obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

Q Agua (lps)	Longitud (m)	Diámetro (m)	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Viscosidad (m ² /s)	Reynolds (Re)	DPT (mca)	f
15.90	4	0.1007	0.00797	1.995	0.000001005	2.00E+05	0.30128	0.03739
19.61	4	0.1007	0.00797	2.460	0.000001005	2.47E+05	0.49599	0.04048
23.62	4	0.1007	0.00797	2.965	0.000001005	2.97E+05	0.65756	0.03697
27.72	4	0.1007	0.00797	3.478	0.000001005	3.49E+05	0.86956	0.03551

Tab. 5.6. Datos obtenidos para conocer el coeficiente de fricción (f).

En la tabla anterior los datos de gasto y diferencial de presión provienen del sistema de adquisición; la longitud, el diámetro y viscosidad son datos conocidos, mientras que el área, velocidad y número de Reynols se calculan. Con todos estos datos se puede calcular el coeficiente de fricción.

El coeficiente de fricción obtenido en la tabla 5.6 se presenta en la siguiente gráfica.

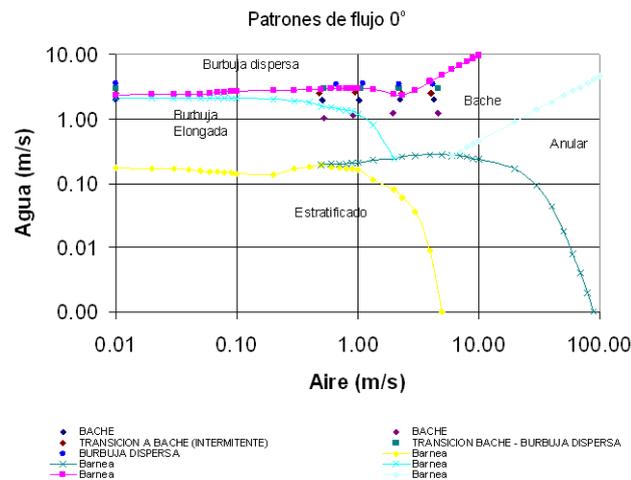


Graf. 5.6. Coeficiente de fricción.

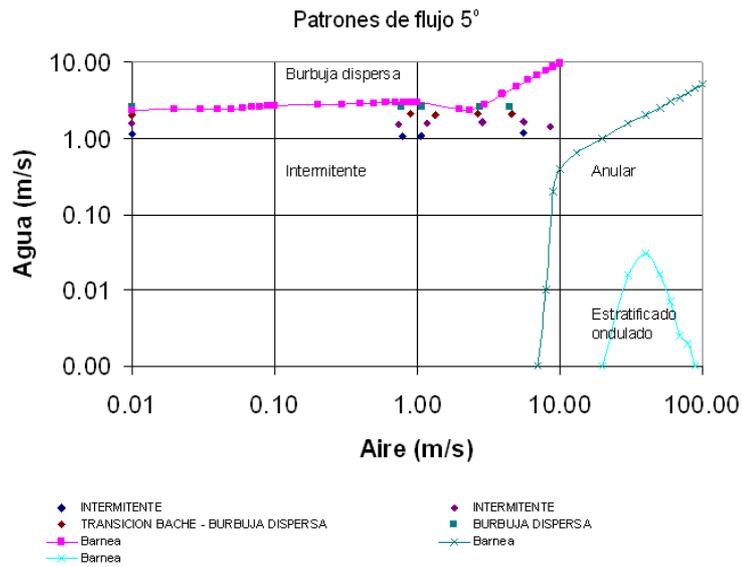
Como se puede ver, el coeficiente de fricción permanece constante aunque la diferencial de presión varíe, es decir aunque el gasto varíe, lo cual es correcto ya que el coeficiente de fricción es una característica que depende de las características físicas de la tubería, principalmente del material del que está hecho y de su proceso de construcción

5.4. PATRONES DE FLUJO

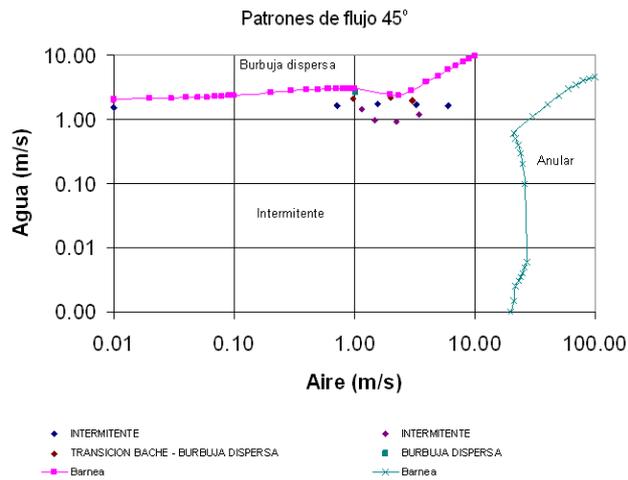
Para comprobar los patrones de flujo para flujos bifásicos agua-aire, encontrados en la literatura, que dependen de la velocidad del flujo de cada fase, se hicieron varios experimentos a diferentes inclinaciones de la tubería experimental para distintas proporciones de líquido-gas. Las comparaciones se hicieron con los datos reportados por Bornea de la Universidad de Houston, y los resultados son los siguientes.



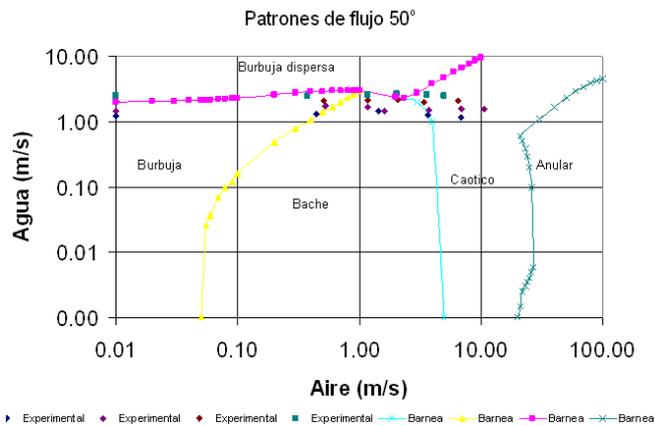
Graf. 5.7. Patrones de flujo a 0° de inclinación.



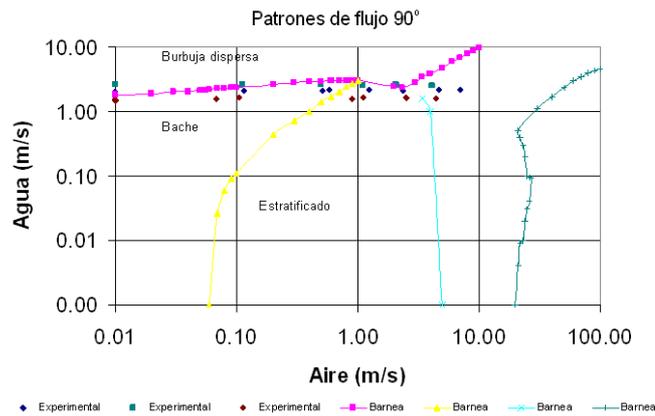
Graf. 5.8. Patrones de flujo a 5° de inclinación.



Graf. 5.9. Patrones de flujo a 45° de inclinación.



Graf. 5.10. Patrones de flujo a 50° de inclinación.



Graf. 5.11. Patrones de flujo a 90° de inclinación.

Como se puede ver en las diferentes gráficas, los resultados obtenidos a partir de los datos experimentales coinciden con los reportados, lo cual indica que la metodología de medición ha sido adecuada.

5.5. VELOCIDAD DE ARRASTRE DE SÓLIDOS

Por último se realizó una prueba para obtener la velocidad de arrastre de sólidos en la tubería. Para esto se fijaron diferentes velocidades de flujo del líquido a 1, 1.5, 2 y 2.5 m/s y se fue variando la velocidad del gas; para cada condición se obtuvieron las velocidades de arrastre de las partículas sólidas (canicas).

Para obtener las velocidades de arrastre de las partículas sólidas, se usó una cámara de alta velocidad que se montó sobre la estructura que soporta la tubería experimental en la sección de observación: En la tubería de acrílico se colocaron dos marcas con una distancia de 10cm entre sí que sirvieron como puntos de referencia. Con el video obtenido se determinó el tiempo en que la partícula sólida tardó en recorrer la distancia de 10cm y así se pudo calcular su velocidad.

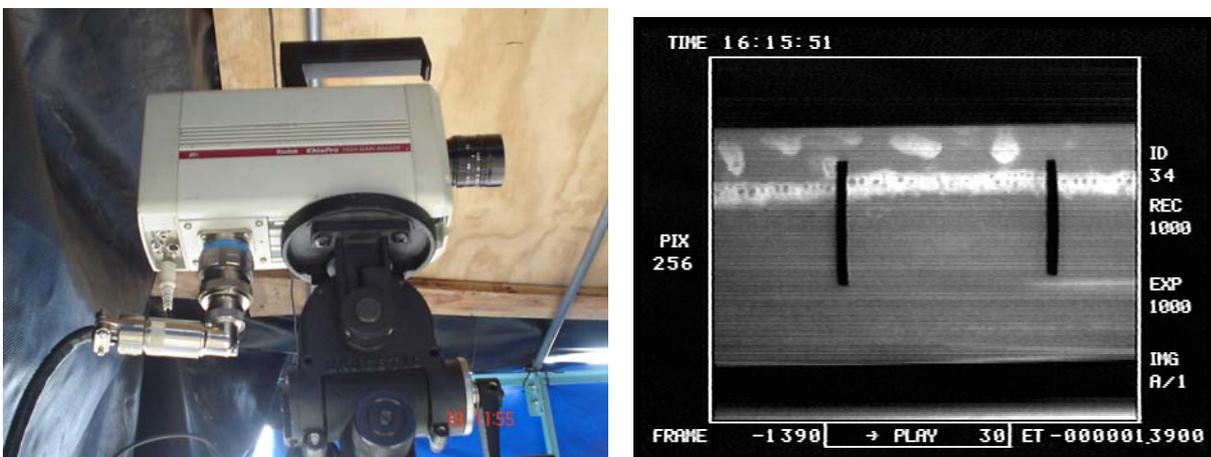
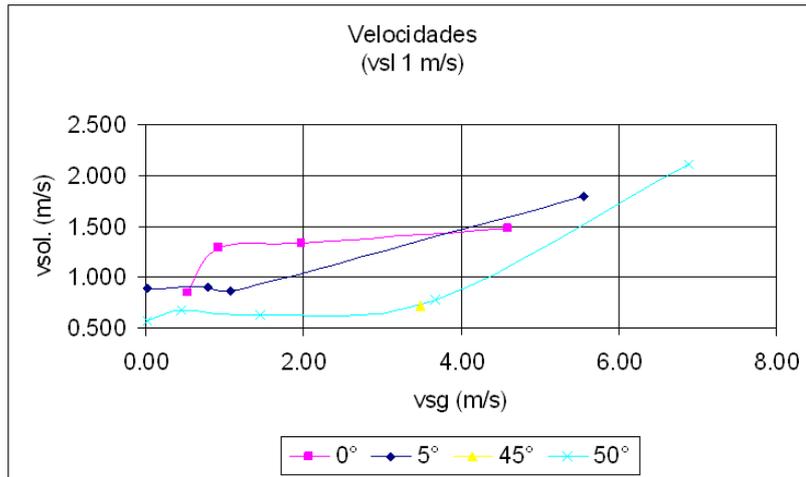
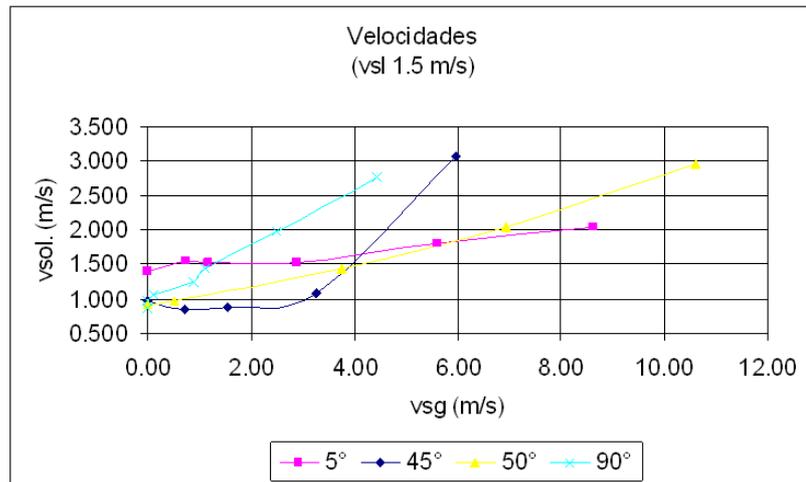


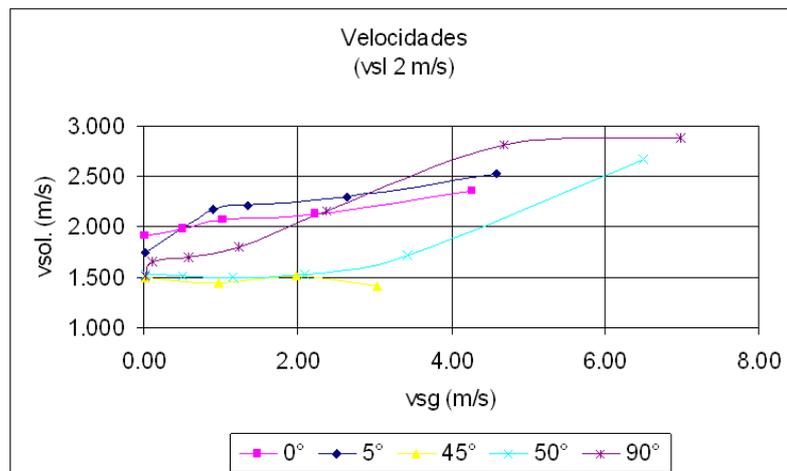
Fig. 5.4. Cámara de alta velocidad e Imagen de la cámara.



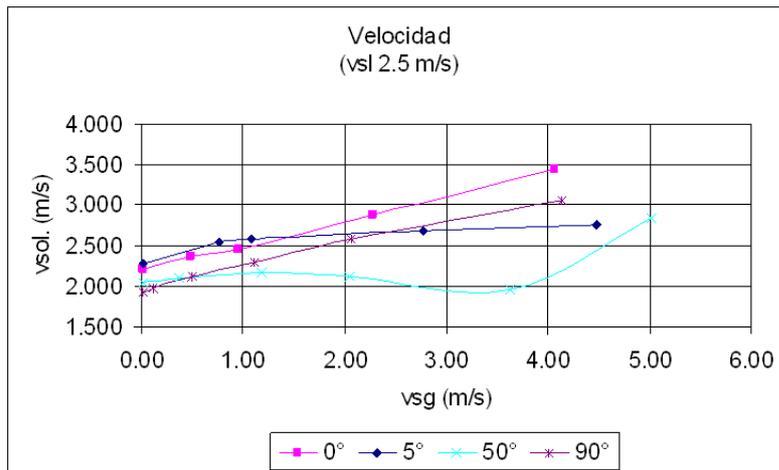
Graf. 5.12. Curvas de velocidades para una velocidad de líquido de 1m/s.



Graf. 5.13. Curvas de velocidades para una velocidad de líquido de 1.5m/s.



Graf. 5.14. Curvas de velocidades para una velocidad de líquido de 2m/s.



Graf. 5.15. Curvas de velocidades para una velocidad de líquido de 2.5m/s.

Observando las gráficas se puede notar que mientras mayor sea el ángulo de inclinación se necesita mayor cantidad de gas para mover las partículas de los sólidos; al inyectar más gas, la densidad del flujo trifásico disminuye, se dice entonces que la mezcla se aligera, lo que a su vez hace que sea más fácil mover las partículas de los sólidos, lo que se refleja en la velocidad del sólido dentro de la tubería.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES.

El uso de inversores para controlar la velocidad de giro de los motores de la bomba, malacates y dosificador de sólidos, permitieron dar gran flexibilidad de operación a los sistemas y poder con ello realizar experimentos bajo condiciones de operación que difícilmente se lograrían sin ellos, utilizando técnicas de control de flujo más rudimentarias como el estrangulamiento con válvulas.

Con las pruebas realizadas en la instalación experimenta y de transporte de recortes del IMP, descritas, se puede concluir que los trabajos hechos para la instrumentación de esta instalación fueron adecuados y han cubierto satisfactoriamente las necesidades de medición en ella.

Sin embargo, también se pudo observar la necesidad de mejorar algunas de las metodologías de medición de algunas de las variables. Tal es el caso de la medición de la variación del peso del tanque de almacenamiento de sólidos, con el que se quiere calcular la cantidad de sólidos inyectados a la mezcla con el dosificador. Como se describió, se utiliza una celda de carga de 2000 lbs, que se seleccionó para soportar el peso total del tanque más los sólidos en su interior, pero con ella no es posible medir variaciones de decenas de kilogramos, ya que no es lo suficientemente sensible a cambios del peso tan pequeños.

Durante la operación de la instalación, se notó que el flujo del gas es sumamente sensible a cualquier cambio en las condiciones de operación de la instalación e inclusive de las condiciones climáticas, por lo que se tiene la necesidad de usar técnicas de control en lazo cerrado para automatizar la sección de gas. Para ello es necesario buscar otras técnicas de medición del gasto de gas que sean menos sensibles a las variaciones mencionadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Measurement and instrumentation for control.
M. G. Mylroi and G. Calvert.
Ed. IEE. 1986.
- Instrumentación Industrial.
Antonio Creus Sole.
Ed. Publicaciones Marcombo. 1980.
- Mecánica de Fluidos.
Víctor L. Streeter y E. Benjamín Wylie.
Ed. Mc. Graw Hill. 1988.
- Mechanical Variables Measurement.
John G. Webster.
CRC Press. 2000.
- Instrumentación Industrial
Harold E. Soisson.
Ed. Limusa. 1988.
- Analysis instrumentation.
Fowler L, Harmon R, Roe D.
Instrument Society of America ISA.
Plenum Press New York. 1966.
- Instrumentation for Engineering Measurements
Dally J, Riley W, McConnel K.
John Wiley and Sons Inc. 1984.
- Instrumentation Fundamentals and Application.
Ralph Morrison
John Wiley and Sons Inc. 1986.
- Instrumentation for Engineers.
Turner J.D.
Macmillan Education.
- Instrumentation Reference Book.
Nolting K. B.
Butterworth Heinemann. 2000.

- Sensors and Signal Conditioning.
Pallas R, Webster J.
John Wiley and Sons Inc. 2000.
- Sensors, Transducers and LabView.
Paton Barry.
Prentice Hall. 2000.
- Termodinámica
Kenneth Wark, Jr.
McGraw Hill.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.		Página
Fig. 1.1	Diagrama de bloques del equipo experimental de flujo multifásico y de transporte de recortes del Instituto Mexicano del Petróleo.	1
Fig. 1.2	Esquema general (elevación y planta) del equipo experimental de flujo multifásico y de transporte de recortes del Instituto Mexicano del Petróleo.	2
Fig. 1.3	Equipo experimental de flujo multifásico y de transporte de recortes del Instituto Mexicano del Petróleo.	3
Fig. 1.4	Fotografía de la sección de fase líquida (agua) y gas (aire).	3
Fig. 1.5	Fotografía de la unidad móvil.	4
Fig. 1.6	Sección experimental.	5
Fig. 1.7	Separador de fases.	6
Fig. 1.8	Inclinación de la estructura.	6
Fig. 1.9	Ubicación de la Caseta.	7
Fig. 1.10	Interior de la Caseta.	7
Fig. 2.1	Formas de ver la medida de presión.	11
Fig. 2.2	Construcción de un strain gages.	11
Fig. 2.3	Conexión de un strain gages.	12
Fig. 2.4	Strain gages autocontenido.	12
Fig. 2.5	Arreglo manómetro-sensor para medir la presión de descarga de la bomba.	13
Fig. 2.6	Sensores para medir la pérdida de carga.	13
Fig. 2.7	Colocación de los sensores en la tubería.	14
Fig. 2.8	Sección de gas.	14
Fig. 2.9	Tanque de almacenamiento de los sólidos.	15
Fig. 2.10	Piezas diseñadas y herramienta para la colocación de los sensores en la tubería experimental.	15
Fig. 2.11	Perforación del tubo de acrílico.	16
Fig. 2.12	Realización de la ceja para montar el sensor.	16
Fig. 2.13	Colocación del sensor de presión en la tubería experimental.	17
Fig. 2.14	Piezas y corte de la colocación del sensor de presión en la tubería experimental.	17
Fig. 2.15	Tomas para el sensor de presión diferencial.	18
Fig. 2.16	Tipo de tomas para una placa de orificios.	19
Fig. 2.17	Tipo de perforaciones para una placa de orificios.	20

Fig. 2.18	Comportamiento de la presión aguas arriba y aguas abajo de la placa de orificios.	21
Fig. 2.19	Teorema de Bernoulli.	21
Fig. 2.20	Datos experimentales para la obtención del C_d .	23
Fig. 2.21	Condiciones de construcción para una placa de orificio.	25
Fig. 2.22	Colación de la placa de orificio.	28
Fig. 2.23	Placa de orificio y sensor de presión diferencial.	28
Fig. 2.24	Colocación de los medidores de gasto en la sección de gas.	32
Fig. 2.25	Colocación del sensor de presión diferencial en la sección de gas.	33
Fig. 2.26	Patigrama del LM35 y conexión del LM35.	33
Fig. 2.27	Patigrama del LM7805.	34
Fig. 2.28	Conexión del sensor de temperatura.	34
Fig. 2.29	Colocación del sensor de temperatura.	34
Fig. 2.30	Tornillo sin fin y carcaza.	35
Fig. 2.31	Colocación del tornillo sin fin dentro de la carcaza.	35
Fig. 2.32	Colocación del dosificador.	35
Fig. 2.33	Celda de carga.	36
Fig. 2.34	Colocación del sensor de peso.	36
Fig. 2.35	Circuito para el sensor de posición.	37
Fig. 2.36	Colocación del sensor de posición.	39
Fig. 2.37	Panel de potencia.	39
Fig. 2.38	Motor e inversor de la bomba.	40
Fig. 2.39	Motor e Inversor del dosificador de sólidos	40
Fig. 2.40	Inversor del motor del malacate principal.	41
Fig. 2.41	Inversor del motor del malacate secundario.	41
Fig. 3.1	Sensor de presión Omega modelo PX-440.	43
Fig. 3.2	Circuito eléctrico para la conversión I-V.	43
Fig. 3.3	Diagrama esquemático de las fuentes de voltaje.	44
Fig. 3.4	Circuito impreso para las fuentes de voltaje.	44
Fig. 3.5	Sensor de presión diferencial.	45
Fig. 3.6	Acondicionadores de señal ATA 2001 LVDT de SCHEVITZ.	46
Fig. 3.7	Diagrama de bloques para el SCXI 1141,1142 y 1143 de National Instrument .	48
Fig. 3.8	Panel frontal y posterior del SCXI 1141,1142 y 1143 de National Instrument .	48
Fig. 3.9	Diagrama de bloques para el SCXI 1121 de National Instrument .	49
Fig. 3.10	Panel frontal y posterior del SCXI 1121de National Instrument .	49

Fig. 3.11	Chasis SCXI de National Instrument .	50
Fig. 3.12	Caja de interconexión SCB 100 PIN CONNECTOR BLOCK de National Instrument	50
Fig. 3.13	Cable de interconexión SH100-100-F de National Instrument	51
Fig. 3.14.	Diagrama de bloques de la tarjeta AT-MIO-64-E de National Instrument.	52
Fig. 3.15.	Tarjeta AT-MIO-64-E de National Instrument.	52
Fig. 3.16	Patigrama y diagrama a bloques del CD4053BC.	53
Fig. 3.17	Circuito para seleccionar entre la bomba, el sin fin y los malacates.	54
Fig. 3.18	Circuito para la interconexión del inversor de la bomba con la computadora.	55
Fig. 3.19	Circuito para la interconexión del inversor del dosificador con la computadora.	56
Fig. 3.20	Circuito para la interconexión del inversor del malacate principal con la computadora.	57
Fig. 3.21	Circuito para la interconexión del inversor del malacate secundario con la computadora.	58
Fig. 3.22	Front Panel en Lab View.	58
Fig. 3.23	Back Panel en Lab View.	59
Fig. 3.24	Ayudas en el Front Panel.	59
Fig. 3.25	Ayudas en el Back Panel.	60
Fig. 3.26	Tablero virtual del Laboratorio para la Medición de Flujos Multifásicos y de transporte de recortes.	60
Fig. 3.27	Tablero virtual para ajustar los parámetros de la adquisición de datos.	61
Fig. 3.28	Tablero virtual para ajustar los parámetros para la colocación de la estructura.	62
Fig. 3.29	Tablero virtual para ajustar los parámetros para el control de sólidos y líquidos.	63
Fig. 3.30	Tablero virtual para ajustar los parámetros para el control de gases y de la tubería experimental.	64
Fig. 3.31.	Tablero virtual para graficar.	64
Fig. 4.1	Uso de la nomenclatura según la ISA.	65
Fig. 4.2	Identificación de los instrumentos según la ISA.	66
Fig. 4.3	Identificación de los tipos de señal según la norma de la ISA.	66
Fig. 4.4	Diagrama de Tubería e Instrumentación.	67
Fig. 4.5	Obtención de la curva de calibración y programación en LabView.	70
Fig. 4.6	Balanza de pesos muertos.	71

Fig. 5.1	Mediciones directamente en manómetros.	84
Fig. 5.2	Medidor de gasto Panametrics.	84
Fig. 5.3	Inclinación de la estructura experimental.	90
Fig. 5.4	Cámara de alta velocidad e imagen de la cámara.	96

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla.		Página
Tab. 2.1	Datos para la obtención de la diferencial de presión.	27
Tab. 3.1	Tabla de verdad del CD4053BC.	53
Tab. 3.2	Asignación de las señales digitales.	54
Tab. 3.3	Tabla de verdad para las señales analógicas y digitales.	54
Tab. 4.1	Identificación de las letras según la ISA.	66
Tab. 4.2	Identificación de los lazos de control.	67
Tab. 4.3	Sección de líquido.	68
Tab. 4.4	Sección de gas.	68
Tab. 4.5	Sección de sólidos.	68
Tab. 4.6	Sección experimental.	69
Tab. 4.7	Sección de los malacates.	69
Tab. 5.1	Variables hidráulicas para la primer prueba.	86
Tab. 5.2	Variables eléctricas para la primer prueba.	87
Tab. 5.3	Variables hidráulicas para la segunda prueba.	88
Tab. 5.4	Variables eléctricas para la segunda prueba.	89
Tab. 5.5	Prueba a diferentes inclinaciones.	91
Tab. 5.6	Datos obtenidos para conocer el coeficiente de fricción (f).	93

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

Gráfica.		Página
Graf. 2.1	Curvas de la bomba	24
Graf. 2.2	Curva de comportamiento de la placa de orificio.para esta tubería.	28
Graf. 2.3	Comportamiento de la placa de orificio.	32
Graf. 4.1	Curva de calibración para el transductor 0202-004 de 200PSI.	71
Graf. 4.2	Curva de calibración para el transductor 1701-002 de 200PSI.	72
Graf. 4.3	Curva de calibración para el transductor 2395-012 de 50PSI.	72
Graf. 4.4	Curva de calibración para el transductor 2395-013 de 50 PSI.	72
Graf. 4.5	Curva de calibración para el transductor 2395-024 de 50 PSI.	73
Graf. 4.6	Curva de calibración para el transductor 0202-001 de 50 PSI.	73
Graf. 4.7	Curva de calibración para el transductor 0203-001 de 50 PSI.	73
Graf. 4.8	Curva de calibración para el transductor 0202-003 de 50 PSI.	74
Graf. 4.9	Curva de calibración para el transductor 0203-003 de 50 PSI.	74
Graf. 4.10	Curva de calibración para el transductor 0202-004 de 50 PSI.	74
Graf. 4.11	Curva de calibración para el transductor 0203-004 de 50 PSI.	75
Graf. 4.12	Curva de calibración para el transductor 0202-008 de 50 PSI.	75
Graf. 4.13	Curva de calibración para el transductor 0203-008 de 50 PSI.	75
Graf. 4.14	Curva de calibración para el transductor 0202-009 de 50 PSI.	76
Graf. 4.15	Curva de calibración para el transductor 0203-009 de 50 PSI.	76
Graf. 4.16	Curva de calibración para el transductor 75192 de 15 PSI.	76
Graf. 4.17	Curva de calibración para el transductor 75197 de 15 PSI.	77

Graf. 4.18	Curva de calibración para el transductor 75385 de 15 PSI.	77
Graf. 4.19	Curva de calibración para el transductor 75389 de 15 PSI.	77
Graf. 4.20	Curva de calibración para el transductor 75390 de 15 PSI.	78
Graf. 4.21	Curva de calibración para el transductor 75396 de 15 PSI.	78
Graf. 4.22	Curva de calibración para el transductor 115588.	79
Graf. 4.23	Curva de calibración para el transductor 115589.	79
Graf. 4.24	Curva de calibración para el transductor 123456.	79
Graf. 4.25	Curva de calibración para el sensor de temperatura.	80
Graf. 4.26	Curva de calibración para el sensor de peso.	80
Graf. 4.27	Curva de calibración para la salida analógica del inversor de la bomba.	81
Graf. 4.28	Curva de calibración para el sensor de posición.	81
Graf. 4.29	Curva de calibración para la salida analógica del inversor del dosificador.	82
Graf. 4.30	Curva de calibración para la salida analógica del inversor del malacate principal.	82
Graf. 4.31	Curva de calibración para la salida analógica del inversor del malacate secundario.	82
Graf. 5.1	Curva del sistema para diferentes grados de estrangulación de la válvula FC-153, prueba 1.	87
Graf. 5.2	Curva de comportamiento para una válvula de mariposa.	88
Graf. 5.3	Curva del sistema para diferentes grados de estrangulación de la válvula FC-153, prueba 2.	89
Graf. 5.4	Curva del sistema a diferentes inclinaciones.	92
Graf. 5.5	Curva de un transitorio.	93
Graf. 5.6	Coefficiente de fricción.	94
Graf. 5.7	Patrones de flujo a 0° de inclinación.	94
Graf. 5.8	Patrones de flujo a 5° de inclinación.	95
Graf. 5.9	Patrones de flujo a 45° de inclinación.	95
Graf. 5.10	Patrones de flujo a 50° de inclinación.	95
Graf. 5.11	Patrones de flujo a 90° de inclinación.	96
Graf. 5.12	Curvas de velocidades para una velocidad de líquido de 1m/s.	97
Graf. 5.13	Curvas de velocidades para una velocidad de líquido de 1.5m/s.	97
Graf. 5.14	Curvas de velocidades para una velocidad de líquido de 2m/s.	97
Graf. 5.15	Curvas de velocidades para una velocidad de líquido de 2.5m/s.	98