



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERIA

INSTALACION EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO  
DE BURBUJAS DE AIRE EN TUBERIAS.

TESIS

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

presenta

JUAN CARLOS HERNANDEZ ACEVEDO

MEXICO, D.F. 1993

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **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 está 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.

## INDICE

	pag.
<b>I INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
I.1 Antecedentes	1
I.2 Objetivos	7
I.3 Desarrollo del trabajo	9
<b>II DESARROLLO DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL</b>	<b>11</b>
II.1 Descripción de la instalación preliminar	11
II.2 Descripción de la instalación definitiva	16
1 Cárcamos de succión y de descarga	17
2 Vertedor	20
3 Bomba y motor	24
4 Placa orificio	25
5 Difusión y reducción de la tuberfa	34
6 Zona de observación (Pieza de acrílico)	42
7 Tanque hidroneumático	45
8 Mangueras, válvulas y demás piezas que conforman la instalación	49
<b>III PRUEBAS EN LA INSTALACION EXPERIMENTAL</b>	<b>52</b>
III.1 Mediciones empleando el velocímetro láser	52
- Principio de funcionamiento del velocímetro láser Doppler (VDI)	53

	pag.
- Instalación del velocímetro láser	56
- Medición de velocidad	60
III.2 Pruebas realizadas con burbujas de aire	74
<b>IV ANALISIS DE RESULTADOS</b>	<b>83</b>
IV.1 Análisis de las mediciones con el equipo láser	83
IV.2 Análisis de la estabilidad de las burbujas	91
<b>V CONCLUSIONES</b>	<b>114</b>
<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA</b>	<b>117</b>

## I - INTRODUCCION.

### I.1 Antecedentes.

Problema de alta resistencia al flujo en las tuberías del Acueducto Río Colorado - Tijuana

El acueducto Río Colorado - Tijuana tiene la finalidad de abastecer de agua a la Ciudad de Tijuana, siendo la fuente de abastecimiento el Río Colorado a la altura del Valle de Mexicali.

La longitud total del acueducto es de 112.7 km, incluyendo tubería y túneles, el gasto de diseño es de  $4 \text{ m}^3 / \text{s}$  y la carga total de bombeo es de 1,136 m proporcionada por seis plantas de bombeo.

En 1987 la Comisión Nacional del Agua ( CNA ) solicitó al Instituto de Ingeniería de la UNAM determinara las causas asociadas al desbordamiento de la torre de oscilación 1 ( TO1 ) del acueducto. Como parte de la investigación el Instituto de Ingeniería llevó a cabo un estudio del funcionamiento hidráulico del tramo comprendido entre la planta de bombeo 1 y el tanque de sumergencia 2.

En el mes de julio del mismo año se realizaron mediciones en el tramo comprendido entre la torre de oscilación 1 y el tanque de sumergencia 2 con la

operación de un equipo de bombeo y una línea de conducción; se estableció entonces que el factor de fricción de dicho tramo era 0.0133 (  $f$  en la fórmula de Darcy - Weisbach ). Con este resultado se realizó el análisis del funcionamiento con tres equipos y tres líneas de conducción, el cuál estableció la necesidad de sobreelevar 5 m el coronamiento de la torre.

En septiembre de 1988 se condujo una segunda campaña de mediciones debido a que los derrames en la torre persistieron. Los resultados demostraron que el coeficiente de fricción se había incrementado fuertemente hasta alcanzar un valor de 0.0237. De esta forma se concluyó que la sobreelevación propuesta no era incorrecta y que la persistencia de los derrames se debía al incremento del factor de fricción en forma distribuida a lo largo de la conducción.

Mediciones recientes, llevadas a cabo por personal de operación del acueducto y del Instituto de Ingeniería, muestran que actualmente el factor de fricción ha aumentado todavía más. En febrero de 1992 el valor del coeficiente de fricción era de 0.0367 lo que representa una diferencia del 276 % con respecto al coeficiente medido en el inicio de los estudios y en la actualidad la rugosidad sigue incrementándose a razón de 2 mm por año. Tomando en cuenta que la capacidad de conducción de las tuberías se define como el máximo gasto que por ella puede circular, lo que implica que el gradiente hidráulica deberá ser el máximo posible y el factor de fricción mínimo, en el caso particular de este acueducto y especialmente entre el tramos tanque de

oscilación 1 - torre de sumergencia 2 en donde la pendiente de fricción máxima está fijada por la elevación del coronamiento de la torre y el nivel mínimo en el tanque , la capacidad de conducción depende exclusivamente del factor de fricción y se verá reducida en la medida en que este factor aumente.

En un principio se pensó que la causa del problema estaba estrechamente relacionada con la presencia de aire alojado a lo largo del acueducto, y que por razones relativas al diseño, colocación y operación de la válvulas de admisión y expulsión de aire estas no se encontraban operando en forma normal. Sin embargo durante la última campaña de mediciones se pudo observar qué tanto difería el coeficiente de rugosidad de la tubería antes como después de purgar la conducción (manteniendo conexiones con la atmósfera). Los resultados obtenidos permitieron llegar a la conclusión de que el incremento en el coeficiente de fricción no es provocado por el aumento en la cantidad de aire ya que, aunque sí se observo una disminución en el factor de fricción, ésta no fue lo suficientemente significativa al grado de permitir el funcionamiento del acueducto en forma normal. Durante la campaña de mediciones realizada en febrero de 1992, se pudo constatar que el incremento del factor de fricción es ocasionado por el considerable aumento en la rugosidad de la tubería y la drástica disminución en su diámetro, provocado por una capa de material fino depositado uniformemente en todo su perímetro. En efecto, mediante la inspección del tramo pudo constatar que el espesor de la capa varía de 2 a 6 mm, es de textura muy rugosa y, si bien el material se encuentra totalmente saturado, la

remoción no es sencilla ya que se requirió de una espátula para realizar la toma de una muestra. Estudios hechos posteriormente en un laboratorio especializado, revelaron que la capa se encuentra formada por carbonatos, bicarbonatos, sílice, calcio y magnesio principalmente.

Es importante aclarar que los desbordamientos en la torre de oscilación 1 no son una consecuencia directa del incremento del volumen de aire de la tubería, sino que son ocasionados de manera directa por el aumento de la capa de sedimento. Por un lado, esta capa provoca el incremento de rugosidad de la tubería y por ende el coeficiente de fricción. Por otro lado, los efectos que este sedimento tiene sobre la operación de los dispositivos encargados de permitir la entrada y salida de aire, causan además el incremento de los volúmenes de aire atrapados en la tubería.

También están involucrados en el problema los fenómenos relacionados con las operaciones relativas al vaciado y llenado del acueducto, ya sea en su fase preliminar (puesta en marcha) o durante las etapas de mantenimiento, así como la deficiente operación de los equipos de bombeo del sistema.

#### Operaciones programadas de una conducción

Cualquier acueducto debe ser llenado de agua cuando comienza a trabajar por primera vez ( puesta en marcha ) y debe ser vaciado para realizar reparaciones o inspeccionar algún punto de difícil acceso. Luego de ser vaciado, deberá llenarse antes



de comenzar a operar nuevamente. En consecuencia, los proyectistas y los operadores de acueductos deben considerar estas maniobras como operaciones normales. Por lo tanto las mismas deben ser exhaustivamente analizadas en la etapa de diseño y los fenómenos hidráulicos y neumáticos peculiares que ocurren durante su ejecución deben ser bien comprendidos por los operadores del acueducto.

Se caracterizan como programados los llenados que obedecen a una decisión de los operadores. Se distinguen de los fenómenos denominados accidentales pues estos últimos se producen sin mediar decisión de los operadores del sistema hidráulico.

#### Llenado programado

La operación de llenado de un acueducto supone la expulsión de aire y su sustitución por agua. Se admitirá que el acueducto puede ser llenado completamente sin que ocurran vaciados accidentales a gasto nulo.

La expulsión de aire se realiza a través de las conexiones permanentes que el acueducto tiene con la atmósfera (extremo aguas abajo, conexiones con torres de oscilación, etc.) pero fundamentalmente se debe producir a través de las válvulas de expulsión de aire distribuidas a lo largo del acueducto. Estas válvulas se colocan en todos los puntos donde puede quedar el aire atrapado durante el llenado. El aire puede quedar atrapado, por ejemplo, en los puntos altos de la tubería (figura 1.1)

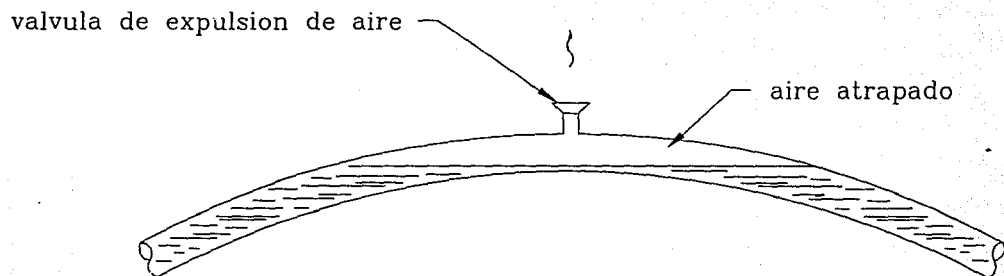


FIG. 1.1 ESQUEMA DEL AIRE ATRAPADO EN UN PUNTO ALTO DE LA CONDUCCION

o en tramos obstruidos por válvulas de seccionamiento durante la etapa del llenado. De no expulsarse al exterior, este aire atrapado generará fenómenos de oscilaciones y eventuales sobrepresiones; y como una consecuencia de estos se producirán derrames en aquellos puntos de la conducción conectados permanentemente con la atmósfera como son las torres de oscilación y los tanques de sumergencia, cuando el acueducto comience a trabajar. Para la expulsión de aire se emplean válvulas apropiadas ( figura 1.2 ). Estas válvulas sólo cierran cuando el agua llega hasta ellas y empuja el flotador contra el orificio.

## 1.2 Objetivos

Con la finalidad de conocer mejor el comportamiento dinámico de las burbujas de aire atrapadas en conductos de agua a presión, el presente trabajo plantea el diseño, construcción y operación de una instalación hidráulica experimental. Dicha instalación permitirá conocer las características cualitativas y cuantitativas del fenómeno, para lo cuál se ha pensado en un circuito cerrado que, mediante algunas piezas de geometría conocida, proporcione los suficientes elementos que permitan determinar los parámetros que rigen el comportamiento dinámico de las burbujas de aire así como las posibles soluciones al mismo con objeto de conocer y asociar de qué manera, ya sea directa o indirectamente, se afecta la operación hidráulica y los efectos que ésta tiene sobre los costos en la operación de los grandes sistemas de agua potable.

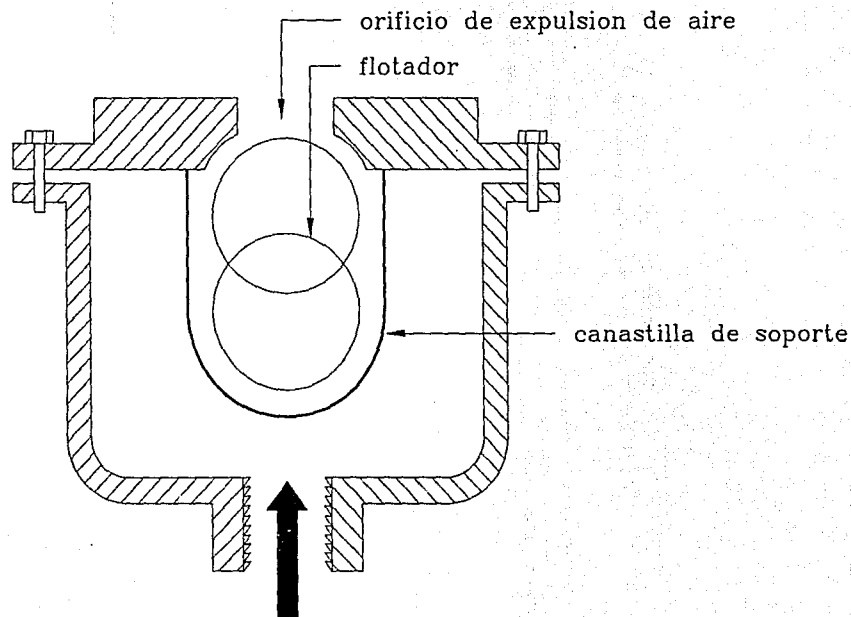


FIG. 1.2 VALVULA ELIMINADORA DE AIRE

### 1.3 Desarrollo del trabajo

Este trabajo consta de 5 capítulos, la primera parte de esta tesis, capítulos 2 y 3, comprende la descripción completa de los elementos que conforman a la instalación experimental, así como la explicación que justifica la elección de todos y cada uno de los dispositivos empleados, basándonos en las experiencias que se tuvieron con un sistema preliminar construido exprofeso. Se muestra la metodología seguida para la realización de las pruebas relativas a la determinación de los perfiles de velocidad, así como el equipo láser empleado para tales efectos. Por otro lado se presentan una serie de pruebas relativas a la inclusión de volúmenes de aire en la tubería con el objeto de observar y determinar cualitativamente su comportamiento.

La segunda parte de este trabajo, capítulos 4 y 5, comprende el análisis de los resultados tanto de las pruebas con el equipo de velocimetría láser, como de las pruebas con burbujas de aire. Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones, se identifican aquellas conclusiones producto del diseño de la instalación experimental, así como las conclusiones desprendidas de los dos tipos de pruebas.

Es importante mencionar que los alcances del presente trabajo pretenden dar una idea general de los inconvenientes tanto técnicos como económicos que genera un problema de esta naturaleza. Es sólo el inicio de una investigación que requiere de un análisis exhaustivo de todos los factores que intervienen en el fenómeno y por lo

que el objetivo de esta tesis se limita a plantear el desarrollo y diseño de una instalación experimental que posiblemente no sea la que nos permita, la completa simulación del fenómeno, sencillamente es uno de los peldaños, el punto de partida en el proceso de comprensión de éste tópico.

## **II. Diseño y construcción de la instalación experimental**

En los grandes proyectos de ingeniería civil como plantas hidroeléctricas, puertos marítimos, etc. es común que, con la finalidad de tener una aproximación lo más cercana posible del funcionamiento de estos, se empleen modelos a escala que simulen su funcionamiento, sin embargo los proyectistas deben tener presente que debido a la gran cantidad de factores que intervienen en las obras civiles es común que se presenten algunas deficiencias, el objetivo de una modelación es minimizarlas más no siempre es posible eliminarlas en su totalidad. En la práctica estos procesos de modelaje sólo se justifican cuando la magnitud y presupuesto de la obra lo permiten, ya que esto implica un gran esfuerzo al inversionista .

### **II.1 Descripción de la instalación preliminar**

Con el objeto de conocer las características geométricas y operativas de lo que será la instalación definitiva, se construyó un sistema preliminar. Este sistema está conformado de la siguiente manera:

Es un circuito cerrado en el que una bomba de 50 HP toma agua de un tanque de suministro denominado cárcamo de succión, de aquí el fluido es conducido mediante tubería de PVC de 6" de diámetro hasta una válvula de mariposa que, mediante su cierre o apertura, es la encargada de controlar el aumento o disminución del gasto. Posteriormente la sección transversal de la tubería disminuye de 6 a 4" debido a la inserción de una reducción Bushing, a continuación se encuentra una trampa de aire formada por una tee a la que se le colocó un tramo de tubería de 4"

y en cuyo extremo se encuentran un tapón macho de las mismas dimensiones con una válvula que permite la salida del aire durante el llenado de la conducción y durante la operación del sistema.

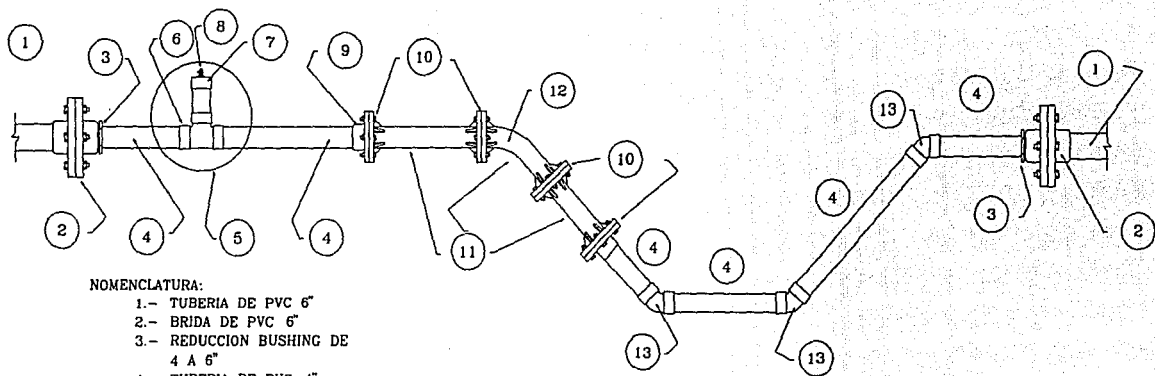
La zona en donde se realizó la observación de los fenómenos relativos a las burbujas de aire se encuentra formada por tres tubos de acrílico de 12.3 cm de diámetro, dos tramos rectos y un codo cuya curvatura es de  $53^\circ$  a los que se les tuvo que acoplar unas bridas en los extremos con la finalidad de integrar esta zona al resto de la instalación ( figura 2.1 ). Estas piezas además cuentan con preparaciones que permitieron tanto la inserción de volúmenes de aire como la cuantificación de la pérdida de carga que se genera cuando el agua pasa por el codo. Después de la zona de observación y de recorrer el resto del circuito integrado por tubería de 6" y piezas de fontanería de PVC, el agua es conducida hasta un depósito (cárcamo de descarga) donde el agua pasa finalmente al cárcamo de succión a través de un vertedor triangular para ser reutilizada (figura 2.2 ).

Existe una válvula de compuerta colocada antes de la descarga de la tubería. Se menciona por estar comprendida en el circuito, más no por injerir en el funcionamiento de éste, ya que su colocación obedece a factores relativos al mantenimiento del sistema.

De esta instalación preliminar se llegó a la conclusión de que el sistema definitivo deberá contar con los siguientes características:

- Un equipo de bombeo mas acorde con las necesidades y expectativas del estudio, esto es mayor versatilidad en el manejo de gastos pequeños

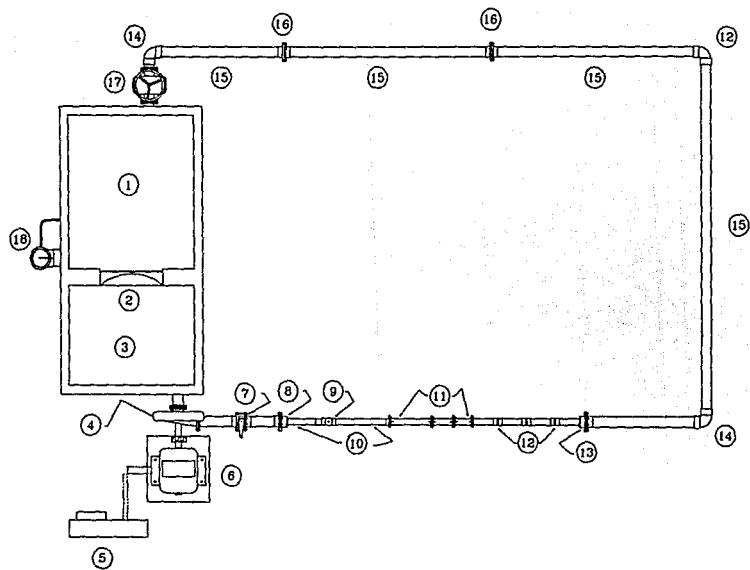




NOMENCLATURA:

- 1.- TUBERIA DE PVC 6"
- 2.- BRIDA DE PVC 6"
- 3.- REDUCCION BUSHING DE 4 A 6"
- 4.- TUBERIA DE PVC 4"
- 5.- TRAMPA PARA AIRE
- 6.- TEE DE PVC 4"
- 7.- TAPON MACHO DE PVC 4"
- 8.- VALVULA PARA EXPULSION DE AIRE
- 9.- BRIDA DE PVC 4"
- 10.- BRIDA DE ACRILICO
- 11.- TUBERIA DE ACRILICO 12.3 cm
- 12.- CODO DE ACRILICO (53X12.3 cm)
- 13.- CODO DE PVC 45 X 2"

FIG. 2.1 VISTA LONGITUDINAL DE LA INSTALACION PRELIMINAR



NOMENCLATURA:

- 1.- CARCAMO DE DESCARGA
- 2.- VERTEDOR TRIANGULAR
- 3.- CARCAMO DE SUCCION
- 4.- BOMBA
- 5.- PANEL DE CONTROL
- 6.- MOTOR 50 HP
- 7.- VALVULA DE MARIPOSA 6"
- 8.- REDUCCION BUSHING 6 A 4"
- 9.- TRAMPA DE AIRE
- 10.- TUBERIA PVC 4"
- 11.- TUBERIA DE ACRILICO 12.3 cm
- 12.- CODO DE PVC 45 X 4"
- 13.- AMPLIACION BUSHING 4 A 6"
- 14.- CODO DE PVC 90 X 6"
- 15.- TUBERIA DE PVC 6"
- 16.- BRIDAS DE PVC 6"
- 17.- VALVULA DE COMPUERTA 6"
- 18.- LIMNIMETRO

FIG. 2.2 ESQUEMA DE LA INSTALACION PRELIMINAR

- Estará conformado por piezas que permitan el fácil y rápido mantenimiento de los componentes de la instalación así como construcción o colocación de los mismos
- La zona de observación tendrá que estar constituida por una sola pieza de acrílico
- Además del vertedor, como dispositivo de aforo, se tendrán que emplear una placa para poder instalar un gasto deseado con mayor rapidez
- La zona en la cuál se construya la instalación debe conjuntar a la mayor cantidad de los elementos que se mencionaron antes de tal forma que se limite la construcción o adquisición de estructuras especiales.

En cuanto a la obtención de los parámetros que fueron cuantificados destaca la pérdida de carga que se generaba en el codo, la cual se obtuvo de la diferencia de niveles en un manómetro diferencial cuyo fluido era tetracloruro de carbono, conectado en el principio y el final de la pieza. La medición del gasto se realizó a través del vertedor triangular empleando la fórmula de la Universidad Católica de Chile [Ref. 1].

Se realizaron varias pruebas cualitativas variando el gasto e inyectando aire a la tubería observando tanto la forma de la burbuja ( dimensiones aproximadas ) como la velocidad a la que ésta comenzaba a perder volumen hasta ser completamente arrastrada por el flujo.

Es importante mencionar que este trabajo es una pequeña porción de lo que un estudio de esta naturaleza demanda y surge como una primera necesidad. Debe tenerse en cuenta que los recursos económicos aportados por la CNA, como en otros casos, son limitados por lo que una misión del ingeniero, y en particular del civil, es obtener resultados lo más pronto posible y con el menor costo.

## II.2 - Descripción de la instalación definitiva

Basándonos en los resultados obtenidos durante las pruebas desarrolladas en el sistema preliminar, se determinó que los elementos generales de la instalación definitiva (ubicación, disposición de los elementos de aforo y observación, etc.) deben permitirnos un conocimiento mucho más apropiado de los fenómenos que se observaron en la primera instalación, es decir, los resultados que proporcionen los equipos que la conforman no deben representar una incógnita más en el desarrollo de ésta investigación. Por tal motivo se llegó a la conclusión de que los equipos que participaran tenían que ser aquellos cuyos estándares de operación estaban perfectamente identificados.

Adicionalmente la ubicación de la instalación deberá acoplarse a la disposición, en el laboratorio, de los equipos que han sido elegidos para intervenir en las pruebas, de tal forma que se evite la construcción o manufactura de estructuras adicionales con los inconvenientes económicos y operativos que esto implica.

La instalación es un arreglo de elementos ( válvulas, mangueras, tanques, piezas de acrílico, etc.) que forman un circuito cerrado (figura 2.3) cuyos componentes mas importantes, características y disposición, se enumeran a continuación y serán descritos posteriormente:

- 1.- Cárcamos de succión y descarga
- 2.- Vertedor
- 3.- Bomba y motor
- 4.- Placa orificio
- 5.- Difusión y reducción
- 6.- Zona de observación ( Pieza de acrílico )
- 7.- Tanque hidroneumático
- 8.- Mangueras, válvulas y demás piezas que conforman la instalación.

#### 1.- Cárcamos de succión y descarga

El sistema inicia con el depósito que se encarga tanto de recibir el agua que ha recorrido la instalación como de suministrarla a la bomba. Este depósito está formado por un cajón que se encuentra dividido en dos reservorios, el cárcamo de succión y el de descarga, ambos de 1.71 m de altura, con 1.94 m<sup>2</sup> y 4.965 m<sup>2</sup> de área rectangular respectivamente, interconectados mediante un vertedor cuyas características se mencionarán posteriormente (figura 2.4).

El cárcamo de descarga cuenta con un par de muros de celosía cuya forma y

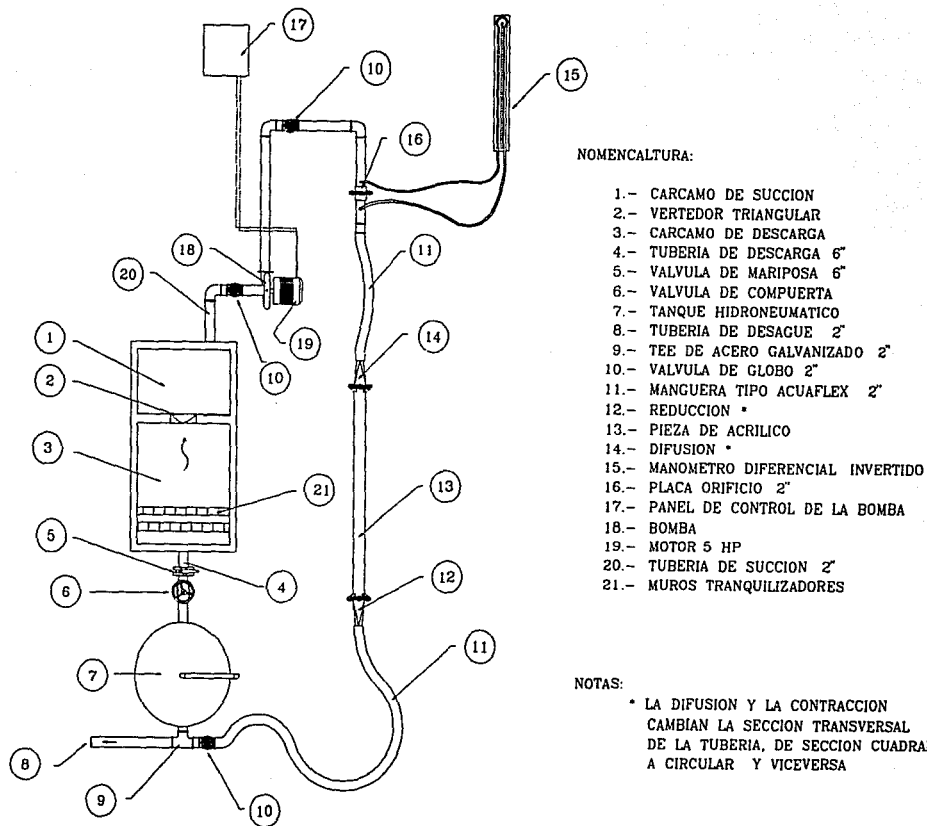
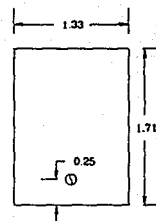
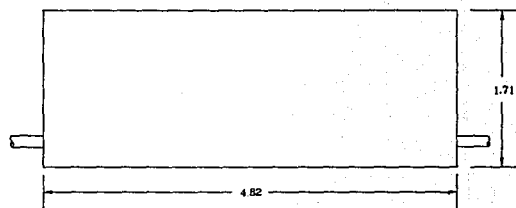
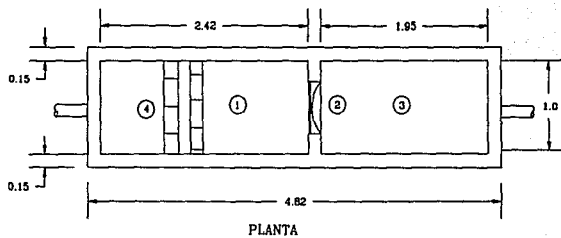


FIG. 2.3 CROQUIS DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL



**NOMENCLATURA:**

- 1.- CARCAMO DE DESCARGA
- 2.- VERTEDEDOR TRIANGULAR
- 3.- CARCAMO DE SUCCION
- 4.- MUROS TRANQUILIZADORES

FIG. 2.4 ESQUEMA DE LOS CARCAMOS DE SUCCION Y DE DESCARGA

acomodo obedece a que el agua que ha recorrido la instalación llega con demasiada turbulencia al depósito lo cuál genera fluctuaciones en el nivel del mismo y por ende en la carga de agua sobre el vertedor, lo que redundaría, en una constante oscilación, no deseada, de la lectura del gasto tomada en el limnómetro.

## 2.- Vertedor

Es un vertedor triangular de pared delgada ( ya que las aristas que lo conforman son agudas ) formado por una placa de acero que mide 3 mm de espesor. El vertedor mide 35 cm de alto y 40 cm de base ( figura 2.5 ), el ángulo que corresponde al vértice más cercano al fondo del depósito, conocido como la cresta es  $\theta = 60^\circ$ . Según las características antes mencionadas y siguiendo el criterio de la Universidad Católica de Chile [Ref. 1], el gasto puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu (h_{\text{cresta}} - h_{\text{lim}})^{5/2} \quad (2.1)$$

donde:

$Q$  representa al gasto, calculado en  $\text{m}^3/\text{s}$

$g$  es el valor de la aceleración de la fuerza de gravedad, considerado =  $9.81 \text{ m/s}^2$

$\theta$  corresponde al ángulo del vertedor

$\mu$  es un coeficiente adimensional que depende de  $\theta$  y de  $h$

$h_{\text{lim}}$  representa la lectura en el limnómetro

$h_{\text{cresta}}$  es un valor constante que corresponde a  $h_{\text{lim}}$  cuando el agua se encuentra



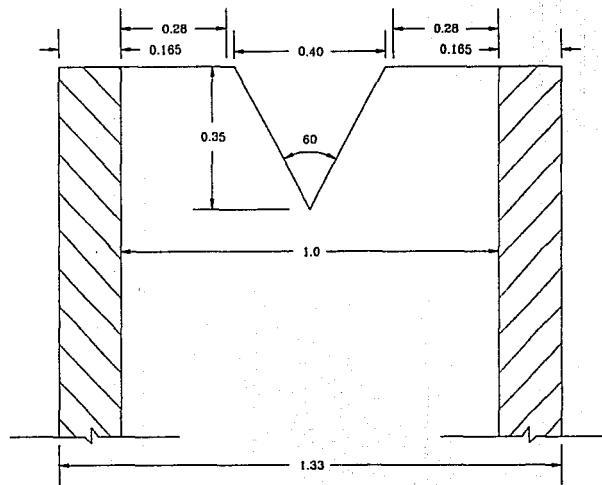


FIG. 2.5 DIMENSIONES DEL VERTEDOR TRIANGULAR

en la cresta del vertedor (este caso  $h_{tara} = 25.6 \text{ cm}$  )

Es importante mencionar que para obtener las lecturas tanto de la tara como de la carga que opera sobre el vertedor se emplea un limnómetro montado en una de las paredes del depósito destinado a la descarga y conectado al mismo mediante una manguera que hace las veces de vaso comunicante.

Asimismo el valor de la tara sólo variará cuando el limnómetro sea movido de lugar por alguna razón en especial.

Con el objeto de facilitar los cálculos que pudiesen presentarse durante las pruebas se elaboró la tabla 2.1 donde se puede obtener directamente el valor del gasto enviado por la bomba así como la velocidad a la que viaja el flujo dentro de la tubería conociendo únicamente la carga en el vertedor ( $h$ ), como la diferencia de lecturas, ya que:

$$h = h_{tara} - h_{lim} \quad (2.2)$$

de esta forma el gasto queda definido como:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu (h)^{5/2} \quad (2.3)$$

Dentro de los métodos de aforo, los vertedores son elementos que proporcionan valores extremadamente cercanos a la realidad, siempre y cuando se conozcan perfectamente las características geométricas de éstos. Sin embargo, el proceso para la obtención de las lecturas resulta relativamente tardado ya que las fluctuaciones

VALORES DE Q (m <sup>3</sup> /s)										
h cm	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,01989	0,01968	0,01948	0,01928	0,01908	0,01888	0,01868	0,01849	0,01829	0,01810
2	0,02167	0,02143	0,02120	0,02090	0,02075	0,02052	0,02030	0,02008	0,01985	0,01964
3	0,02056	0,02033	0,02010	0,01987	0,01965	0,01942	0,01920	0,01898	0,01876	0,01850
4	0,01846	0,01824	0,01803	0,01782	0,01761	0,01740	0,01719	0,01698	0,01678	0,01657
5	0,01601	0,01582	0,01562	0,01543	0,01524	0,01505	0,01486	0,01467	0,01448	0,01430
6	0,01387	0,01369	0,01351	0,01334	0,01316	0,01299	0,01282	0,01265	0,01248	0,01231
7	0,01205	0,01188	0,01172	0,01156	0,01140	0,01124	0,01108	0,01093	0,01077	0,01062
8	0,01035	0,01020	0,01005	0,00991	0,00976	0,00962	0,00947	0,00933	0,00919	0,00900
9	0,00886	0,00872	0,00859	0,00846	0,00833	0,00820	0,00807	0,00794	0,00781	0,00769
10	0,00754	0,00742	0,00729	0,00717	0,00706	0,00694	0,00682	0,00671	0,00659	0,00648
11	0,00636	0,00625	0,00614	0,00603	0,00592	0,00582	0,00571	0,00561	0,00550	0,00540
12	0,00530	0,00520	0,00510	0,00501	0,00491	0,00482	0,00472	0,00463	0,00454	0,00445
13	0,00436	0,00427	0,00418	0,00409	0,00401	0,00393	0,00384	0,00376	0,00368	0,00360
14	0,00352	0,00345	0,00337	0,00329	0,00322	0,00315	0,00307	0,00300	0,00293	0,00286
15	0,00280	0,00273	0,00266	0,00260	0,00253	0,00247	0,00241	0,00234	0,00228	0,00222
16	0,00210	0,00211	0,00205	0,00200	0,00194	0,00189	0,00183	0,00178	0,00173	0,00168
17	0,00163	0,00158	0,00153	0,00149	0,00144	0,00139	0,00135	0,00131	0,00126	0,00122
18	0,00118	0,00114	0,00110	0,00106	0,00103	0,00099	0,00095	0,00092	0,00088	0,00085
19	0,00082	0,00079	0,00075	0,00072	0,00069	0,00066	0,00064	0,00061	0,00058	0,00050
20	0,00053	0,00050	0,00048	0,00046	0,00043	0,00041	0,00039	0,00037	0,00035	0,00033

TABLA 2.1

de nivel en el depósito encargado de abastecer al vertedor son grandes y demandan cierto tiempo para estabilizarse en un punto.

### 3.- Bomba y motor

Es práctica frecuente que, con el afán de regular el gasto que proporciona un sistema de abastecimiento de agua potable, éste se estrangule empleando válvulas perdiendo una buena porción de la carga, es decir, se sacrifica a precios algunas veces muy altos, la carga hidráulica por el gasto.

Cuando se deseaba variar el gasto, en la primera instalación se obstruía la sección transversal de la tubería con una válvula de mariposa presentándose los siguientes inconvenientes:

- 1.- Las variaciones en el gasto eran únicamente cualitativas, es decir no existía la posibilidad de conocer que tanto estaba aumentando o disminuyendo el flujo prolongando el tiempo de duración de cada prueba, ya que sólo se podía comenzar a hacer observaciones una vez que la lectura en el limnómetro ya no presentaba variaciones
- 2.- Variar el gasto con la válvula provocaba cavitaciones en las vecindades de la misma, lo cual resultaba indeseable ya que las partículas de aire que por su tamaño no alcanzaban a disolverse nuevamente en el agua, llegaban a la zona de observación afectando los resultados
- 3.- Aunque el objetivo de la investigación no involucra factores relacionados con la carga que proporciona la bomba, es importante mencionar que tanto las presiones como los gastos de operación de la instalación están limitados a

la resistencia de las piezas de acrílico colocadas aguas abajo de la descarga. Es decir, con el objeto de proteger a las piezas de acrílico, por un lado, y procurar gastos bajos que no arrastraran a las burbujas en observación se estaba desperdiciando la capacidad del equipo de bombeo con los inconvenientes económicos que esto pueda representar para el Instituto de Ingeniería o sus patrocinadores

Por las razones antes expuestas se decidió utilizar una motobomba con un inversor o motovariador, el cual tiene la característica de que nos permite variaciones del gasto mediante el cambio controlado de la velocidad de giro de los impulsores del equipo de bombeo, operación que anteriormente se realizaba con una válvula presentándose los inconvenientes ya descritos.

El inversor permite el incremento o decremento, según sea el caso, de las variaciones de velocidad con sólo hacer girar una perilla. Además dicho inversor cuenta con una pequeña pantalla que muestra, la frecuencia con la que el motor se encuentra operando. En todas las pruebas hechas la frecuencia nunca excedió 35 Hz

Las curvas  $H$  vs  $Q$ , así como la de eficiencia ( $\eta$ ) fueron obtenidas durante el desarrollo del proyecto " Regulación de gasto suministrado por una bomba aplicando control PI " [Ref. 2] llevado a cabo en el Instituto de Ingeniería.

#### **4.- Placa orificio**

Las variaciones del gasto obedecen al aumento o disminución de la velocidad

de giro controlado de los impulsores de la bomba, sin embargo como se describió antes el tiempo que le lleva al vertedor tanto registrar éste cambio como estabilizarse (entiéndase este proceso como la permanencia de la regleta del limnómetro en una cierta posición) es relativamente prolongado. Con el afán de conocer lo más pronto posible las variaciones del gasto que está enviando la bomba se colocó una placa orificio cuyas propiedades operacionales y geométricas se describen a continuación:

Es una placa circular de 2 mm de espesor y 4" de diámetro en cuyo centro se encuentra un orificio de 2 cm de radio. La placa se acopla a una tubería de 2" de diámetro mediante dos bridas (figura 2.6). Es importante mencionar que este tipo de dispositivos únicamente se emplean en sistemas hidráulicos en donde se permiten pérdidas de carga ya que el flujo, al pasar de una sección a otra, modifica su velocidad y por lo tanto la presión, antes y después de la sección, cuyo valor determina el gasto.

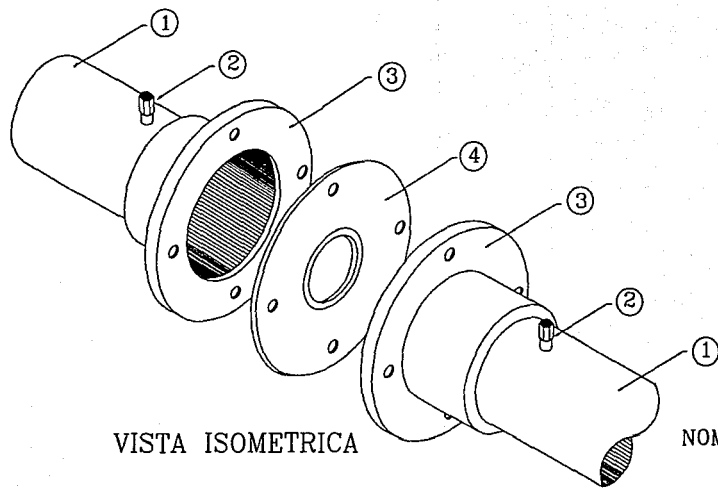
Para conocer el gasto en un sistema donde ha sido colocada una placa orificio se emplea la siguiente expresión [Ref. 1]:

$$Q = C_d A_0 \sqrt{2g \Delta h \left( \frac{y_m}{Y} - 1 \right)} \quad (2.4)$$

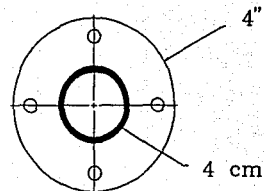
en donde:

$Q$  es el gasto en  $m^3/s$

$C_d$  es un coeficiente de descarga que depende de la geometría de la placa



VISTA ISOMETRICA



VISTA FRONTAL

NOMENCLATURA:

- 1.- TUBERIA DE ACERO GALVANIZADO 2"
- 2.- TOMA DE PRESION
- 3.- BRIDA 2"
- 4.- PLACA ORIFICIO 2"

FIG. 2.6 PLACA ORIFICIO

orificio, la rugosidad de las paredes y el número de Reynolds (  $Re$  ) que incluye el efecto de viscosidad del fluido [Ref. 1]

$A_0$  área del orificio de la placa

$g$  es el valor de la aceleración de la fuerza de gravedad (considerada  $g = 9.81$   $m/s^2$ )

$\Delta h$  diferencia de presiones medida en un manómetro diferencial

$\gamma_m$  peso específico del fluido manométrico en  $Kg/m^3$

$\gamma$  peso específico del agua en  $Kg/m^3$  (  $\gamma = 1000$   $Kg/m^3$  )

Las consideraciones que se deben tener para la obtención del coeficiente de descarga  $C_d$  según la referencia 1, son las siguientes:

1.- La relación de áreas

2.- El número de Reynolds

La relación de áreas está dada por:

$$\frac{A_0}{A_1} = \frac{\frac{\pi D_0^2}{4}}{\frac{\pi D_1^2}{4}}$$

donde se observa que, al simplificar, la relación se reduce al cociente de los diámetros al cuadrado



$$\frac{A_0}{A_1} = \frac{D_0^2}{D_1^2}$$

En el caso de la placa empleada durante este trabajo  $D_0 = 4 \text{ cm}$  y  $D_1 = 5.08 \text{ cm}$  ( 2") de tal forma que:

$$\frac{A_0}{A_1} = \frac{4^2}{5.08^2} = 0.620$$

El número de Reynolds está definido como:

$$Re = \frac{V_1 D_1}{\nu}$$

en donde:

$V_1$ ,  $D_1$  son la velocidad y el diámetro de la sección aguas arriba de la placa  
 $\nu$  es el valor de la viscosidad cinemática del agua la cuál se obtiene partiendo de la temperatura °C ( en nuestro caso  $\nu = 1.06 \text{ E} - 6 \text{ m}^2/\text{s}$  para una  $T = 18 \text{ °C}$ )

Una vez instalada y con el objeto de calibrar la placa orificio o diafragma que empleamos, se procedió a realizar mediciones en la instalación, tanto del gasto enviado como de la diferencia de lecturas registradas en un manómetro diferencial invertido cuyo fluido manométrico era aire, obteniéndose los resultados mostrados en

la tabla 2.2:

TABLA 2.2

Prueba	$\Delta h$ (cm)	$Q_v$ (lps)	Re	$C_d$	$Q_p$ (lps)
1	6.800	1.534	3.6E4	0.770	1.117
2	15.60	1.987	4.7E4	0.765	1.680
3	24.40	2.519	6.0E4	0.760	2.083
4	35.50	3.052	7.2E4	0.750	2.486
5	41.70	3.310	7.8E4	0.745	2.676
6	48.80	3.619	8.6E4	0.799	3.105
7	59.60	3.985	9.4E4	0.620	2.662
8	69.10	4.261	1.0E5	0.620	2.867
9	57.50	3.962	9.3E4	0.620	2.615
10	39.30	3.348	8.0E4	0.745	2.598

En esta tabla:

$Q_v$  es el gasto obtenido con la fórmula para vertedores

triangulares

$Q_p$  gasto obtenido con la fórmula para placas orificio (ecuación 2.4)

Partiendo de la ecuación de gasto para placas orificio (2.4)

puede considerarse entonces que:

$$Q = K \sqrt{\Delta h} \quad (2.5)$$

ya que:

$$K = C_d A_0 \sqrt{2g \left( \frac{\gamma_m}{\gamma} - 1 \right)} \quad (2.6)$$

de la ecuación (2.5) resulta

$$Q^2 = K^2 \Delta h$$

(las unidades de K dependen del sistema de unidades que se elija) de donde

$$\Delta h = \frac{1}{K^2} Q^2 \quad (2.7)$$

la ecuación 2.7 puede ajustarse a una expresión de la forma:

$$y = ax^2$$

de donde se obtiene, haciendo un ajuste, por mínimos cuadrados a los valores de  $\Delta h$

y  $Q_v$  que:

$$a = 3.65662$$

quedando la expresión 2.7 como sigue:

$$\Delta h = 3.65662 Q^2 \quad (2.8)$$

El hecho de considerar a  $\Delta h$  como la variable dependiente y a  $Q$  como la independiente en la expresión 2.8 obedece a que dicha ecuación fungió como un indicador del orden de las variaciones de la velocidad de giro de los impulsores de la bomba ( operación que se puede efectuar a voluntad del operador como se describió anteriormente ) que debía registrar el panel de control de la misma con el objeto de obtener un valor de gasto lo más cercano posible al que se había prefijado para hacer alguna prueba determinada. De esta forma, conocido el gasto se requería en una prueba y la diferencia de presiones que este ocasiona al pasar por el diafragma, lo único que había que hacer era aumentar o disminuir cuidadosamente la velocidad del motovariador. Para evitar demoras durante las pruebas, la ecuación 2.8 se evaluó para distintos valores de  $Q$  dentro de un rango determinado, obteniéndose los valores mostrados en las tablas 2.3:

El máximo valor de  $\Delta h$  ( 87.79 cm ) que se observa en las tablas corresponde a un gasto de 4.90 l.p.s.

Las tomas piezométricas para este tipo de placas ( Verein Deutscher Ingenieure, VDI por sus siglas ) deben quedar localizadas 2.5 cm, antes y después de la placa ya que de lo contrario no se garantiza que los valores de gasto obtenidos estén próximos

TABLA 2.3

VALORES DE $\Delta h$ (cm) SEGUN Q (l.p.s.)					
	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40
0	0	0,037	0,146	0,329	0,585
1	3,657	4,425	5,266	6,18	7,167
2	14,626	16,126	17,698	19,344	21,062
3	32,91	35,14	37,444	39,821	42,271
4	58,506	61,468	64,503	67,611	70,792

VALORES DE $\Delta h$ (cm) SEGUN Q (l.p.s.)					
	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900
0	0,914	1,316	1,792	2,34	2,962
1	8,227	9,361	10,568	11,847	13,2
2	22,854	24,719	26,657	28,668	30,752
3	44,794	47,39	50,059	52,802	55,617
4	74,047	77,374	80,775	84,249	87,795

a la realidad. Partiendo de lo antes mencionado es importante aclarar que no se cumplió con la especificación debido a razones técnicas relacionadas con la colocación de las tomas de presión y que por tal motivo los gastos obtenidos únicamente ( $Q_v$ ) son sólo una aproximación al gasto bombeado por el equipo. Los valores de gasto considerados para el procesamiento de la información son aquellos que el vertedor, en un principio y posteriormente el velocímetro láser proporcionaron. El hecho de haber empleado la placa orificio lo justifica la rapidez con que ésta reacciona a diferencia de otras formas de aforo.

#### 5.- Difusión y reducción de la tubería

El diámetro nominal de las tuberías que conforman la instalación es de 2", salvo en la zona en donde se efectúan las observaciones y mediciones que además de incrementar el área transversal modifica la forma de la sección cambiando de circular a cuadrada. Esto obedece al hecho de que la porción de instalación destinada a la observación del fenómeno requería que las paredes de la tubería fueran planas y transparentes, ya que las mediciones de la velocidad local se realizaron con un equipo láser cuyo haz de luz precisa de la menor dispersión de luz y de tubería que permita el paso de la misma, razón por demás suficiente para que dicha zona este hecha de acrílico transparente y de sección cuadrada.

Para poder integrar la zona de observación al resto de la instalación fue necesario diseñar y fabricar dos piezas especiales ya que comercialmente no existen. Una de ellas que ampliara la sección en la zona donde empieza la pieza de acrílico,

denominada difusión, y otra que la redujera, llamada contracción.

Es importante mencionar que, independientemente de los resultados obtenidos al considerar los criterios de diseño que se describirán a continuación, las piezas diseñadas debían presentar grandes facilidades tanto en el proceso de manufactura como de montaje, ya que existen limitantes técnicas y operativas que de no ser contempladas prolongarían excesivamente el objetivo de este trabajo. De esta forma la opción más viable era fabricar piezas metálicas con idénticas propiedades geométricas cuya única diferencia radica en el modus operandi de las mismas (difundir o contraer la sección).

El criterio, numéricamente hablando, empleado para el diseño de dichas piezas se encuentra descrito en la referencia 1 y pretende que las pérdidas por ampliación y reducción de la sección transversal sean mínimas, mediante cambios graduales del área de la misma. En el caso de la ampliación que se presenta antes de la zona de observación se empleó la fórmula de Borda - Karnot [Ref. 1], en donde el coeficiente K que proporciona la pérdida de carga en la sección está calculado como:

$$K = C_a \left( \frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2$$

en donde:

K coeficiente de pérdida de carga por ampliación

$C_a$  coeficiente que depende del ángulo  $\theta$  del difusor (figura 2.8)

$A_2$  área transversal de la sección de salida de la ampliación

$A_1$  área transversal de la sección de entrada de la ampliación

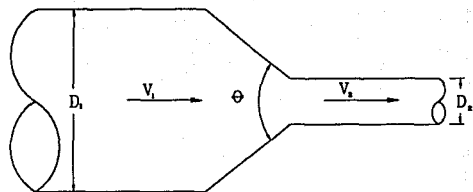


FIG. 2.7 REDUCCION GRADUAL (CONTRACCION)

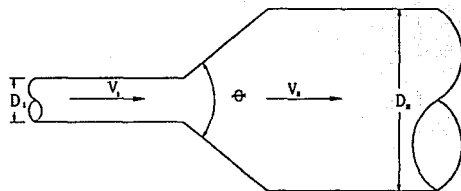


FIG. 2.8 AMPLIACION GRADUAL (DIFUSION)



La pérdida mínima de energía se obtiene para ángulos de difusión  $\theta = 8^\circ$ , sin embargo dentro de los alcances de este trabajo no se pretenden involucrar factores relacionados con éstas, de aquí que tanto la difusión que empleamos como la contracción cuenta con las dimensiones mostradas en la figura 2.9 en donde  $\theta = 14^\circ$

A fin de evitar separaciones y cavitaciones, el ángulo  $\theta$  del difusor debe ser

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{\sqrt{g D}}{2 V} \quad \text{para } \theta < 20^\circ \quad (2.9)$$

en donde

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (2.10)$$

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.11)$$

$D_1$  diámetro en la entrada de la contracción

$D_2$  diámetro a la salida de la contracción

$V_1$  velocidad a la entrada de la contracción

$V_2$  velocidad a la salida de la contracción

El criterio antes descrito involucra áreas transversales circulares. La pieza que se empleó cuenta en uno de sus extremos, como se explicó anteriormente, con un área transversal de sección cuadrada de 10 cm de lado.

El diámetro a la salida de la difusión ( $D_2$ ) que la fórmula 2.10 emplea, en nuestro caso se consideró como aquel que se obtiene para una área transversal de  $0.010 \text{ m}^2$  como lo indica el criterio del cono equivalente [Ref. 1], es decir

$$0.010 = \frac{\pi D_2^2}{4}$$

de donde obtenemos

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 \times 0.010}{\pi}} = 0.112 \text{ m}$$

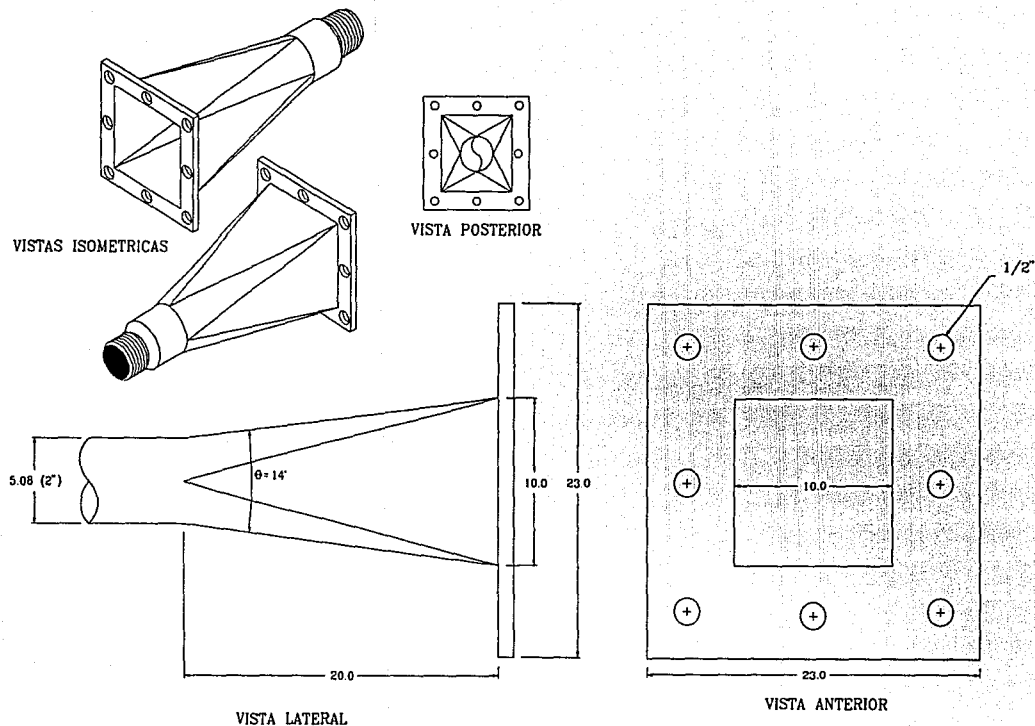
siendo el promedio de los diámetros

$$D = \frac{0.0508 + 0.112}{2} = 0.0814$$

Durante las pruebas, las cuales se describirán posteriormente, se operaron gastos menores o iguales a 4 l.p.s., de esta forma las velocidades  $V_1$  y  $V_2$  ( a la entrada y a la salida de la difusión respectivamente ) son:

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{Q}{\frac{\pi D_1^2}{4}} = \frac{4Q}{\pi D_1^2}$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{Q}{\frac{\pi D_2^2}{4}} = \frac{4Q}{\pi D_2^2}$$



NOTA:  
 ACOTADA EN cm  
 LA FORMA Y DIMENSIONES  
 DE LA DIFUSION Y LA  
 CONTRACCION SON IDENTICAS

FIG. 2.9 DIMENSIONES DE LA DIFUSION Y LA REDUCCION

sustituyendo los valores de  $Q$ ,  $D_1$  y  $D_2$ ,  $V_1 = 1.973$  m/s y  $V_2 = 0.406$  m/s. Finalmente se obtiene que los promedios de diámetros y velocidades son  $D = 0.0814$  m y  $V = 1.190$  m/s. De la expresión 2.9

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{\sqrt{gD}}{2V} = \frac{\sqrt{9.81 \times 0.0814}}{2 \times 1.190} = 0.375$$

despejando  $\theta$

$$\theta = 2 \tan^{-1}(0.375) \approx 41^\circ$$

por lo que rige el criterio de  $\theta < 20^\circ$ .

En el caso de la reducción (figura 2.7), se produce un fenómeno de contracción semejante al de entrada a la tubería, el cual también conviene que sea gradual. Si bien en este caso la pérdida es inferior a la de ampliación, dependiendo de la brusquedad con que se efectúa la contracción, el coeficiente de pérdida está supeditado al ángulo  $\theta$  al cual ésta se produce, de acuerdo con la tabla 2.4 propuesta por Kisiliev mostrada a continuación [Ref. 1]:

TABLA 2.4

$\theta$	4 a 5°	7°	10°	15°	20°	25°
K	0.060					
	0.005	0.160	0.180	0.200	0.220	0.240

TABLA 2.4

$\theta$	30°	35°	40°	45°	60°	75°
K	0.240	0.260	0.280	0.300	0.320	0.340

Con objeto de evitar pérdidas grandes, el ángulo de reducción no debe exceder de un valor especificado, sin embargo de manera análoga al diseño de la difusión, en este caso tampoco interesan. Se hicieron los cálculos de  $\theta$  con la única finalidad de ser consistentes con los criterios empleados.

Dicho ángulo vale:

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{gD}{V}} \quad (2.12)$$

en donde D y V están dados también por las ecuaciones (2.10) y (2.11), sólo que en este caso:

$D_1$  diámetro en la entrada de la contracción

$D_2$  diámetro a la salida de la contracción

$V_1$  velocidad a la entrada de la contracción

$V_2$  velocidad a la salida de la contracción

Al sustituir los valores de V y D en la ecuación 2.12 resulta que

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{9.81 \times (0.0814)}{1.190}}$$

de donde  $\theta \approx 39^\circ$ .

Como puede observarse, el ángulo con el que se diseñó estas piezas ( $\theta = 14^\circ$ ) es menor que el que marcan los criterios para la ampliación ( $20^\circ$ ) y la contracción ( $39^\circ$ ), por lo que no se producirán problemas de separación del flujo o pérdidas de carga excesivas.

#### 6.- Zona de observación ( Pieza de acrílico )

De las experiencias que se tuvieron con la primera instalación, se llegó a la conclusión de que la zona de observación debe conjuntar ciertas características operacionales, relacionadas con una fácil manufactura, siendo éstas las siguientes:

- a.- Debido a que se trata de la zona en donde se llevarán a cabo las observaciones y pruebas con el equipo de velocimetría láser, esta parte de la instalación deberá estar integrada por una pieza de material transparente, relativamente resistente
- b.- La zona de observación, además, deberá ser de una sola pieza, ya que anteriormente estaba constituida por tres partes las cuales permitían, en los puntos donde se acoplaban unas con otras, la acumulación de aire. Existía además el problema de que estas piezas no se manufacturaron de acuerdo a las necesidades de la instalación preliminar, sino que se usaron piezas que

- ya existían con el inconveniente de que el diámetro de estas no se ajustaba a ninguno comercial, siendo el más próximo el de 4"
- c.- En relación a la forma de la sección transversal, resulta más sencillo por su manufactura y conveniente para las observaciones y para las mediciones con el equipo láser, que ésta sea cuadrada
- d.- La pieza que conforme la zona de pruebas deberá contar en el extremo aguas arriba con una longitud suficiente de tal forma que cualquier efecto de turbulencia, ocasionado por los accesorios que conforman la instalación, alcancen a ser dispersados antes de llegar al codo en donde se pretende alojar burbujas de aire para su observación. Para tal efecto, la porción anterior al codo deberá contar con una longitud igual a 10 veces el lado de la sección transversal
- e.- Para los efectos de llenado y vaciado, así como la inclusión de volúmenes de aire para las pruebas, deben existir suficientes tomas de aire alojadas a lo largo de la pieza.

Basándonos en lo anterior, la pieza de acrílico tiene las siguientes características

(figura 2.10):

- fabricada en acrílico transparente de 1 cm de espesor
- sección cuadrada de 10 cm de lado
- radio de curvatura igual a 1 m ( 45° de curvatura )
- bridas cuadradas en ambos extremos para acoplarse a dos piezas de idénticas

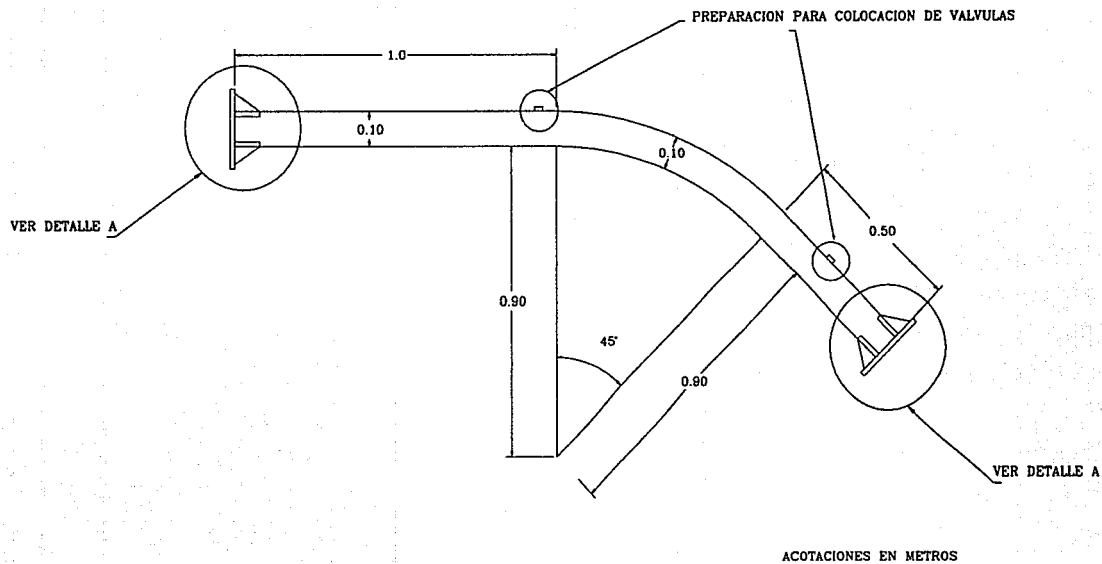


FIG. 2.10 DIMENSIONES DE LA PIEZA DE ACRILICO



dimensiones ( 23 x 23 cm )

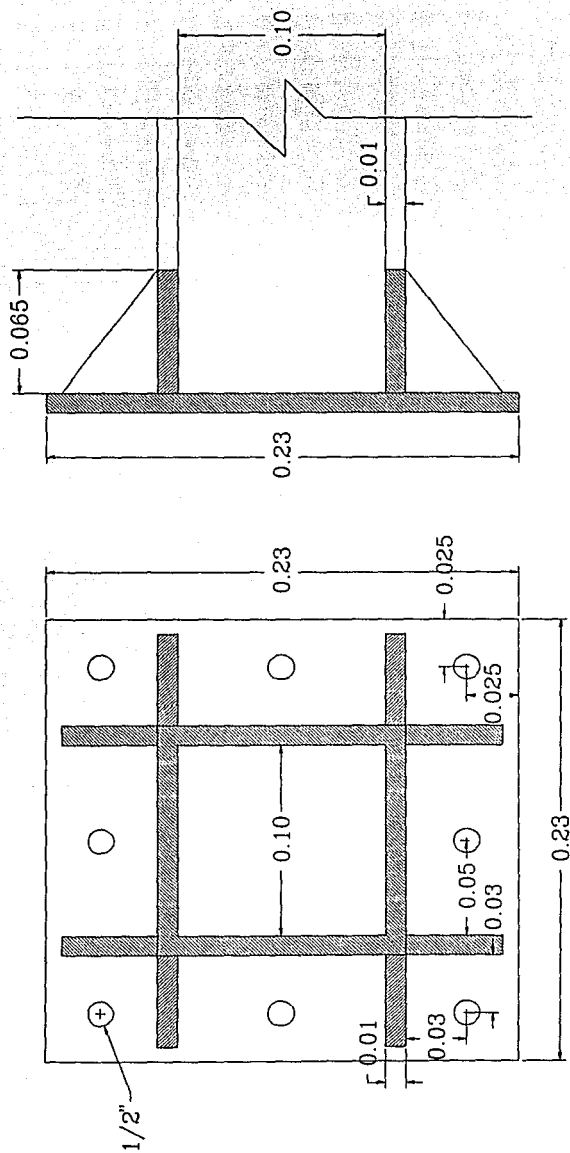
- las bridas cuentan con ocho barrenos de 1/2" de diámetro dispuestos como se indica en la figura 2.11
- en las zonas anterior y posterior al codo la pieza tienen una porción recta de 1 m y otra de 50 cm de longitud respectivamente
- tomas de presión, con la siguiente ubicación:
  - una en la pieza encargada de ampliar la sección
  - una en la contracción, al final de la pieza
  - dos colocadas a lo largo de la tubería a igual distancia una de otra.

El equipo de velocimetría láser que se empleó cuenta con dos mesas encargadas del ascenso o descenso del equipo según las necesidades de la prueba, con la finalidad de permitir esta operación la tubería de acrílico se encuentra montada sobre tres soportes metálicos dispuestos como se indica en la figura 2.12

## 7.- Tanque hidroneumático

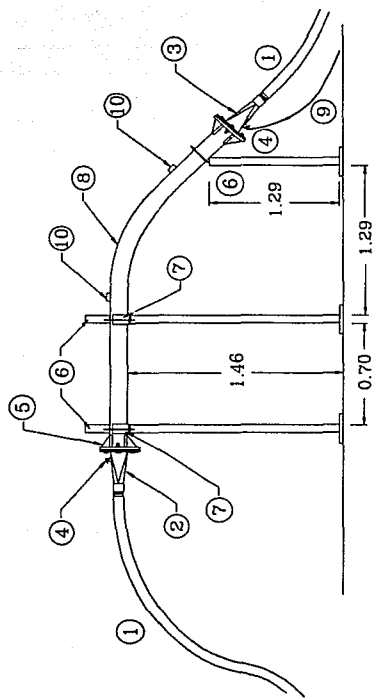
Una vez que el agua ha salido del codo ésta es conducida mediante piezas cuya descripción se hará posteriormente hacia un tanque hidroneumático cuya disposición obedece a dos razones principalmente.

- a.- Con el afán de incrementar la presión en la instalación, y por ende en la zona de observación, se decidió conducir al agua al tanque hidroneumático cuya operación está en función del porcentaje de apertura de la válvula ubicada



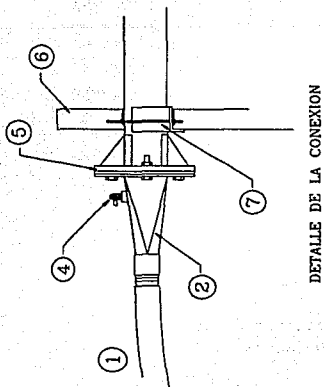
ACOTACIONES EN METROS

FIG. 2.11 DETALLE "A" DE LA PIEZA DE ACRILICO



NOMENCLATURA:

- 1.- MANGUERA FLEXIBLE 2"
- 2.- DIFUSOR GRADUAL METALICO
- 3.- CONTRACCION GRADUAL METALICA
- 4.- VALVULA PARA ADMISION Y EXPULSION DE AIRE
- 5.- BRIDA DE ACRILICO

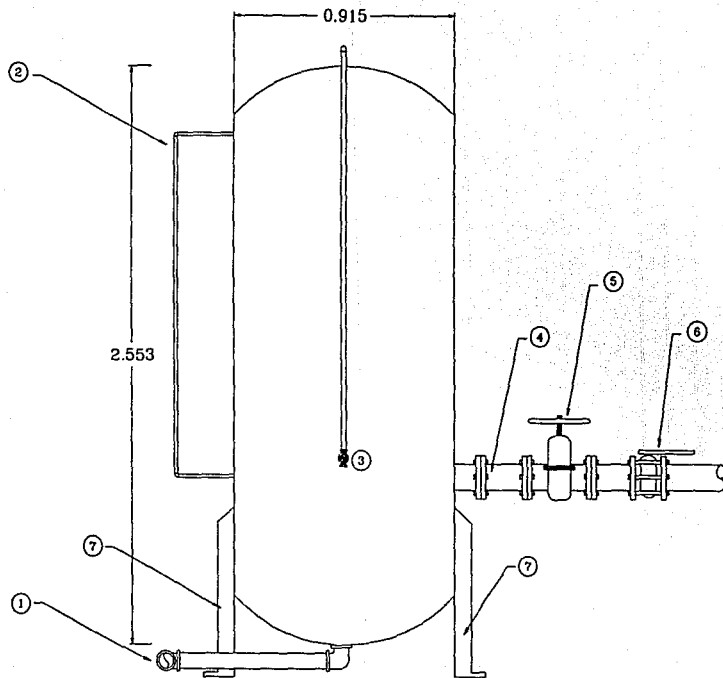


DETALLE DE LA CONEXION

- 6.- SOPORTES METALICOS
- 7.- SOPORTES DE MADERA
- 8.- PIEZA DE ACRILICO
- 9.- MANGUERA PARA VACIADO DE LA PIEZA DE ACRILICO
- 10.- PREPARACIONES PARA COLOCACION DE VALVULAS

ACOTACIONES EN METROS

FIG. 2.12 VISTA LONGITUDINAL DE LA ZONA DE OBSERVACION



NOMENCLATURA:

- 1.- TUBERIA DE ENTRADA 2"
- 2.- MANGUERA INDICADORA DE NIVEL
- 3.- TUBERIA PARA ADMISION Y EXPULSION CONTROLADA DE AIRE 1/2"
- 4.- TUBERIA DE ACERO GALVANIZADO 6" (HACIA CARCAMO DE DESCARGA)
- 5.- VALVULA DE COMPUERTA 6"
- 6.- VALVULA DE MARIPOSA 6"
- 7.- SOPORTES METALICOS

NOTAS:

ACOTACIONES EN m  
 CAPACIDAD DEL TANQUE 1500 lt  
 PRESION DE TRABAJO 20 Kg/cm<sup>2</sup>

FIG. 2.13 ESQUEMA DEL TANQUE HIDRONEUMATICO

en la descarga, es decir el nivel y por lo tanto la presión y la carga contra la que la bomba tiene que operar, se incrementarían en la medida que la válvula se cierre y viceversa

- b.- Como se mencionó en el principio de la sección II.2, uno de los requisitos para la construcción y montaje de la instalación es acoplarse a los elementos que existen en el laboratorio

En la zona que se eligió para la ubicación de la instalación existen otros sistemas cuyo funcionamiento impide la remoción de aquellos elementos que se adaptan a nuestras necesidades, obligándonos a acoplarnos a éstos.

El tanque es de acero, de forma cilíndrica, tiene una capacidad de 1500 litros, un diámetro de 0.915 m, una altura de 2.553 m y puede resistir presiones de hasta 20 Kg/cm<sup>2</sup> (figura 2.13), que para los objetivos de este estudio, resultan suficientes ya que la presión de las pruebas limita tanto la capacidad del acrílico como la del pegamento empleado para su manufactura.

### **8.- Mangueras, válvulas y demás piezas que conforman la instalación**

Una de los problemas que se presentaron cuando se construyó la primera instalación fue el armado de la tubería de PVC, ya que aunque esta representa una ventaja por la flexibilidad del material con que está hecha en comparación con el acero, no es fácil lograr un acoplamiento entre las piezas. Esto se debe a que las

perforaciones destinadas a los tornillos que tienen las bridas que fueron colocadas en los extremos de estas, pocas veces coincidían exactamente, de tal forma que no se garantizaba la impermeabilidad y hermetismo que éste tipo de trabajos requiere.

Por su importancia la zona de observación, dentro de los componentes del sistema, determinó tanto la ubicación como las características operativas y constructivas de los dispositivos encargados tanto de suministrar agua a esta zona como de desalojarla, de tal forma que una vez determinado el sitio definitivo donde se encontraría ésta, las otras piezas debían integrarse fácilmente. La manera de unir las piezas rígidas (de fierro galvanizado) al codo de acrílico fue mediante dos mangueras de 2" de diámetro, ya que además de proporcionar flexibilidad, en términos constructivos, permite un fácil montaje y desmontaje lo cuál redundaría en rapidez y eficiencia para el constructor, sin afectar los objetivos del estudio.

Existen a lo largo de la instalación las siguientes válvulas:

- 4 válvulas de globo 2"
- 2 válvulas de mariposa 4"
- 1 válvula de compuerta 4"

La ubicación de las válvulas es como a continuación se describe:

Una de las válvulas de globo se encuentra localizada en la tubería mediante la cuál la bomba succiona agua. Su finalidad es aislar al tanque cuando se pretenda darle mantenimiento al equipo de bombeo sin la necesidad de vaciarlos.

La siguiente válvula se encuentra entre la bomba y la placa orificio, ésta al igual que la que está después de la manguera de salida y antes del tanque hidroneumático

tienen por objeto aislar a la instalación y de esta manera protegerla cuando los demás sistemas construidos con otros fines se encuentren en operación.

Con la idea de darle mantenimiento a la instalación se colocó una válvula encargada de vaciar el sistema, localizada cerca del tanque hidroneumático.

Cuando la instalación se encuentra operando es necesario aislar los otros sistemas haciendo uso de una de las válvulas de mariposa de tal forma que toda el agua que el equipo es capaz de proporcionar sea únicamente empleada en nuestro estudio. Esta válvula se encuentra en la descarga de la bomba tal y como se ilustra en el croquis de la instalación (figura 2.3).

Como se describió en el punto anterior, la presión del sistema puede variarse como consecuencia del incremento o decremento del nivel de agua contenida en el tanque hidroneumático, aumentando o disminuyendo el porcentaje de apertura de la válvula de mariposa ubicada a la salida de éste.

Existen 3 pequeñas válvulas instaladas en la pieza de acrílico, la finalidad de estas es permitir la entrada y salida de aire durante las operaciones de vaciado y llenado de la tubería.

La última válvula por su importancia es la de compuerta, es de 6" y se encuentra a la salida del tanque hidroneumático.

### III.- Pruebas en la instalación experimental

Para el ingeniero hidráulico, relacionado con el campo de la investigación aplicada, reviste gran importancia el conocimiento preciso del campo de velocidades en cualquier tipo de flujo para su análisis y modelación teórica.

Durante el desarrollo de este estudio se empleó una de las técnicas experimentales más modernas para la medición de velocidades, la velocimetría láser.

En este capítulo se realiza una descripción del Velocímetro Láser Doppler (VLD), destacando sus principios de funcionamiento, operación e instalación así como el procedimiento que se siguió para realizar las mediciones con este equipo. Se presenta además la metodología empleada para la medición de la estabilidad de burbujas de aire en la instalación experimental.

#### III.1 Mediciones empleando el velocímetro láser

En el caso de las mediciones de velocidad, tradicionalmente se han utilizado diversos elementos que nos permiten medir los valores puntuales o medios de la velocidad dentro de un campo de flujo, algunos de estos instrumentos son: flotadores superficiales, flotadores sumergidos, flotadores de cuerda inclinada, tubos de Pitot y Prandtl, molinetes, medidores magneto-hidrodinámicos, etc. Sin embargo estos dispositivos presentan inconvenientes, algunos sólo nos dan una idea de la



velocidad media, otros proporcionan la velocidad en forma más o menos puntual pero implican la introducción de algún elemento ajeno al flujo que en general puede alterarlo y, finalmente, la gran mayoría de ellos requiere calibración previa.

El equipo de velocimetría láser empleado durante el desarrollo de este trabajo, tiene entre otras las siguientes ventajas:

- a) Proporciona valores puntuales de la velocidad media o instantánea en una dirección dada.
- b) No introduce ningún elemento al flujo que altere su comportamiento.
- c) No requiere calibración previa y con él se puede cubrir un amplio rango de velocidades.

Sus únicas desventajas consisten en que se trata de un equipo de precisión que requiere una cuidadosa operación, así como la preparación de la sección de medición tal y como se describió en el capítulo anterior, que lo convierte en un equipo de difícil aplicación en campo.

#### **Principio de funcionamiento del Velocímetro Láser Doppler (VDI)**

El velocímetro láser se forma de una fuente de luz láser, un separador que divide en dos al haz principal, generando un par de rayos paralelos los cuales pasan

a través de una lente convergente que los hace cruzarse a la distancia focal de dicha lente. La intersección de los dos rayos define lo que será el volumen de medición, el cuál es observado por un fotodetector electrónico que manda la señal a un procesador.

El funcionamiento puede explicarse usando dos modelos, el primer conocido como " modelo de rendijas o franjas " y el segundo que se debe al corrimiento de frecuencia por efecto Doppler.

El modelo de rendijas toma en cuenta el efecto de la intersección de dos rayos con la misma frecuencia y la misma fase, los cuales forman un patrón de interferencia, produciéndose una serie de franjas luminosas alternadas con franjas oscuras (figura 3.1). Estas franjas están separadas por una distancia  $\Delta x$  que depende de  $\lambda$  (longitud de onda del láser) y de la mitad del ángulo que forman los dos rayos que forman el volumen de medición ( $\alpha$ ).

Las partículas en suspensión en el fluido que atraviesan las franjas en dirección perpendicular, radían luz en forma discontinua, con una frecuencia que depende directamente de la velocidad de éstas, es decir  $f = U_1/\Delta x$ , de donde  $U_1 = f\Delta x$ . Tomando un láser y un ángulo adecuados se tendrán  $\Delta x$  pequeños y se podrán observar partículas del orden de las micras, para las cuales se acepta que su velocidad representa adecuadamente la velocidad del fluido.

El otro modelo considera el corrimiento en frecuencia por efecto Doppler,

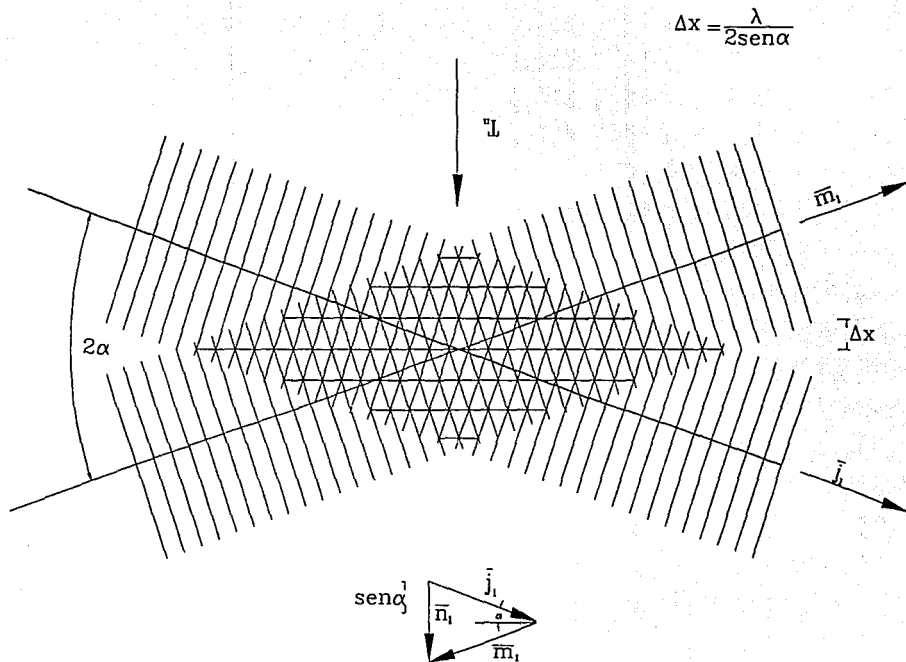


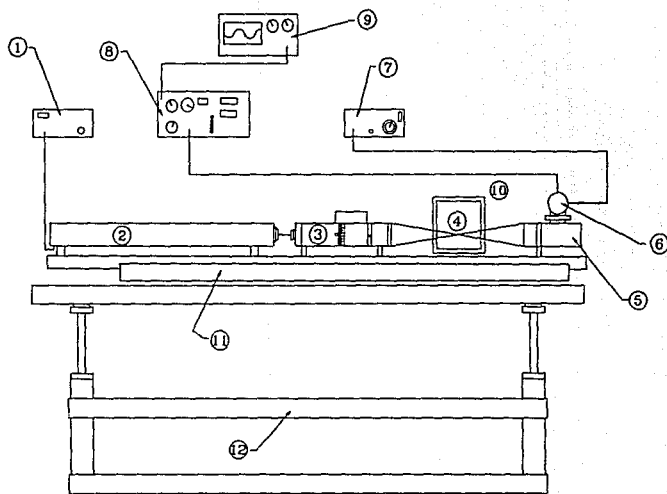
FIG. 3.1 EFECTO DE LA INTERSECCION DE DOS RAYOS LASER CON LA MISMA FRECUENCIA

que se produce en la luz radiada por las partículas. Dicho corrimiento se obtiene debido a que al atravesar la partícula el volumen de medición se convierte en un receptor de luz y posteriormente, al reflejar dicha luz, en una fuente en movimiento. Considerando las velocidades relativas entre la partícula y las velocidades de propagación de los rayos se obtiene un cambio de frecuencia de la luz radiada. Dado que el efecto Doppler cuantifica la variación de la frecuencia en función de la velocidad, relativa entre una fuente en movimiento y un observador, es posible demostrar que habrá un cambio en frecuencia para la luz recibida por el fotodetector, este cambio es de distinto signo para la luz proveniente del rayo m a la del rayo j, de manera que realizando un mezclado óptico que responda a la diferencia de frecuencias, se llega a la misma expresión que se obtuvo en el modelo de rendijas. Este modelo resulta más complicado pero ofrece algunas ventajas, ya que permite hallar expresiones sobre la relación señal a ruido y visibilidad de la señal recibida por el fotodetector [Refs. 3 y 4].

### Instalación del velocímetro láser

El Velocímetro Láser Doppler con que cuenta el Instituto de Ingeniería, es un TSI mod. 9100-3 de Helio - Neón, de 0.035 W, que permite medir valores medios o instantáneos con un rango de 0.01 a 100 m/s. Un arreglo típico de este aparato se muestra en la figura 3.2.

A continuación se hará una breve descripción del equipo en base a la numeración utilizada en la figura 3.2



#### NOMENCLATURA

- 1.- FUENTE DE PODER DEL LASER
- 2.- GENERADOR DE LUZ LASER
- 3.- MODULO EMISOR
- 4.- INTERSECCION DE LOS RAYOS
- 5.- MODULO RECEPTOR
- 6.- FOTODETECTOR
- 7.- FUENTE DE PODER DEL FOTODETECTOR
- 8.- PROCESADOR
- 9.- OSCILOSCOPIO
- 10.- SECCION DE MEDICION
- 11.- SOPORTE DEL LASER
- 12.- MESA DEL LASER

FIG. 3.2 INSTALACION DEL VELOCIMETRO LASER

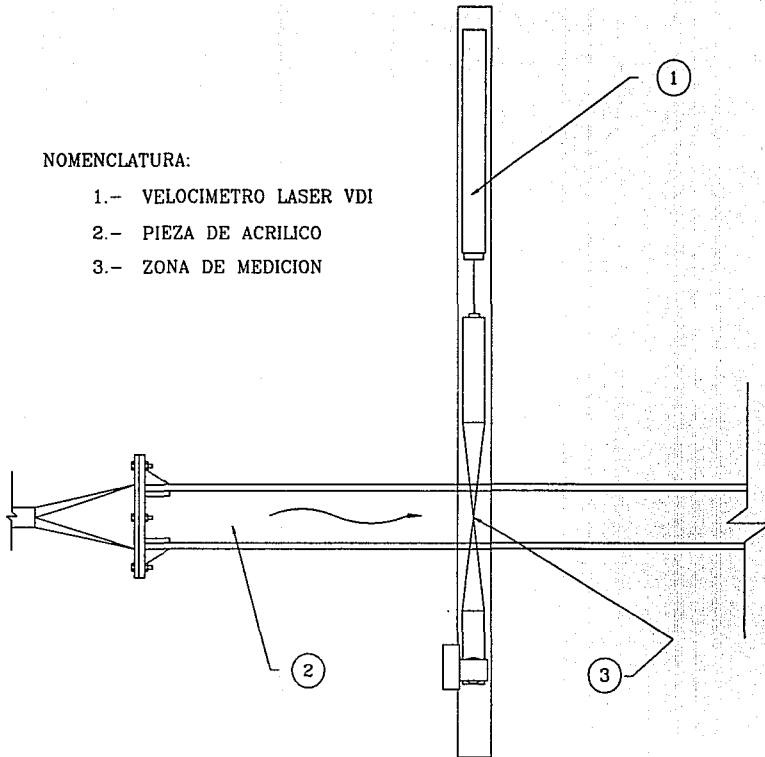


FIG. 3.3 PLANTA DE LA INSTALACION DEL VELOCIMETRO LASER

- 1) Fuente de poder láser
- 2) Generador de luz láser. Es aquí, donde se genera por un efecto resonante la luz láser de las características requeridas.
- 3) Módulo emisor. Contiene el divisor del rayo que hace la separación de estos igual a 50 mm y la lente emisora con una distancia focal de 250 mm y un ángulo de convergencia de  $5.7^\circ$ .
- 4) Intersección de los rayos. Volumen en donde se realiza la medición.
- 5) Módulo receptor. Donde se encuentra la lente receptora que enfoca el volumen de medición.
- 6) Fotodetector. Es el elemento que recibe la señal luminosa y la transforma en señal eléctrica.
- 7) Fuente de poder del fotodetector.
- 8) Procesador. Permite el muestreo y procesamiento de la señal hasta obtener la velocidad media o instantánea.
- 9) Osciloscopio. Permite la visualización de la señal de entrada al procesador.

- 10) **Sección de medición.** Se trata de la sección de la conducción dentro de la cuál se desea medir la velocidad, sus paredes deben ser transparentes (como se describió anteriormente) y planas en el exterior.
- 11) **Soporte del láser.** Se compone de un riel que soporta al generador y los módulos, emisor y receptor, y tiene la finalidad de permitir el movimiento del volumen de medición dentro de la sección de interés.
- 12) **Mesa del láser.** Consta de una mesa rígida con apoyos ajustables e independientes que permiten la alineación entre el rayo y la sección de medición.

### **Medición de velocidad**

A continuación se explica el procedimiento para la medición de velocidad empleando el equipo antes descrito:

Se realizaron cuatro pruebas, tres de ellas en la sección en donde comienza el codo y la otra a una distancia de 10 cm (longitud igual a un lado de la tubería) aguas arriba de donde se hicieron las primeras mediciones. El rango de variación del gasto se encuentra entre 1 y 3.3 l.p.s.. El hecho de haber determinado estas zonas como secciones de medición obedece a que es precisamente en ese tramo de la instalación en donde comienzan a existir modificaciones del perfil de velocidades por efecto de la curvatura de la tubería de acrílico y en donde se



previó, en base a experiencias anteriores, que se alojarían los volúmenes de aire inyectados.

La manera de realizar las mediciones se basó en las necesidades descritas a continuación:

- 1.- La naturaleza de las burbujas de aire. Dado que por su densidad, el aire tiende a alojarse en los puntos altos tanto de la tubería como de la conducción; se planteó la idea de medir en puntos tan próximos a las paredes de la tubería como el equipo y la misma pieza de acrílico lo permitieran
- 2.- El desplazamiento del volumen de medición. Las maniobras que permiten desplazar el volumen de medición del láser tanto en la dirección vertical como horizontal se realizaron con la ayuda del riel sobre el que descansa el láser (permite el control del desplazamiento en la dirección horizontal) y la mesa sobre la que está colocado todo el equipo (permite controlar el desplazamiento en la dirección vertical). Sin embargo estas operaciones precisan de mucho cuidado ya que de no ser así el volumen de medición no se encontrará en el punto deseado

De aquí que surgiera la idea de medir siguiendo el patrón que indica la malla de la figura 3.4., en donde cada intersección de las líneas de la figura equivale a un punto de medición. Las mediciones se realizaron tomando los datos correspondientes a una misma coordenada "y" y diferentes "x" (por renglones) ya que resulta más sencillo el desplazamiento de la intersección de los rayos en el

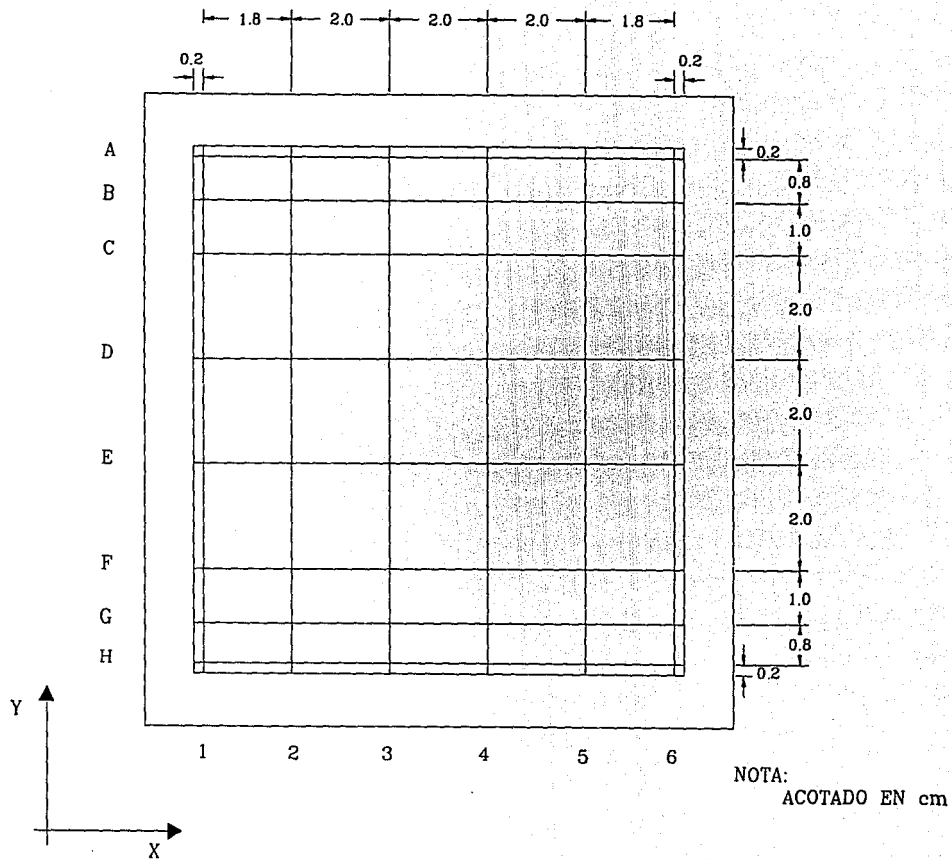


FIG. 3.4 PATRON DE MEDICION EMPLEADO

sentido horizontal que en el vertical. Los desplazamientos se controlaron de la siguiente manera:

- Para controlar la dirección horizontal se usó el vernier que se encuentra en el riel sobre el cual está montado el láser. Se tomó la lectura de ambas paredes y, en base a estas y a la ubicación de los puntos en donde se deseaba conocer la velocidad, se desplazaba el riel hasta hacer coincidir al vernier con la lectura deseada.

- El desplazamiento en la dirección vertical se controló empleando un esquema colocado en un costado de la tubería, sobre el que se dibujaron las líneas con las que debían coincidir los haces emitidos por el equipo y que correspondían a las coordenadas en "y" preestablecidas (figura 3.5).

Es importante mencionar que la manufactura de la pieza de acrílico se llevó a cabo en los talleres del Instituto, y aunque la habilidad de las personas que la fabricaron es grande, el pegamento que emplearon corroyó una parte de las paredes, sobre todo en las proximidades al lomo y al lecho de la tubería, lo que ocasiona refracciones del haz láser y por ende lecturas erróneas de la velocidad. En algunos casos esto obligó a que el volumen de medición se desplazara hasta el punto en donde el rayo láser no sufriera perturbación alguna.

Las tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 ilustran los datos obtenidos durante las mediciones con el equipo láser, así como la lectura del limnómetro y el gasto correspondiente proporcionado por el vertedor triangular.

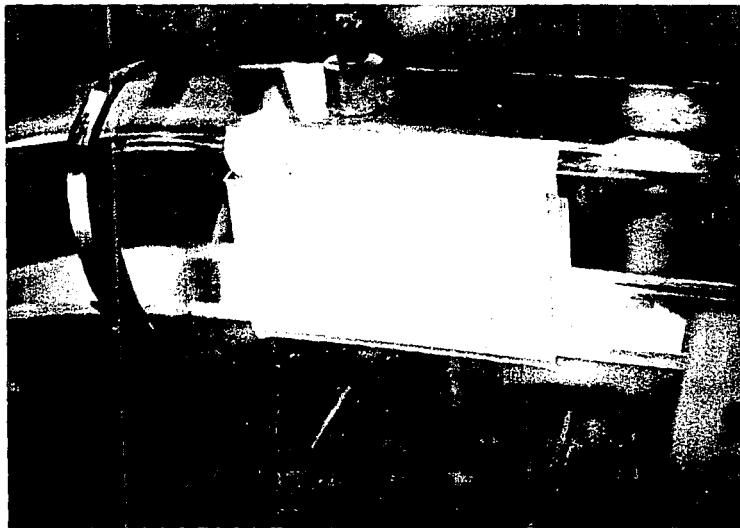


FIG. 3.5 ESQUEMA EMPLEADO PARA LA ALINEACION VERTICAL DEL EQUIPO LASER

TABLA 3.1

Prueba: 1  
 Sección transversal: 1  
 Lectura derecha: 20.44 cm  
 Lectura izquierda: 12.96 cm  
 Dif. de lecturas: 7.48 cm

Fecha: 25/11/93  
 $h_{\text{med}}: 0.256 \text{ m}$   
 $T_i: 18 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $T_r: 18 \text{ }^\circ\text{C}$

$h_{im}$ (m)	$h$ (m)	$Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$V$ (m/s)
0.187	0.072	0.001082	0.1082

COL	LEC	x/B	$v_A$	$v_B$	$v_C$	$v_D$	$v_E$	$v_F$	$v_G$	$v_H$
1	13.11	0.02	0.022	0.037	0.041	0.043	0.078	0.095	0.087	0.065
2	14.45	0.20	0.056	0.110	0.116	0.124	0.126	0.127	0.119	0.095
3	15.95	0.40	0.055	0.113	0.120	0.131	0.132	0.137	0.133	0.100
4	17.44	0.60	0.073	0.111	0.125	0.132	0.136	0.136	0.133	0.100
5	18.94	0.80	0.085	0.115	0.120	0.124	0.127	0.128	0.124	0.091
6	20.29	0.98	0.042	0.063	0.067	0.070	0.073	0.071	0.159	0.052

TABLA 3.2

Prueba: 2  
 Sección transversal: 1  
 Lectura derecha : 10.00 cm  
 Lectura izquierda: 7.40 cm  
 Dif. de lecturas: 7.40 cm

Fecha: 25/III/93  
 $h_{lim}: 0.256 \text{ m}$   
 $T_i: 18 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $T_r: 18 \text{ }^\circ\text{C}$

$h_{lim}$ (m)	$h$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$V$ (m/s)
0.1639	0.0951	0.00218	0.2180

COL	LEC	x/B	$v_A$	$v_B$	$v_C$	$v_D$	$v_E$	$v_F$	$v_G$	$v_H$
1	10.15	0.02	0.103	0.185	0.087	0.084	0.090	0.154	0.178	0.128
2	11.48	0.20	0.167	0.221	0.233	0.240	0.231	0.240	0.233	0.200
3	12.96	0.40	0.209	0.218	0.237	0.245	0.250	0.251	0.237	0.213
4	14.44	0.60	0.207	0.224	0.243	0.251	0.254	0.248	0.239	0.212
5	15.92	0.80	0.205	0.215	0.235	0.243	0.250	0.240	0.238	0.195
6	17.25	0.98	0.145	0.150	0.151	0.166	0.183	0.207	0.182	0.175

TABLA 3.3

Prueba: 3  
 Sección transversal: 1  
 Lectura derecha: 10.00 cm  
 Lectura izquierda: 17.46 cm  
 Dif. de lecturas: 7.46 cm

Fecha: 26/II/93  
 $h_{ms}$ : 0.256 m  
 $T_i$ : 17 °C  
 $T_r$ : 17 °C

$h_{im}$ (m)	$h$ (m)	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$V$ (m/s)
0.1475	0.1115	0.003261	0.3261

COL	LEC	x/B	$v_A$	$v_B$	$v_C$	$v_D$	$v_E$	$v_F$	$v_G$	$v_H$
1	10.15	0.02	0.200	0.210	0.175	0.188	0.275	0.280	0.234	0.180
2	11.49	0.20	0.305	0.315	0.328	0.350	0.352	0.355	0.335	0.308
3	12.98	0.40	0.300	0.324	0.345	0.355	0.368	0.362	0.363	0.324
4	14.48	0.60	0.307	0.330	0.340	0.362	0.372	0.375	0.358	0.321
5	15.97	0.80	0.320	0.327	0.342	0.360	0.362	0.352	0.341	0.302
6	17.31	0.98	0.278	0.290	0.280	0.306	0.297	0.280	0.284	0.240

TABLA 3.4

Prueba: 4  
 Sección transversal: 2  
 Lectura derecha: 10.00 cm  
 Lectura izquierda: 7.30 cm  
 Dif. de lecturas: 7.30 cm

Fecha: 2/III/93  
 $h_{lim}: 0.256 \text{ m}$   
 $T_a: 16 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $T_r: 17 \text{ }^\circ\text{C}$

$h_{lim}$ (m)	$h$ (m)	$Q$ (m <sup>2</sup> /s)	$V$ (m/s)
0.1677	0.091	0.001960	0.1960

COL	LEC	x/B	$v_A$	$v_B$	$v_C$	$v_D$	$v_E$	$v_F$	$v_G$	$v_H$
1	10.15	0.02	0.151	0.162	0.173	0.161	0.133	0.091	0.102	0.060
2	11.46	0.20	0.177	0.201	0.215	0.212	0.143	0.187	0.179	0.157
3	12.92	0.40	0.176	0.205	0.216	0.230	0.225	0.221	0.206	0.182
4	14.38	0.60	0.182	0.203	0.219	0.225	0.226	0.224	0.214	0.178
5	15.84	0.80	0.181	0.202	0.215	0.217	0.217	0.209	0.204	0.173
6	17.15	0.98	0.159	0.169	0.178	0.192	0.097	0.080	0.090	0.079



Con afán de mostrar de una manera más clara los datos capturados en las tablas, las figuras 3.6, 3.7, 3.8, y 3.9 indican para cada punto de medición determinado en la figura 3.4, el valor de velocidad que le corresponde.

En las tablas se debe observar que:

- La sección transversal 1 se refiere a la sección en donde comienza la curvatura de la pieza de acrílico, la 2, se encuentra ubicada 10 cm aguas arriba de la sección 1.

- Siendo la sección transversal de 10 cm de lado, la diferencia de las lecturas (lectura izquierda y lectura derecha) tomadas con el vernier que descansa sobre el riel del equipo no coincide con el ancho de la tubería. La razón por la que aparentemente disminuye el ancho de la conducción obedece a fenómenos ópticos relativos a la refracción de la luz láser dentro de un medio (acrílico - agua - acrílico) y observado desde otro (aire). Sin embargo esto no afecta las mediciones o su ubicación, ya que dada la diferencia de lecturas (menor a 10 cm) y las posiciones reales del volumen de medición se realizaron cálculos que permitieron conocer los desplazamientos que el vernier debía marcar, por ejemplo:

De la tabla 3.2, la diferencia de lecturas fue de 7.40 cm. La columna 4 se encuentra exactamente a 6 cm de la pared izquierda, la columna x/B indica que es 0.60 de la longitud real de la sección transversal, de esta manera el 60% de la diferencia registrada es  $0.60 \times 7.40 = 2.96$  cm, esta distancia se le suma a la lectura izquierda y se obtiene el desplazamiento real del vernier, es decir 12.96 cm.

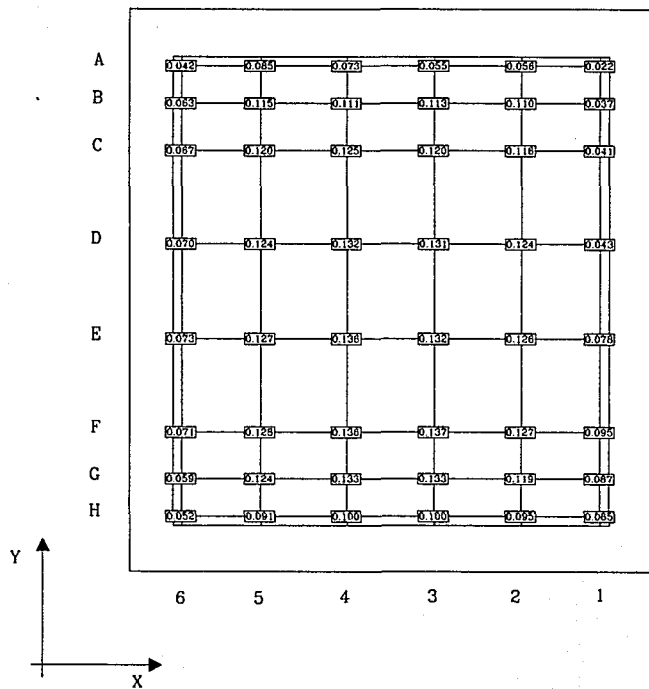


FIG. 3.6 DATOS DE LA TABLA 3.1

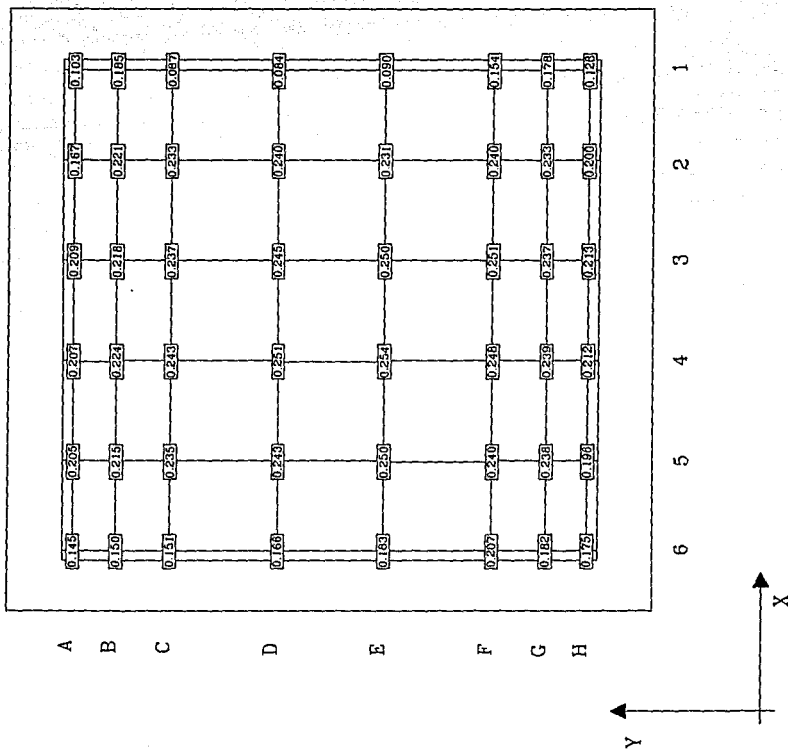


FIG. 3.7 DATOS DE LA TABLA 3.2

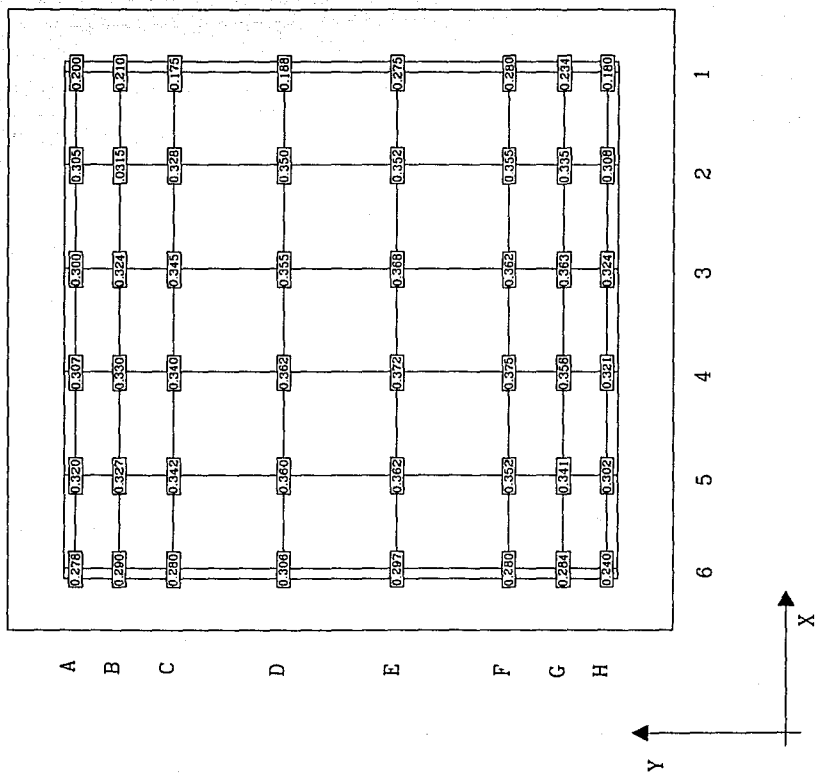


FIG. 3.8 DATOS DE LA TABLA 3.3

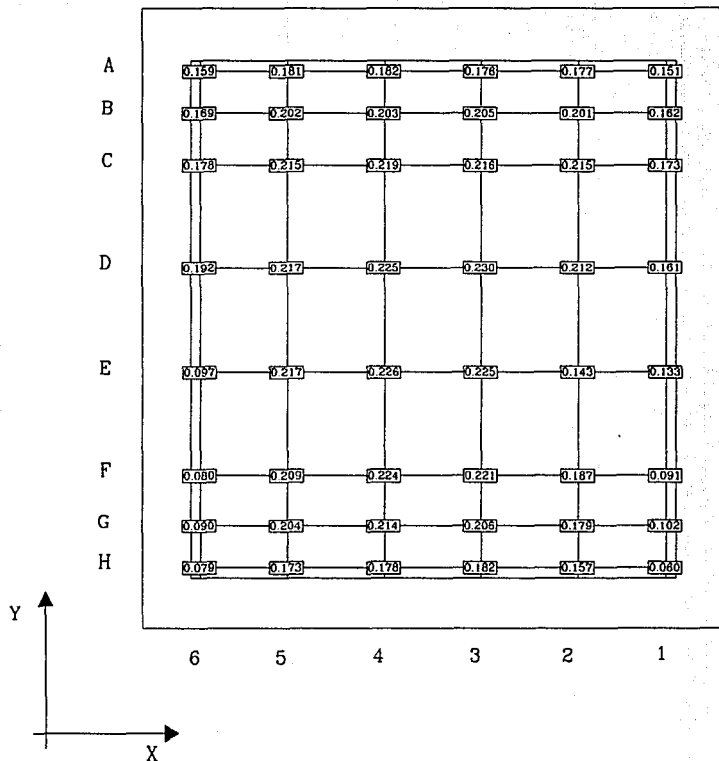


FIG. 3.9 DATOS DE LA TABLA 3.4

- Las columnas con título  $v_A$ ,  $v_B$ , etc. indican el renglón en el cuál se tomó la lectura como lo indican las figuras 3.4 y 3.5. Es importante aclarar que aunque el origen (coordenada 0,0) de las mediciones coincide con la esquina inferior izquierda de la tubería si se observa al sistema en el sentido contrario al del flujo, el punto más cercano al origen no es el (A, 1), como se podría suponer, sino el punto (H,6). Esto se debe a que resultaba más fácil para el operador del equipo la captura de los datos tomando como origen la esquina superior izquierda, ya que durante las pruebas, este se encontraba viendo a la tubería en el sentido del flujo.

### III.2 Pruebas realizadas con burbujas de aire

Es importante mencionar que el objetivo de estas pruebas fue conocer la(s) forma(s) y tamaño(s) de las burbujas así como las variaciones de estas características, la posición respecto de un punto predeterminado, y el rango de velocidades para el cuál el comportamiento se modificaba o bien se arrastraba la burbuja.

En relación a las observaciones realizadas con la inclusión de aire en la conducción, la metodología fue la siguiente:

- Partiendo de los objetivos perseguidos y de los resultados de las pruebas realizadas con aire en la primera instalación, se determinó que lo más conveniente sería inyectar aire desde un punto ubicado más abajo de donde se pensaba que las burbujas se alojarían. De aquí que de las preparaciones para tomas de presión

colocadas durante la fabricación de la pieza de acrílico se aprovechó la que se encuentra más cercana al final de la tubería. En la toma seleccionada fue colocada con silicón una aguja de uso médico (figura 3.10), a la que posteriormente se le adaptó una jeringa de 12 c.c. y con la cuál, previamente medido en la escala que indica la misma, se introdujeron distintas cantidades de aire.

- Una vez que el aire se encontraba dentro de la tubería, con el inversor con que cuenta el motor de la bomba se hacía variar el gasto lentamente y con incrementos pequeños del mismo, anotando en cada caso los parámetros de interés hasta que el flujo lograra deshacer y posteriormente arrastrar a las burbujas.

- Tanto al iniciarse las pruebas, como entre una y otra, la tubería tenía que encontrarse completamente limpia de aire ya que de no ser así las pequeñas burbujas, que por su tamaño no eran arrastradas por el flujo, aumentarían el volumen de las que posteriormente serían introducidas para su observación.

- En un principio el aforo del gasto se realizó con el vertedor triangular, posteriormente con el objeto de realizar un mayor número de pruebas, el gasto se midió con la placa orificio y el ajuste hecho para esta (sección II.2), ya que como se explicó en el capítulo anterior la velocidad de respuesta al registrar los cambios del gasto entre ambos dispositivos de aforo es significativa.

- Para determinar la posición y ubicación de las burbujas de aire se empleó una malla con cuadrícula de  $1 \text{ cm}^2$ , del ancho de la tubería y con una longitud de 75 cm

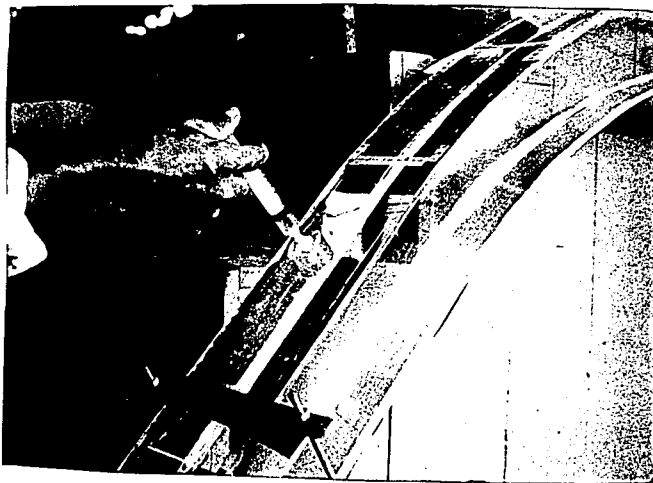


FIG. 3.10 PREPARACION DE LA TUBERIA PARA LA INCLUSION DE VOLUMENES DE AIRE



colocada en la parte superior y por el exterior de esta en la parte curva de la pieza de acrílico. La malla cuenta en sus extremos con una numeración que asciende conforme nos acercamos al final de la pieza. La posición y dimensiones de las burbujas se basó en dos ejes ortogonales coordenados con origen en la esquina superior izquierda de la malla (figura 3.1 1). Debido al área que forma la burbuja al estar en contacto con las paredes de la conducción, la ubicación de estas se determinó considerando la posición del centro de las mismas.

- Las fuertes variaciones en dimensiones, ubicación y demás características de las burbujas, obligaron a que las observaciones fueron meramente cualitativas e instantáneas, con el inconveniente de que la posición de la burbuja en un instante no corresponde a la forma que se observó en ese momento, sino a una fracción de tiempo posterior.

- Los volúmenes medidos en la jeringa no son los mismos que en el interior de la tubería, independientemente de las pequeñas pérdidas por arrastre, ya que el hecho de que en el interior de la tubería la presión es mayor que la atmosférica esto provoca una reducción en el volumen de aire introducido.

Se realizaron 52 pruebas, los datos obtenidos se muestran en la tabla 3.5, en donde:

- a, es la dimensión perpendicular al flujo
- l, dimensión de la burbuja que coincide con el eje longitudinal de la conducción

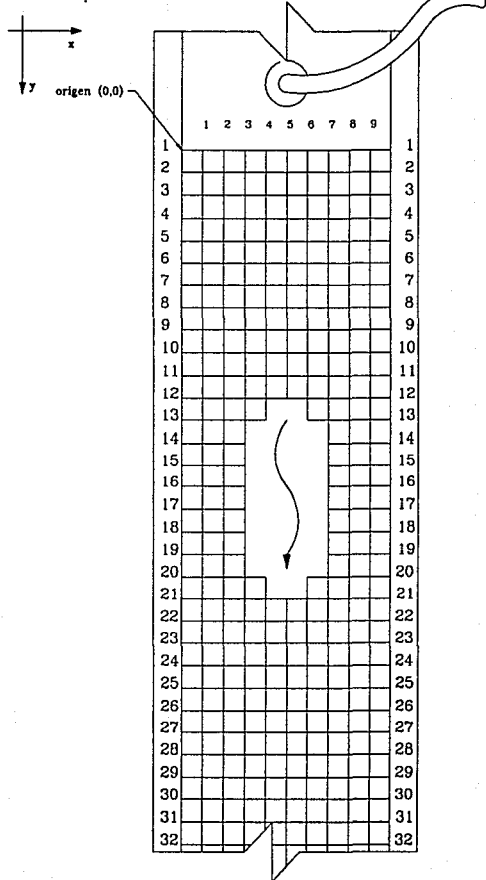


FIG. 3.11 ESQUEMA DE LA MALLA EMPLEADA PARA LA DETERMINACION DE LAS DIMENSIONES Y UBICACION DE LAS BURBUJAS.

- x, distancia perpendicular al flujo, tomada desde la pared izquierda de la tubería y hasta el centro de la burbuja (figura 3.11)
- y, distancia perpendicular a x, con origen en donde empieza la curvatura de la pieza de acrílico y, también tomada hasta el centro del volumen de aire

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

TABLA 3.5

Pueba #	Vol. aire c.c	dimensiones (cm)		ubicación		$\Delta h$	Q (l.p.s.)
		a	l	x	y		
1	1	2	2	1	3	6.8	1.36
2		<2	>2	1	4	9.5	1.61
3		>2	>1	1	5	12.8	1.87
4		>2	1	2	11	16.5	2.12
5		3	2	4	15	21.9	2.45
6		2	2	1	5	8.7	1.54
7		2	2	1	7	14.5	1.99
8		2.5	2.5	2	13	22.7	2.49
9		•	•	•	•	32.3	2.97
10	2	3	2	1.5	4	8.7	1.54
11		3	2	1.5	6	14.1	1.96
12		4	1	2	12	22.5	2.48
13		3	1.5	inestable	17	26.2	2.68
14		3	2.1	1.5	4	8.90	1.56
15		3.5	2	2	7.5	16.75	2.14
16		2.8	>3	5	16	26.2	2.68
17	3	3	>2	1	3	7.6	1.44
18		>3	2.5>l>2	2	5	10.1	1.66
19		4>a>3	2.5>l>2	2	6	13	1.89
20		5>a>4	<2	2.5	7	16.6	2.13

TABLA 3.5

Pueba #	Vol. aire c.c	dimensiones (cm)		ubicación		$\Delta h$	Q (l.p.s.)
		a	l	x	y		
21	3	4	<2	5	9	19.8	2.33
22		•	•	•	•	23.3	2.52
23	4	4	3	2	3.3	8.9	1.56
24		4.5	2.5	2.5	6	16.75	2.14
25		5	2.5	4	12	26.1	2.67
26		5	2.5	6	15	31.39	2.93
27	5	5	3	2	3.5	12.8	1.87
28		5	2.5	3	6	16.6	2.13
29		•	•	•	•	31.4	2.93
30	6	5	3	2.5	2	8.3	1.51
31		>5	<3	2.5	3	10.9	1.73
32		<6	<3	4	5	14.3	1.98
33		$6.5 < a < 6$	<2.5	4	5	17.5	2.19
34		>6.5	<2.5	5	6.5	21.1	2.40
35		5	3	2.5	3	12.51	1.85
36		6	2.5	6	7	21.1	2.40
37		5	3	5	12	28.9	2.81
38	9	6	3.5	3	1.5	9	1.57
39		6	3.5	3	3	12.13	1.82
40		6	3.5	3	3.5	14.6	2.0

TABLA 3.5

Pueba #	Vol. aire c.c	dimensiones (cm)		ubicación		$\Delta h$	Q (l.p.s.)
		a	l	x	y		
41	9	7	<2.5	5	4.5	16.9	2.15
42		7	<2.5	5	5	19.7	2.32
43		8	1.5	5	6	24	2.56
44	12	6	4	3	1	8.3	1.51
45		8	3	4	3	10.4	1.69
46		9	2.5	5	3	13.8	1.94
47		9	2.5	5	4.5	16.7	2.14
48		10	2.5	6	4.5	19.4	2.3
49	16	9	3	5	3.5	18.4	2.24
50		10	4	5	5	26	2.67
51		8	3	6	9	34.4	3.10
52		*	*	*	*	40.4	3.31

\* Para los valores indicados de gasto tanto las dimensiones como la ubicación de la burbuja se perdieron por completo.

## **IV Análisis de resultados**

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en la instalación experimental, correspondientes tanto a la determinación de los perfiles de velocidades empleando el equipo de velocimetría láser como de las observaciones realizadas durante las pruebas, en donde se introdujeron volúmenes de aire en la tubería.

### **IV.1 Análisis de las mediciones con el equipo láser**

El análisis de los resultados de las mediciones con el equipo de velocimetría láser se realizó haciendo uso de un programa de computo para topografía llamado SURFER. Este programa permite la creación de gráficos tanto en dos planos como en tercera dimensión representativos, cuando se trata de dibujos en dos dimensiones, de un área con sus respectivas curvas de nivel equidistantes, y de un volumen (por ejemplo un cerro), cuando se trata de gráficas en tercera dimensión.

Existen diferencias radicales en cuanto a las gráficas que se obtuvieron si estas se comparan con planos topográficos, ya que en un plano de este tipo las curvas trazadas unen puntos de igual altitud respecto de un nivel base (el del mar, por ejemplo). En nuestro análisis las curvas representan zonas de igual velocidad puntual y el área bajo la superficie generada por la interpolación de estas representa al gasto, ya que:

$$Q = \iint v \, dA$$

Basándonos en la forma en que fue capturada la información durante el desarrollo de las pruebas, puede entonces asociarse a cada valor de velocidad medido un par de coordenadas correspondientes al punto en donde fue tomado ése valor, es decir, podemos hablar de un grupo de puntos  $x$ ,  $y$ , e  $z$ , en donde la coordenada " $x$ " se refiere a la distancia tomada sobre un eje perpendicular al flujo y paralela al lecho de la tubería, la " $y$ " representa a las abscisas del eje " $x$ ", y finalmente " $z$ " es la velocidad puntual correspondiente al desplazamiento del haz láser " $x$ " unidades horizontales y " $y$ " unidades verticales partiendo de un origen preestablecido (sección III.1).

Para la creación de las gráficas el programa precisa que los datos se introduzcan en forma de matriz de dimensión  $3 \times n$  (tres columnas por " $n$ " renglones).

Una vez generada la matriz con la que se alimenta al programa deberá especificársele a éste la precisión con la que deseamos realice primero la interpolación y posteriormente la graficación de los valores interpolados. El grado de precisión de una gráfica (entiéndase como la obtención de curvas más tenues, más redondas) está determinado tanto por el número de valores con que sea alimentado el programa, como por el tamaño de malla que se le indique a éste. El tamaño de la malla se refiere a que una vez procesados los datos de entrada, mediante la realización de un ajuste, el programa debe saber para cuantos valores deberá interpolar éste, de esta manera pueden obtenerse para los 52 datos



medidos en cada prueba mallas de 100 x 100 puntos o mayores. En nuestro caso para el análisis de las burbujas de aire, se obtuvieron gráficas correspondientes a malla de 25 x 25 puntos.

Entre los diferentes métodos de interpolación con que cuenta el SURFER, se eligió el denominado "Método de Kriging". Es un método que emplea técnicas geoestáticas para calcular la correlación entre los puntos [Ref. 5], produciendo una varianza mínima. En teoría, ningún otro método empleado para interpolar valores produce estimaciones tan confiables, sin embargo la precisión de éste método depende de varios parámetros, estos son estimados dependiendo de la forma de la malla.

Las curvas que el programa puede trazar son líneas equidistantes, tal y como sucede en topografía. En nuestro análisis las curvas de velocidad están a cada 0.10 m/s y las fronteras de las gráficas son los límites físicos que la tubería impone, es decir el área de la región es de  $0.010 \text{ m}^2$  para contornos de 0.10 metros por lado.

Para la obtención de gráficas en tercera dimensión el proceso es similar al anterior con la diferencia de que una vez obtenida la superficie se puede calcular fácilmente el volumen bajo esta. Teniendo en cuenta que si se realiza la integral de una superficie (la obtenida para la velocidad) sobre otra (aquella perpendicular al flujo y que pasa por el que se consideró como el origen) el volumen comprendido entre estas nos proporciona el gasto, como se mencionó anteriormente.

Las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 presentan los resultados de la graficación de las pruebas 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

En cada prueba el gasto se obtuvo de dos formas diferentes: empleando el vertedor triangular descrito en el capítulo II y el calculado mediante el uso del SURFER. La tabla 4.1 muestra los resultados de los cálculos del gasto así como el error que existe entre ellos considerando al dato proporcionado por el vertedor como el correcto.

Tabla 4.1

Prueba #	$Q_v$ (lps)	$Q_s$ (lps)	error (%)
1	1.082	1.095	1.200
2	2.180	2.179	0.045
3	3.261	3.286	0.210
4	1.960	1.913	2.450

En esta tabla:

$Q_v$  gasto proporcionado por el vertedor

$Q_s$  gasto calculado con el programa SURFER

Para realizar el análisis de la estabilidad de las burbujas de aire, mismo que posteriormente se explicará, se normalizaron los diagramas obtenidos anteriormente. La normalización de estos consistió en dividir los valores de

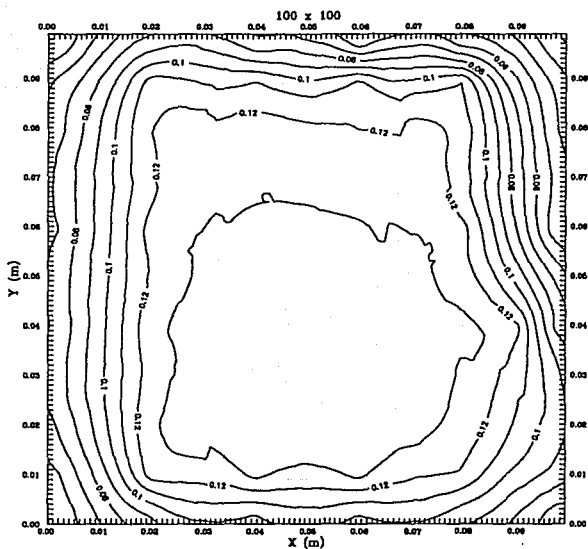


FIG. 4.1 DIAGRAMA DE VELOCIDADES (PRUEBA 1)

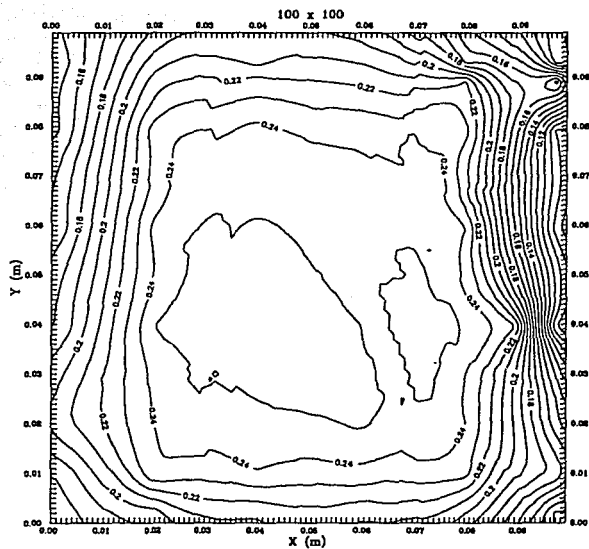


FIG. 4.2 DIAGRAMA DE VELOCIDADES (PRUEBA 2)

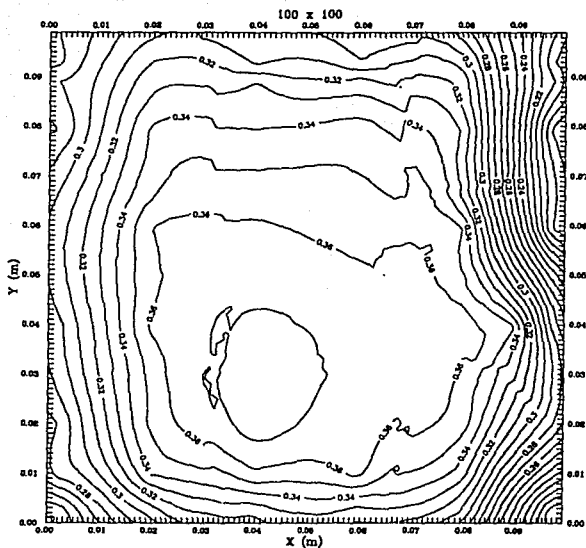


FIG. 4.3 DIAGRAMA DE VELOCIDADES (PRUEBA 3)

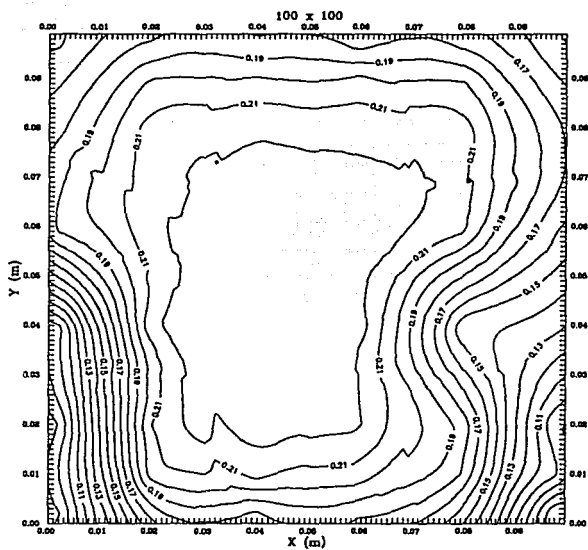


FIG. 4.4 DIAGRAMA DE VELOCIDADES (PRUEBA 4)

velocidad obtenidos en cada prueba (cada punto) entre el valor de velocidad que proporcionó indirectamente el vertedor, (recordemos de la ecuación de continuidad que:  $Q = V A$ , de donde  $V = Q / A$ ) los resultados de estas operaciones se muestran en las figuras 4.5 a 4.8. Una vez calculadas las velocidades normalizadas se alimentó nuevamente al programa de cómputo y se obtuvieron las figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 en donde las curvas mostradas unen valores cuya magnitud es una fracción adimensional del valor de la velocidad media de cada una de las pruebas.

Como una forma de comprobar que el proceso de normalización de los datos es correcto, la integral de la superficie generada por los datos normalizados deberá dar como resultado un volumen igual al área o muy cercano a ésta. En los 4 casos al obtener el error entre el valor del área calculada y el área real nunca excedió del 9% lo que indica que se procesaron correctamente los valores.

#### IV.2 Análisis de la estabilidad de las burbujas

Para poder analizar el comportamiento de las burbujas de aire en conducciones a presión, es necesario partir de lo siguiente:

Las fuerzas que actúan sobre una burbuja de aire que se encuentra en estado de equilibrio según la figura 4.13 son:  $F_D$  que es la fuerza de arrastre producto de la acción del fluido sobre las paredes de la burbuja, cuya dirección y sentido coinciden con el del flujo, además de ser paralela a las paredes de la tubería y  $P_z$  empuje ascendente (dirección vertical) que experimenta un cuerpo al ser sumergido

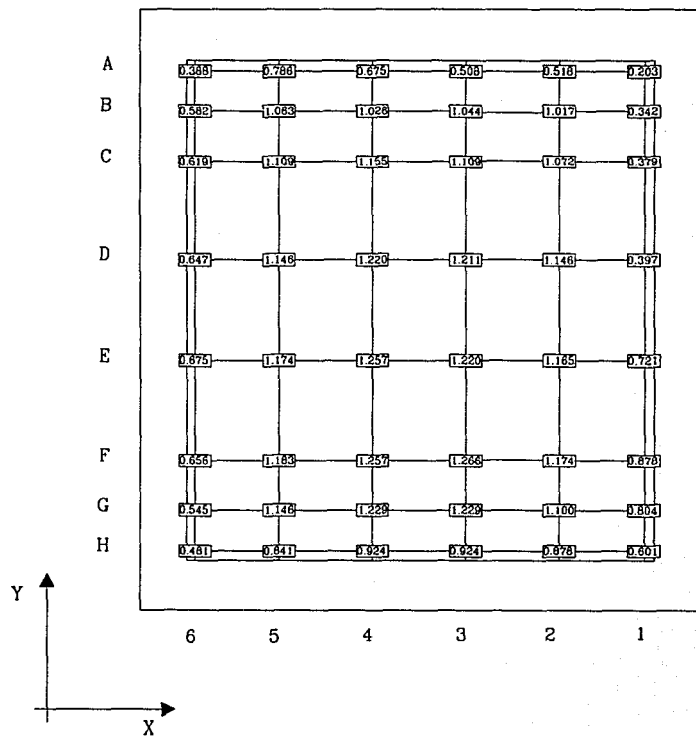


FIG. 4.5 VALORES NORMALIZADOS DE VELOCIDAD  
( PRUEBA 1 )



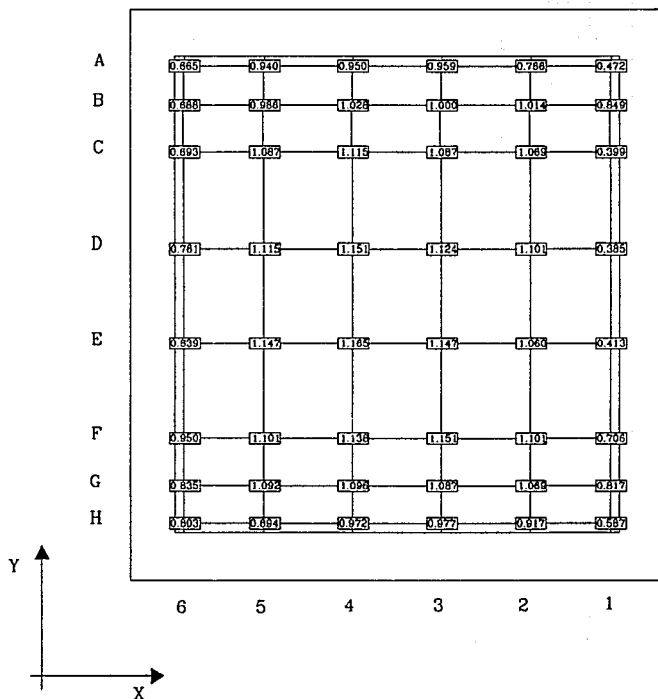


FIG. 4.6 VALORES NORMALIZADOS DE VELOCIDAD  
( PRUEBA 2 )

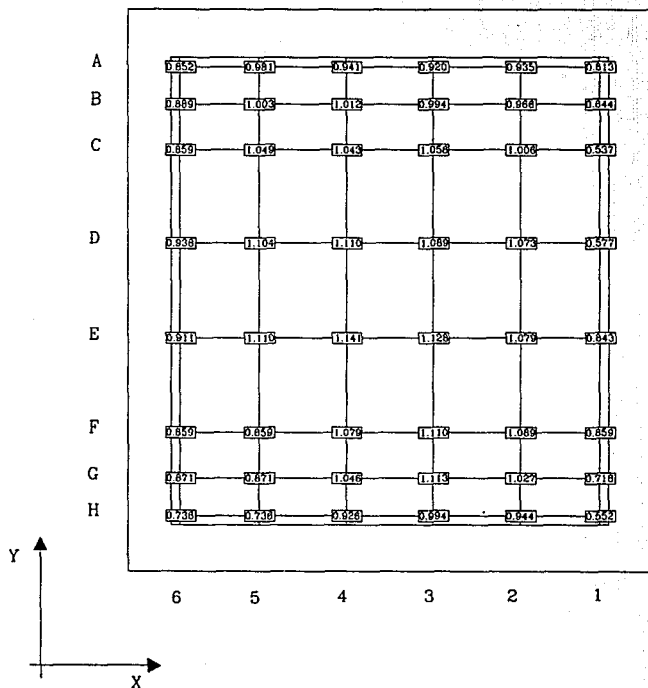


FIG. 4.7 VALORES NORMALIZADOS DE VELOCIDAD  
( PRUEBA 3 )

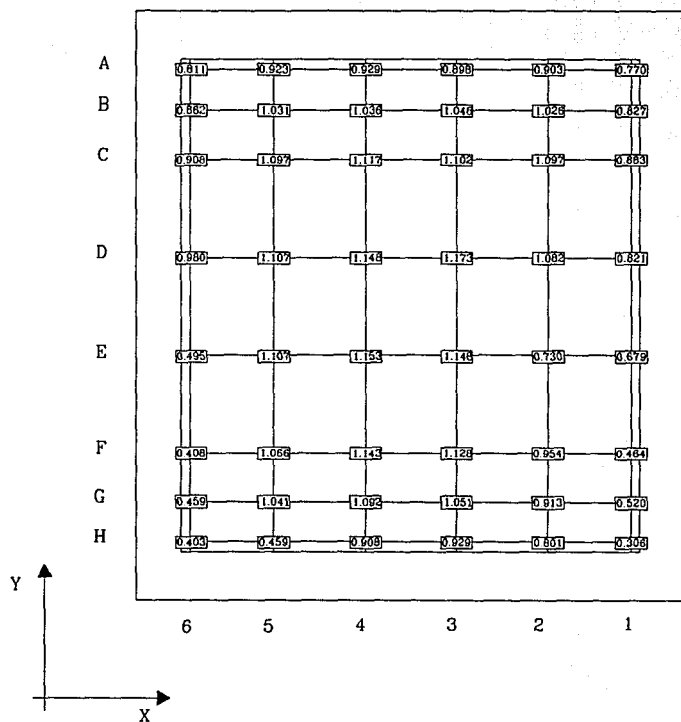


FIG. 4.8 VALORES NORMALIZADOS DE VELOCIDAD  
( PRUEBA 4 )

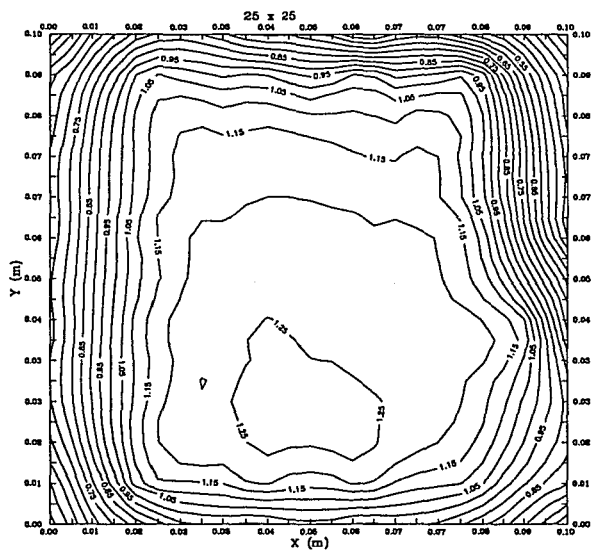


FIG. 4.9 DIAGRAMAS DE VELOCIDADES NORMALIZADAS (PRUEBA 1)

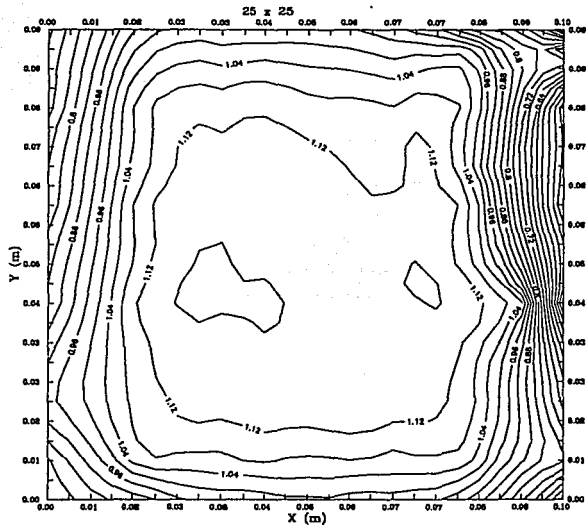


FIG. 4.10 DIAGRAMAS DE VELOCIDADES NORMALIZADAS (PRUEBA 2)

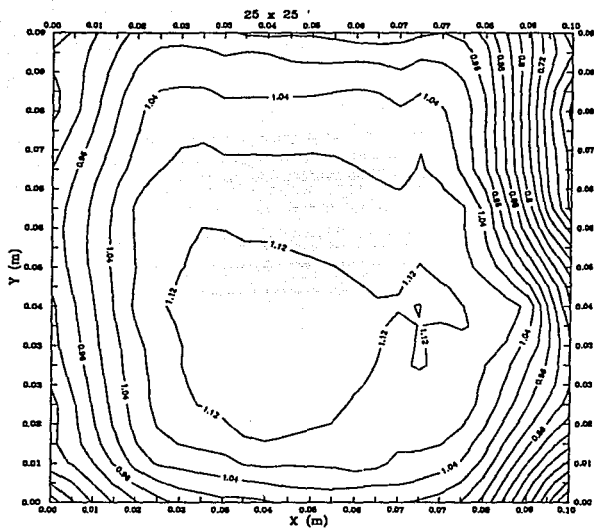


FIG. 4.11 DIAGRAMAS DE VELOCIDADES NORMALIZADAS (PRUEBA 3)

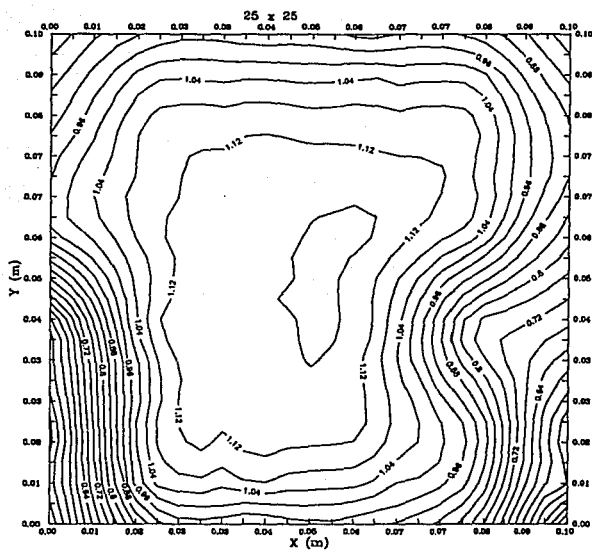


FIG. 4.12 DIAGRAMAS DE VELOCIDADES NORMALIZADAS (PRUEBA 4)

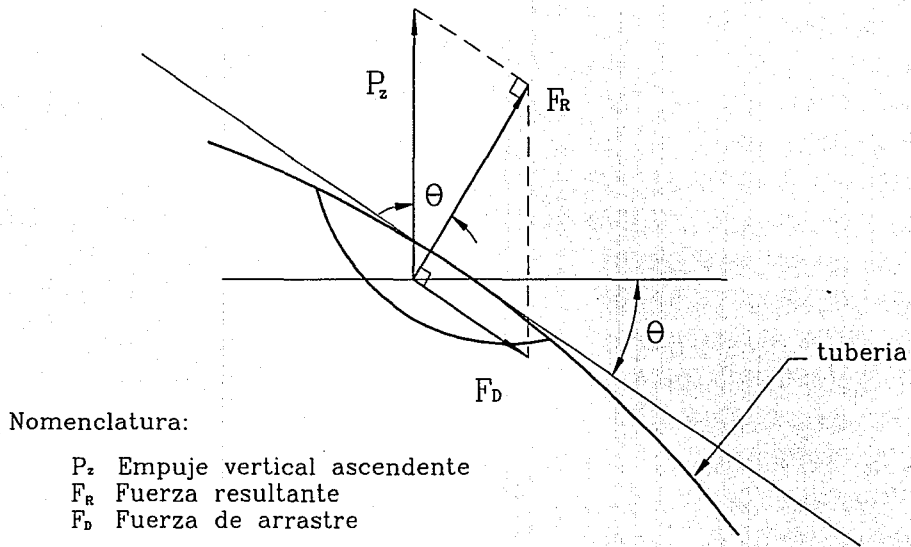


FIG. 4.13 FUERZAS ACTUANTES SOBRE LA BURBUJA DE AIRE



en un fluido, producto de la diferencia de densidades (Principio de Arquímedes).

Si denominamos  $F_R$  a la fuerza resultante producto de la acción de las antes descritas, la estabilidad de las burbujas se produce si  $F_R$  es perpendicular a las paredes de la tubería y por lo tanto a la fuerza  $F_D$ . Obsérvese que en este análisis de cuerpo libre se desprecian los efectos de la tensión superficial y la adherencia viscosa, no por ser de menor importancia, sino por la simplicidad y objetivos de este estudio.

Las fuerzas  $F_D$  y  $P_z$  que actúan sobre un cuerpo están definidas de la siguiente manera [Ref. 6]:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A_c \quad (4.1)$$

$$P_z = \rho g V \quad (4.2)$$

en la ecuación 4.1:

$C_D$  es un coeficiente adimensional de arrastre que depende de la forma del cuerpo

$\rho$  es la densidad del fluido que actúa sobre el cuerpo

$v$  es la velocidad local del fluido

$A_c$  área transversal del cuerpo

en la ecuación 4.2:

$g$  valor de la aceleración producto de la fuerza de gravitación (9.81 m/s<sup>2</sup>)

V volumen desalojado por el cuerpo sumergido en el fluido

El ángulo  $\theta$  que se forma entre las fuerzas resultante y de empuje ascendente es, por semejanza de triángulos, igual al ángulo de inclinación de la tubería, por lo que:

$$\text{sen } \theta = \frac{F_D}{P_z} \quad (4.3)$$

sustituyendo las expresiones 4.1 y 4.2 en la ecuación 4.3

$$\text{sen } \theta = \frac{C_D \rho v^2 A_t}{2 \rho g V} \quad (4.4)$$

simplificando:

$$\text{sen } \theta = \frac{C_D}{2g} \left( \frac{A_t}{V} \right) v^2 \quad (4.5)$$

El objeto de medir la posición "y" de las burbujas introducidas durante las pruebas (sección III.2) obedece al hecho de que es de gran interés determinar el ángulo  $\theta$ , que es el ángulo para el cuál la burbuja se encuentra en equilibrio, según la figura 4.14.

Si trazáramos un segmento de línea que una a la posición "y" de la burbuja con el centro de curvatura de la tubería,  $\theta$  estará definido (empleando triángulos semejantes) como el ángulo que se forma entre la vertical y el segmento antes descrito.

El ángulo  $\theta$  puede ser determinado partiendo de la expresión 4.6:

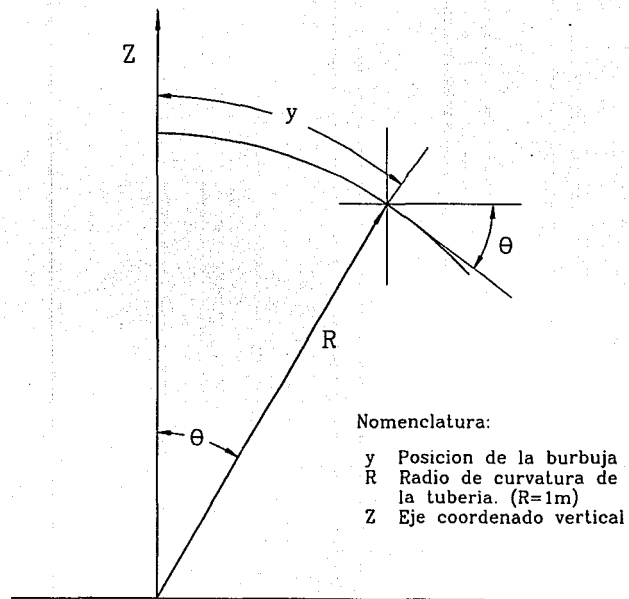


FIG. 4.14 ANGULO DE ESTABILIDAD DE LA BURBUJA

$$s = r \theta \quad (4.6)$$

donde:

s segmento de arco

r radio de curvatura del segmento de arco

$\theta$  ángulo, medido en radianes, que forman la unión de los extremos del segmento s, con el centro de curvatura

En nuestro estudio, s es igual a la coordenada "y" en la cual se localizó a las diferentes burbujas, si se considera que el inicio de este segmento coincide con el principio de la porción curva de la conducción. El valor de r, igual a 1 metro, está dado por el radio de curvatura (R) de la tubería (sección II.2).

De la ecuación 4.6, despejando  $\theta$  (en radianes) tenemos que:

$$\theta = \frac{y}{R} \quad (4.7)$$

como  $R = 1$  m:

$$\theta = y \quad (4.8)$$

Evalutando la expresión 4.8, se observa que para ángulos pequeños el  $\text{sen} \theta \approx \theta$ , como se muestra en la tabla 4.2:

TABLA 4.2

y (m)	$\theta$ (rad)	sen $\theta$
0	0	0
0.05	0.05	0.0499
0.10	0.10	0.0998
0.15	0.15	0.1490
0.20	0.20	0.1980

De lo anterior, y evaluando los resultados mostrados en el capítulo III (tabla 3.5), se obtienen los valores mostrados en la tabla 4.3.

Las velocidades indicadas en la tabla, son las velocidades medias obtenidas indirectamente por el uso del vertedor (sección anterior). La figura 4.15 muestra la gráfica sen  $\theta$  vs  $v_{1/2}$ .

Como se mencionó anteriormente, una de las razones principales por las que se normalizaron las velocidades medidas, obedece al hecho de que es muy importante conocer, con mayor certeza, la fracción de velocidad media que actúa sobre el volumen de aire introducido. De aquí, se justifica que durante los experimentos con volúmenes de aire, la ubicación en el eje "x" exista. Conocida esta coordenada, y empleando los diagramas normalizados se obtuvo la tabla 4.4, en donde la velocidad para cada volumen ya no es la media, sino la fracción de esta que le corresponde según su posición en el eje "x".

TABLA 4.3

Prueba #	Vol. aire c.c	Posición y	sen $\theta$	$V_{1/2}$ (m/s)
1	1	0.030	0.030	0.136
2		0.040	0.040	0.161
3		0.050	0.050	0.187
4		0.110	0.110	0.212
5		0.150	0.150	0.245
6		0.050	0.050	0.154
7		0.070	0.070	0.199
8		0.130	0.130	0.249
9	2	0.040	0.040	0.154
10		0.060	0.060	0.196
11		0.120	0.120	0.248
12		0.170	0.170	0.268
13		0.040	0.040	0.156
14		0.075	0.075	0.214
15		0.160	0.160	0.268
16	3	0.030	0.030	0.144
17		0.050	0.050	0.166
18		0.060	0.060	0.189
19		0.070	0.070	0.213
20		0.090	0.090	0.233
21	4	0.033	0.033	0.156
22		0.060	0.060	0.214
23		0.120	0.120	0.267
24		0.150	0.150	0.293
25	5	0.035	0.035	0.187
26		0.060	0.060	0.213
27	6	0.020	0.020	0.151
28		0.030	0.030	0.173
29		0.050	0.050	0.198
30		0.050	0.050	0.219

Prueba #	Vol aire c.c.	Posición $\gamma$	$\text{sen } \theta$	$V_{1/2}$ (m/s)
31		0.065	0.065	0.240
32		0.030	0.030	0.185
33		0.070	0.070	0.240
34		0.120	0.120	0.281
35	9	0.015	0.015	0.157
36		0.030	0.030	0.182
37		0.035	0.035	0.20
38		0.045	0.045	0.215
39		0.050	0.050	0.232
40		0.060	0.060	0.256
41	12	0.010	0.010	0.151
42		0.030	0.030	0.169
43		0.030	0.030	0.194
44		0.045	0.045	0.214
45		0.045	0.045	0.230
46	16	0.035	0.035	0.224
47		0.050	0.050	0.267
48		0.090	0.090	0.310

El intervalo de gastos que cubre los diagramas va desde 1.089 hasta 3.261 l.p.s., lo que ocasiona que en aquellos puntos en donde el diagrama no corresponde al gasto para el cual se introdujo la burbuja, que son la mayoría, se tuviera que interpolar linealmente. Una de las razones por las que se normalizaron los diagramas, es que de esta manera se minimizan los efectos de la interpolación, si ésta se hubiera hecho sobre los diagramas en su estado normal. Debemos recordar que uno de los alcances de este trabajo es calibrar la instalación cualitativamente, sobre todo en lo que se refiere a las pruebas con las burbujas, lo que nos permite realizar simplificaciones. Los resultados de la tabla 4.4 se

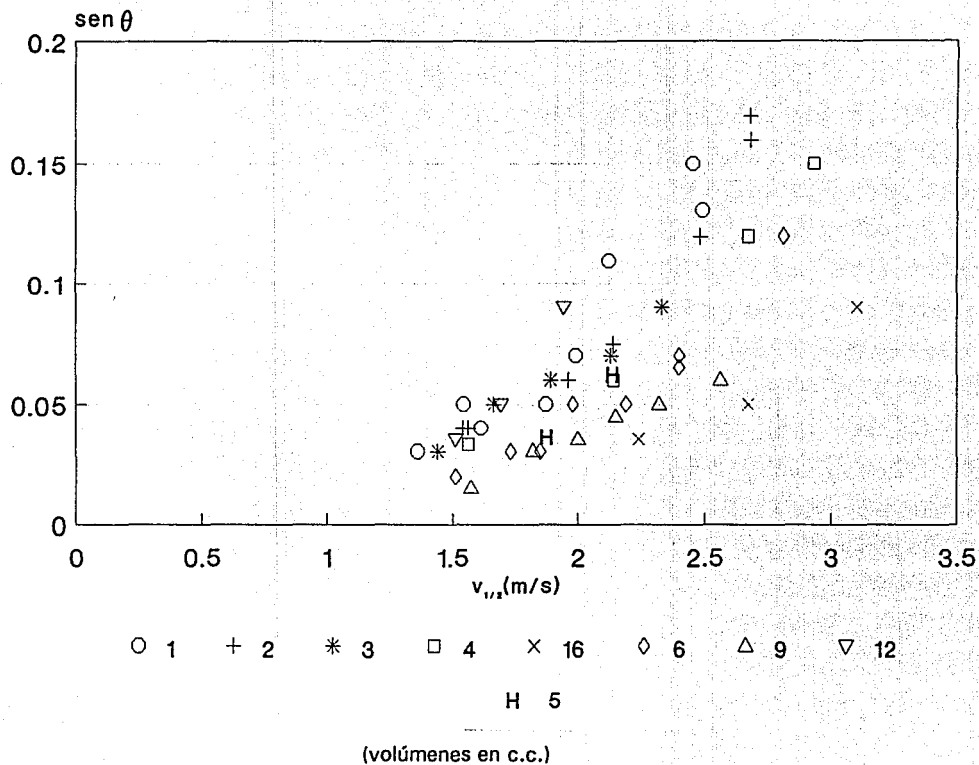


FIG. 4.15 GRAFICA SEN  $\theta$  VS.  $v_{1/2}$



graficaron, obteniéndose la figura 4.16.

De las figuras 4.15 y 4.16 es importante mencionar lo siguiente:

Si se observan ambas gráficas se puede apreciar que los datos de la segunda gráfica, en general, se encuentran respecto de los de la primera, cargados hacia la izquierda. Esto se debe a que en un principio se consideró que la velocidad que afectaba a los volúmenes era la media, sin embargo al introducir valores de velocidad partiendo de la posición "x" de la burbuja, en la mayoría de las pruebas la tendencia de la velocidad es a disminuir, lo que se antoja obvio si se considera que generalmente las burbujas tienden a cargarse hacia los costados y no hacia el centro de la conducción.

Por otro lado, aunque ligeramente, se aprecia una mejor tendencia de los datos hacia una expresión de tipo parabólico (figura 4.16) cuando las velocidades son las puntuales. Es importante mencionar que la obtención de las fracciones de  $v_{1/2}$  se hizo suponiendo, dependiendo del volumen de aire introducido, un espesor de la burbuja (dimensión perpendicular al flujo y ortogonal a la dimensión "x") ya que este dato no pudo ser obtenido en las pruebas, debido principalmente a cuestiones técnicas relativas al diseño de los experimentos. Por último, tomando en cuenta lo somero de este estudio, podemos afirmar, que de incluir elementos tales como el volumen real de las burbujas (V), su área transversal ( $A_t$ ) y el espesor los resultados experimentales estarán más próximos al modelo propuesto para el ángulo de estabilidad (ecuación 4.5).

TABLA 4.4

Prueba #	Vol. aire c.c	Posición y	sen $\theta$	$v_{1/2}$ (m/s)	Fracción de $v_{1/2}$	Velocidad local *
1	1	0.030	0.030	0.136	0.740	1.006
2		0.040	0.040	0.161	0.770	1.240
3		0.050	0.050	0.187	0.810	0.151
4		0.110	0.110	0.212	0.970	2.056
5		0.150	0.150	0.245	1.018	2.494
6		0.050	0.050	0.154	0.760	1.170
7		0.070	0.070	0.199	0.820	1.632
8		0.130	0.130	0.249	0.980	2.440
9	2	0.040	0.040	0.154	0.850	1.309
10		0.060	0.060	0.196	0.896	1.756
11		0.120	0.120	0.248	0.983	2.438
12		0.170	0.170	0.268	0.925	2.479
13		0.040	0.040	0.156	0.912	1.423
14		0.075	0.075	0.214	0.975	2.087
15		0.160	0.160	0.268	1.152	3.087
16	3	0.030	0.030	0.144	0.749	1.079
17		0.050	0.050	0.166	0.918	1.524
18		0.060	0.060	0.189	0.946	1.788
19		0.070	0.070	0.213	0.994	2.117

Prueba #	Vol. aire c.c	Posición y	sen $\theta$	$v_{1/2}$ (m/s)	Fracción de $v_{1/2}$	Velocidad local *
20	3	0.090	0.090	0.233	1.027	2.393
21	4	0.033	0.033	0.156	0.907	1.415
22		0.060	0.060	0.214	0.995	2.129
23		0.120	0.120	0.267	1.024	2.734
24		0.150	0.150	0.293	0.967	2.833
25	5	0.035	0.035	0.187	0.943	1.763
26		0.060	0.060	0.213	0.993	2.115
27	6	0.020	0.020	0.151	0.915	1.382
28		0.030	0.030	0.173	0.943	1.631
29		0.050	0.050	0.198	0.977	1.934
30		0.050	0.050	0.219	1.010	2.212
31		0.065	0.065	0.240	1.030	2.472
32		0.030	0.030	0.185	0.958	1.772
33		0.070	0.070	0.240	0.982	2.357
34		0.120	0.120	0.281	0.949	2.667
35	9	0.015	0.015	0.157	0.917	1.440
36		0.030	0.030	0.182	0.951	1.731
37		0.035	0.035	0.20	0.976	1.952
38	9	0.045	0.045	0.215	1.012	2.176
39		0.050	0.050	0.232	1.027	2.383

Prueba #	Vol. aire c.c.	Posición y	sen $\theta$	$v_{1/2}$ (m/s)	Fracción de $v_{1/2}$	Velocidad local *
40		0.060	0.060	0.256	1.038	2.657
41	12	0.010	0.010	0.151	0.909	1.373
42		0.030	0.030	0.169	0.930	1.572
43		0.030	0.030	0.194	0.957	1.857
44		0.045	0.045	0.214	1.010	2.161
45		0.045	0.045	0.230	0.981	2.256
46	16	0.035	0.035	0.224	1.023	2.292
47		0.050	0.050	0.267	1.043	2.785
48		0.090	0.090	0.310	0.969	3.004

\* Se le llamó velocidad puntual a aquella que se considera actúa directamente sobre la burbuja, y por ende es diferente de la velocidad media.

la llamada fracción de  $v_{1/2}$ , es el número tomado de los diagramas que se obtuvo considerando la posición "x" de la burbuja y por lo tanto afecta la velocidad actuante sobre esta.

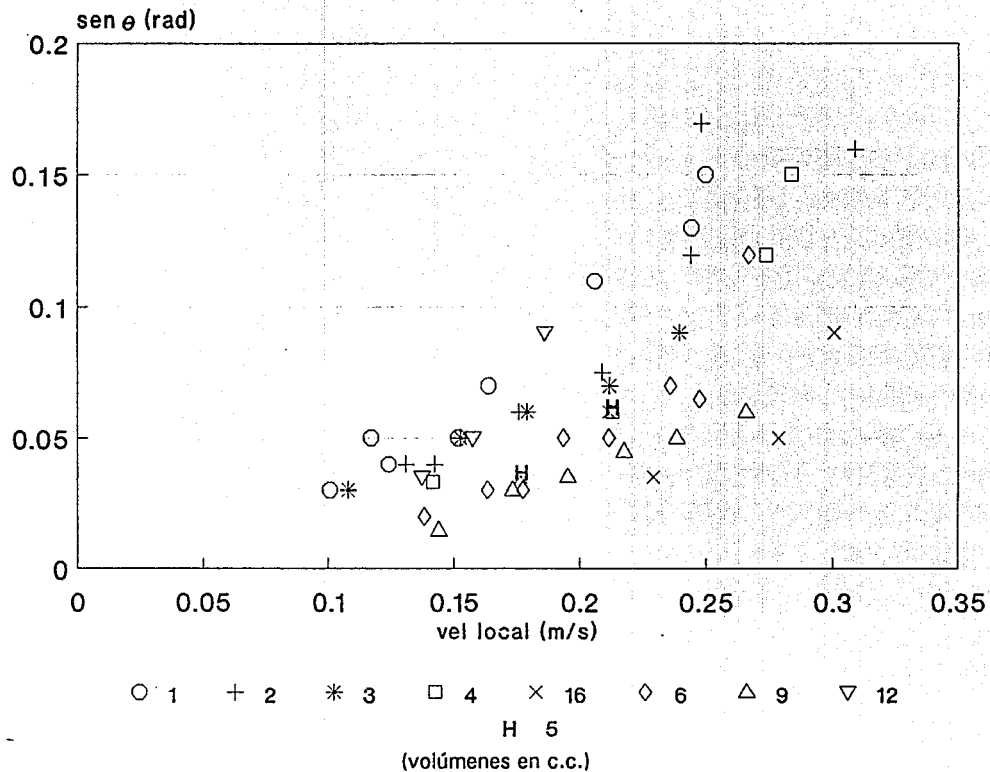


FIG. 4.16 GRAFICA SEN  $\theta$  VS. VELOCIDAD LOCAL

## V Conclusiones

De los objetivos y alcances de este trabajo, así como del análisis de los resultados se desprende lo siguiente:

- Es necesario aumentar el número de perfiles de velocidad. Si bien el intervalo de gastos es correcto, debe tenerse en cuenta que un mayor número de gráficas normalizadas redundará en una disminución considerable del error generado por las interpolaciones al momento de obtener la velocidad local que actúa sobre las burbujas. Además se considera necesario la obtención de velocidades en secciones transversales diferentes de las medidas (secciones 1 y 2). No es fácil, sin embargo sí será de gran utilidad caracterizar aquellas secciones transversales en donde se ha observado se conglomeran el mayor número de burbujas.

- Se observa que el ángulo de estabilidad de las burbujas está determinado no sólo por el volumen de aire atrapado, el gasto, etc. sino que además intervienen otros factores difícilmente cuantificables tales como el volumen final (la reducción de éste al estar dentro de la tubería) y el área transversal de la burbuja. De ser posible la determinación de estos elementos, podrá hacerse un estudio cuantitativo que permitirá, inclusive, modelar el fenómeno con toda precisión.

- Será necesario hacer mas pruebas relativas a las burbujas de aire, tomando en cuenta la presión en la conducción. Dada la simplicidad de este estudio, este

factor no fue considerado, sin embargo debe tenerse presente que a mayor presión en la tubería la posición en "y" de la burbuja tenderá a estar más alejada del origen de nuestro sistema coordenado (será más pequeña) y viceversa. Por otro lado, consideramos pertinente la adaptación de algún dispositivo que permita variaciones de la presión, sin perder nunca de vista que la resistencia de la instalación está limitada a la de la zona de observación (la pieza de acrílico). Para determinar la presión se recomienda conectar a una de las preparaciones con que cuenta la tubería un manómetro diferencial de mercurio.

- Es necesario determinar un método para la inclusión del aire a la tubería de manera diferente a como se ha estado realizando. La forma de inyectar el aire en la conducción genera pérdidas por arrastre del volumen introducido, y es muy probable que tanto las dimensiones como la posición de la burbuja varíen.

- Para la determinación tanto de las dimensiones como la ubicación de las burbujas es necesario videograbar las pruebas, de tal suerte que definir estas características no esté sujeto al sesgo que introduce la persona encargada de esta labor.

- La tensión superficial y la adherencia viscosa pueden ser un factor determinante en la ubicación de las burbujas que tampoco fue tomado en cuenta. Para volúmenes menores a 3 c.c. estos efectos comienzan a ser mayores, y en el caso de burbujas menores a 1 c.c., son definitivamente determinante, ya que la posición de estas no varía.

- Deberá determinarse alguna forma para obtener el espesor de la burbuja (dimensión perpendicular al flujo y ortogonal al eje "x"), ya que esta longitud simplificará los cálculos para la obtención del área transversal de las burbujas. De aquí que la determinación de  $C_D$  sea una tarea mucho menos compleja.

- Es recomendable realizar pruebas con diferentes radios de curvatura de la conducción, ya que ampliando el universo de muestreo, la simulación del comportamiento de las burbujas en conductos a presión estará más cercana a la realidad, lo que significará un mejor diseño de los grandes conducciones de agua.



**Referencias y bibliografía**

- Ref. 1 Sotelo A. Gilberto "Hidráulica general" Volumen I, Ed. Limusa, México 1989
- Ref. 2 Guevara G. Y. "Regulación del gasto suministrado por una bomba aplicando control PI" Instituto de Ingeniería, UNAM, México 1991
- Ref. 3 Rodal C. E., Alarcón F., Guevara Y., Guevara M. "Velocimetría Láser" Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM, México 1983
- Ref. 4 Sánchez H. A., Rodal C. E., "Aplicación de la velocimetría láser a la ingeniería hidráulica" Instituto de Ingeniería, UNAM, 9° Congreso Nacional de Hidráulica, Querétaro QRO.
- Ref. 5 Golden Software "Manual del usuario para SURFER"
- Ref. 6 Mott L. R. "Applied Fluid Mechanics" Third edition, Ed. Merrill Publishing Company, Nueva York 1990.

**BIBLIOGRAFIA**

E. E. Zukoski "Influence of viscosity, surface tension and inclination angle of long bubbles in closed tubes" Journal of Fluids Mechanics (1966), vol 25, part 4, p.p. 821-837

Carmona P.R., Guevara G. Y., Sánchez B. J. L. "Funcionamiento hidráulico del Acueducto Río Colorado - Tijuana" Instituto de Ingeniería, UNAM, México 1987

Guarga F. R., Sánchez B. J. L., Carmona P. R., Aguilar M. L. "Diseño y operación hidráulicos de conducciones de agua a presión" Fascículo II, Instituto de Ingeniería, UNAM, México 1985

Rouse H. "Elementary Mechanics of Fluids" Dover Publications, Inc. Nueva York 1946