

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

La macromedición es por ahora considerada una de las actividades de mayor relevancia en los sistemas de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales; debido a que, a través de su práctica cotidiana, es posible conocer los caudales o volúmenes de agua potable entregados al sistema por sus fuentes de abastecimiento, así como cuantificar la que sale de él en forma de aguas residuales para llegar a las plantas de tratamiento.

El conocer la cantidad de agua producida y entregada a un sistema de agua potable reporta beneficios importantes que permiten conocer las eficiencias en la distribución, facturación, cobranza y la cuantificación de las pérdidas físicas, originadas por diferentes causas. Esto contribuye a la determinación de las eficiencias electromecánicas de los equipos de bombeo, así como al control de la exploración de los acuíferos. En plantas de tratamiento se cuantifican los caudales a tratar, los volúmenes de aguas tratadas, la cantidad de lodos producidos, etc. y todo esto redundará en un ahorro en el consumo de energía y de dinero. Con base en estos beneficios, se puede considerar que el sistema de macromedición forma parte importante en la planeación de cualquier organismo operador de agua potable o residual.

Para implantar un sistema de macromedición adecuado a las necesidades de cada organismo operador del agua (sistema de agua potable, agua industrial tratada, agua no potable, agua residual, etc.),

se requiere establecer un proyecto de macromedición en el cual se deberá de considerar la calidad fisico-química y bacteriológica del agua, la infraestructura existente, los costos del proyecto, la situación económica del organismo y, por consiguiente, la asignación de recursos correspondiente a la macromedición, de acuerdo con los programas de inversión.

En términos generales, un medidor o aforador de caudal es un equipo que se utiliza en la macromedición, para conocer un volumen de agua que pasa por un punto de una conducción, en determinado tiempo.

En esta tesis se realizará una investigación de laboratorio y de trabajo de gabinete, para diseñar, construir y calibrar el prototipo de un medidor de caudal (transductor) con base en "Strain Gages" (deformímetros eléctricos) para utilizarse en medir caudales de agua potable y/o residual, en tuberías que trabajan a presión.

Se pretende construir el prototipo de materiales que resistan la acción de los contaminantes comúnmente presentes en el agua residual y en el medio ambiente. Debido a lo anterior, los materiales a utilizar podrán ser: acero inoxidable y duraluminio.

Se tomará como base para el diseño una viga en cantilever (apoyada en uno de sus extremos), de acero inoxidable, adaptada a una pieza de duraluminio, instrumentada con strain-gages y conectada a un dispositivo electrónico capaz de registrar las lecturas que manden los strain gages, a fin de relacionar estas lecturas con el caudal que esté pasando a través del conducto en estudio.

Se realizarán las pruebas en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en un aparato presurizado que cuente con una tubería de 4 pulgadas de diámetro y un aforador propio que contenga un diafragma; por lo cual, el aparato se construirá para realizar aforaciones en tuberías de tal diámetro.

1.1 Ventajas de la Macromedición

Actualmente las políticas para el subsector agua potable, así como para el agua residual, se están orientando a que los organismos operadores funcionen con autosuficiencia técnica y financiera; esto es, con estructuras y políticas empresariales. Para lograr lo anterior es necesario conocer primero los caudales o volúmenes entregados por las fuentes de abastecimiento, así como los volúmenes utilizados.

De lo anterior se desprende la importancia de contar con una adecuada infraestructura de macromedición (Comisión Nacional del agua, 1994), basada en una correcta selección e instalación de equipos macromedidores, así como de un programa de verificación y mantenimiento que garantice la confiabilidad de su información.

Paralelamente al desarrollo del proyecto de macromedición se deberá complementar el establecimiento de un sistema de manejo y divulgación de la información obtenida, por medio del cual se podrá obtener lo siguiente:

- Cuantificar la producción.
- Obtener la información necesaria para realizar los balances hidráulicos del sistema.
- Conocer los componentes de las pérdidas hidráulicas del sistema.
- A través de los volúmenes producidos y/o tratados y los volúmenes facturados se puede obtener un indicador de la eficiencia comercial del sistema.
- Medir los volúmenes a grandes consumidores y emisores.
- Medir los caudales de entrada y salida en las plantas de tratamiento de aguas residuales y potabilizadoras.

1.2 Propósito General y Objetivos

El propósito general de esta investigación es diseñar y construir un prototipo de medidor de caudales digital (transductor) para medir o aforar el agua potable o residual en conductos a presión.

Objetivos:

- a).- Revisar y calificar la bibliografía acerca de los dispositivos usados en la medición de caudal, así como su clasificación.
- b).- Estudiar los dispositivos de medición de caudales basándose en la velocidad, en el diferencial de presión, los ultrasónicos, los electromagnéticos y los transductores, en cuanto a sus características, ventajas y desventajas.

- c).- Diseñar y construir un prototipo de transductor digital de caudales con base en "strain gages" (prototipo) para ser utilizado en tuberías a presión.
- d).- Calibrar el prototipo del transductor digital de caudales.
- e).- Obtener la curva y ecuación de calibración del transductor.
- f).- Conclusiones.

1.3 Material y Equipo a Utilizar

Las pruebas se realizarán en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.A.N.L.

El equipo y los dispositivos a utilizar en las pruebas serán:

- Un transductor digital.
- Un tanque de carga constante con altura de siete metros sobre el nivel del piso del laboratorio.
- Dos bombas verticales (con capacidad de 50 litros por segundo y un motor de 15 HP cada una).
- Un aparato de tuberías.
- Dos manómetros de carátula.
- Un manómetro diferencial de mercurio.
- Una tubería adicional de 4 pulgadas de diámetro nominal, de fierro galvanizado, la cual se colocará en la descarga del aparato de tuberías y en ella el transductor.
- Una cinta métrica.
- Unas pinzas mecánicas.
- Unas pinzas de presión.

- Unas llaves españolas.
- Una llave Steelson.
- Dos desarmadores

El equipo de computo (software y hardware) utilizado para la captura de la información, así como para su procesamiento, análisis e impresión es el siguiente:

- Una microcomputadora PC PENTIUM 133MHZ 32MB/RAM
- Una impresora HP IIP Plus
- Discos de 3 1/2" de 1.44 MB
- Microsoft Windows 97
- Microsoft Word for Windows ver. 7.0
- Microsoft Excel for Windows ver. 7.0
- Autodesk Auto-Cad for WINDOWS ver. 14
- Microsoft Mathcad for Windows ver. 5.0 Plus

1.4 Alcances y Limitaciones.

Se diseña y construye un prototipo para la medición de caudales en tuberías a presión el cual puede ser utilizado tanto para agua potable como para agua residual del tipo industrial - doméstico.

El prototipo será denominado: "Transductor digital de caudales" y tendrá la capacidad necesaria para calibrarse y ser usado como un adecuado aforador o medidor de caudales, así como un medidor de velocidades o de presiones, según se requiera. El aparato constará de una consola digital, donde se registrarán los datos, la cual funcionara

con una corriente alterna de 110 volts o con corriente directa de 8 volts. Los datos serán registrados en una pantalla digital de cuarzo, con la capacidad de ajustarse a cero y tener ganancia de lectura.

El aparato que se va a diseñar y construir sólo se podrá utilizar en mediciones de caudal de entre 0 y 150 lps, ya que caudales mayores dañarían el aparato y para su colocación en una tubería se tendrá que realizar una perforación de 2 pulgadas de diámetro para soldar una pieza con rosca npt en la cual se enroscará el transductor. Se diseñará para funcionar en tuberías de cuatro pulgadas de diámetro nominal, y será usado en aguas potable y/o residual.

CAPITULO 2

MACROMEDICION

CAPITULO 2

MACROMEDICION

2.1 Macromedidores de Caudal en Conductos a Presión

Existe una gran variedad de macromedidores que tienen su aplicación en los sistemas de agua potable y alcantarillado y cuyos diseños están basados de acuerdo a las presiones de operación y calidad de agua que se pretende cuantificar. En el cuadro No.1 se presenta una clasificación general de los diferentes tipos de medidores más comúnmente empleados.

2.1.1 Medidores de Velocidad.

El principio de funcionamiento de este tipo es que utiliza como elemento de medición una turbina o hélice, que trabaja en la tubería a presión mientras que el flujo del agua corre en una dirección axial a ellas.

La medición se logra gracias a la proporcionalidad existente entre el número de revoluciones de la turbina o hélice y la velocidad del agua que corre por la tubería. La velocidad del giro de la turbina o hélice se transmite a un sistema de relojería o de pulsos eléctricos que la

transforman directamente en una información equivalente a volúmenes o registros gráficos.

2.1.2 Ventajas y Desventajas Generales de los Medidores de Velocidad

Ventajas:

- Hay baja pérdida de carga baja.
- La medición de agua con bajo contenido de sólidos en suspensión, no afecta a la medición.
- Es bajo su costo de adquisición.
- Trabaja con una precisión del $\pm 2\%$.
- Es fácil de instalar.
- Necesita tramos rectos con poca longitud.
- Tiene un intervalo de medición amplio.
- El elemento sensor de la velocidad del agua se ubica al centro del tubo, eliminando la necesidad de utilizar constantes de aforo.
- Los del tipo "carrete" cuentan con aletas direccionales para evitar turbulencias.
- Es grande su facilidad de mantenimiento y refaccionamiento.
- Existe un buen número de proveedores, tanto de aparatos como de refacciones.

Desventajas:

- Un buen número de sus piezas están sujetas a gran desgaste.
- Son mayores sus necesidades de mantenimiento.

2.2 Medidores de Presión Diferencial Tipo Deprimógeno

Otra forma de medir flujos en conductos cerrados a presión, es por medio de elementos que producen pérdida de presión durante el proceso; a estos medidores se les llama deprimógenos; llvan ese nombre porque en la sección de medición, se expresan en metros columna de agua (m.c.a.) y se registran con manómetros diferenciales o registradores de presión.

Las variaciones de presión y velocidad, se relacionan mediante las fórmulas de Bernoulli y de Continuidad(Sotelo,1995), determinándose así el caudal de escurrimiento.

Para la aplicación de estas fórmulas, en el caso de medidores deprimógenos conectados a un manómetro diferencial, se suponen despreciables las pérdidas por fricción.

Considerando lo anterior, las ecuaciones mencionadas son:

a).- Ecuación de Bernoulli.

Considerando dos puntos (de 1 a 2) en el estudio de una tubería.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

Donde:

Z_1 = Carga de posición en el punto 1, en m.c.a.

Z_2 = Carga de posición en el punto 2, en m.c.a.

V_1 = Velocidad media del agua en el punto 1, en m/s.

V_2 = Velocidad media del agua en el punto 2, en m/s.

P_1 = Presión del agua en el punto 1, en kg/m^2 .

P_2 = Presión del agua en el punto 2, en kg/m^2 .

g = Aceleración de la gravedad en m/s^2 .

P/γ = Carga de presión, en m.c.a.

$V^2/2 \cdot g$ = carga de velocidad, en m.c.a.

b).- Ecuación de Continuidad.

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

de donde:

$$V_1 = (V_2 A_2) / A_1$$

en donde:

$$V_1 = \text{cte.}$$

Desarrollando estas ecuaciones se llega a la siguiente fórmula, que permite conocer el caudal de escurrimiento:

$$Q = C_d \cdot A_2 \cdot \sqrt{(2 \cdot g \cdot \Delta h \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma} - 1\right))}$$

Donde:

- Q= Caudal que pasa por el medidor, en m^3/s
Cd= Coeficiente de descarga del equipo de medición
g= Aceleración de la gravedad, en m/s^2 .
 Δh = Presión diferencial en el manómetro, en m.
 γ_m = Peso específico del líquido manométrico, en kg/m^3 .
 γ = Peso específico del agua, en kg/m^3 .

La geometría de cada uno de estos medidores (Venturis, tubo Dall, tobera, diafragma y placa de orificio) origina diferencias básicas en el comportamiento hidráulico del fluido, sobre todo en la pérdida de carga que producen al paso del fluido.

Este tipo de dispositivos (elementos primarios), son los que originan la presión diferencial, para poder detectarla, transmitirla y/o convertirla en información de volúmenes o caudales, requiere de equipos denominados secundarios, que pueden ser transductores o registradores.

Ventajas:

- La precisión es ± 1 .
- Se puede usar, con restricciones, en líquidos con bajo contenido de sólidos en suspensión.
- Su diseño es confiable y simple.
- Es fácil de instalar.
- Su mantenimiento es mínimo.
- Tiene pocas restricciones en su instalación.
- Su calibración es sencilla.

- No tiene piezas movibles en contacto con el agua.

Desventajas:

- Requiere de mayor longitud para su instalación, comparada con otros medidores.
- Tiene baja recuperación de carga.
- Su intervalo de medición es limitado y requiere de continua verificación.
- Reporta errores en la precisión, si el agua contiene sólidos en suspensión.
- Sufre deterioro rápido al paso del tiempo.
- Es muy sensible a las turbulencias, aguas arriba.

Entre los usos más importantes que tiene este equipo se pueden mencionar:

- La medición de caudales.
- La verificación de secundarios deprimógenos.
- La medición de presiones.
- La determinación de las curvas de errores de un medidor.
- Las pruebas de pérdida de carga.
- La determinación de las curvas características de las bombas.
- La determinación de la curva de calibración de un primario deprimógeno.

2.3 Medidor Ultrasónico

El principio de funcionamiento de este medidor tuvo su origen en las aplicaciones de la acústica, y de éstas, específicamente la relacionada con el sonar; de acuerdo con esto, el funcionamiento de un medidor ultrasónico es como sigue:

Se transmite una señal sónica diagonalmente, a través del tubo por donde circula el agua; la velocidad del agua afecta el tiempo que la señal emplea para viajar del transmisor al receptor.

Con base en este principio de funcionamiento, se han desarrollado varios diseños de medición de caudales, utilizando por lo menos un transmisor y un receptor (transductores).

La precisión de estos medidores depende de la exactitud en la medición del tiempo que tarda la señal sónica en viajar del transmisor al receptor.

Para sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, los medidores ultrasónicos más usados son los conocidos como “Tiempo en Tránsito” (Time of Flight) y el denominado de “Efecto Doppler” (Comisión Nacional del Agua, 1994).

La diferencia entre ambos medidores estriba en que en el medidor de tiempo en tránsito la señal acústica va del emisor al receptor; y en el

efecto Doppler, la señal es reflejada por el material que lleva el agua en suspensión.

Por lo anterior, el medidor ultrasónico de tiempo en tránsito es únicamente utilizable en aguas limpias, que no contengan sólidos en suspensión; en cambio, el de efecto Doppler solo puede usarse en aguas que contengan sólidos en suspensión.

El equipo consta básicamente de: un transmisor, un receptor (transductores), y de rieles de instalación, los cuales van montados en los costados de la tubería a 180 grados uno del otro, cables que conectan los transductores con un computador que controla la señal acústica, analiza la información registrada y la transforma en caudales, volúmenes o velocidad del agua.

Las ventajas que muestran estos tipos de aparatos son:

- Son fácil de transportarse.
- Su instalación es rápida y sencilla.
- Se instalan en cualquier tubería.
- Su precisión es del 1 al 4 %.
- La instalación puede efectuarse en el exterior de la tubería.

Las desventajas son:

- Su costo es relativamente alto.
- Su funcionamiento correcto depende en gran parte del contenido uniforme de sólidos en suspensión del agua.
- Existe poca información acerca de su aplicación.

2.4 Medidores Electromagnéticos

El principio de operación de este medidor está basado en la Ley de Faraday (Comisión Nacional del Agua, 1994), la cual expresa que: "El voltaje inducido en un conductor que se desplaza a través de un campo magnético, es proporcional a la velocidad de ese conductor".

El medidor magnético de flujo utiliza la Ley de Faraday para medir la velocidad media del agua en la forma siguiente: dos bobinas colocadas una a cada lado del cuerpo del medidor, son excitadas por una corriente alterna, produciendo un campo magnético uniforme, a través de la parte interna del tubo. Conforme pasa el agua a través del cuerpo del medidor, corta el campo magnético, generando una inducción de voltaje, que es percibida por dos electrodos diametralmente opuestos y perpendiculares al campo magnético.

En cuanto a su estructura, el medidor magnético consiste en un tubo metálico, que generalmente es de acero inoxidable o aluminio, ya que las propiedades magnéticas de estos materiales son bajas, recubierto con neopreno, plástico, teflón, cerámica o cualquier otro material no magnético y no conductor.

Alrededor del tubo se encuentra una serie de bobinas, de diseño parecido al devanado de un motor, y con un núcleo semejante a los que se usan en un transformador; éstas son las que producen el campo magnético. También cuenta con un par de electrodos que detectan la fuerza electromotriz que genera el agua, a su paso por el campo

magnético, enviando la señal para medición a un registrador que traduce la señal en información de caudales o volúmenes.

Ventajas:

- No posee partes móviles en contacto con el agua.
- Para su instalación requiere de una pequeña longitud de tramo recto aguas arriba.
- La pérdida de carga es despreciable.
- La señal de salida de un medidor electromagnético es lineal con el caudal, lo que simplifica los circuitos de generación de señales.
- El intervalo del medidor es bastante amplio.
- Su precisión es del 1 %.
- Puede manejar líquidos con sólidos en suspensión.
- Su instalación es muy sencilla.

Desventajas:

- Es alto su costo de adquisición.
- Requiere de mano de obra especializada para su instalación, calibración y mantenimiento.
- Requiere de cuidados, con respecto a las fuentes de energía externa que puedan provocar distorsiones en la operación normal.
- Necesita de mantenimiento periódico en los electrodos, pues las partículas metálicas que son arrastradas por el agua se van adhiriendo, interfiriendo en la medición.

2.5 Elementos Secundarios de Presión Diferencial.

Los elementos primarios de presión diferencial requieren de elementos secundarios para transmitir, convertir y registrar, en forma de caudales o volúmenes la diferencia de presión producida y pueden ser de dos tipos.

2.5.1 Transmisores.

Los tipos de transmisores de presión diferencial más usados en los equipos para medición del agua potable son los electrónicos de tipo:

Célula diferencial Tipo Dri-Flo

Célula diferencial Tipo Strain Gage

2.5.1.1 Célula Diferencial Tipo “Dri-Flo”.

Esta célula diferencial, está constituida por dos fuelles interconectados y localizados en el centro de la cámara, unidos a un eje que transmite el movimiento de los fuelles al exterior de la cámara (Fig. 2.1).

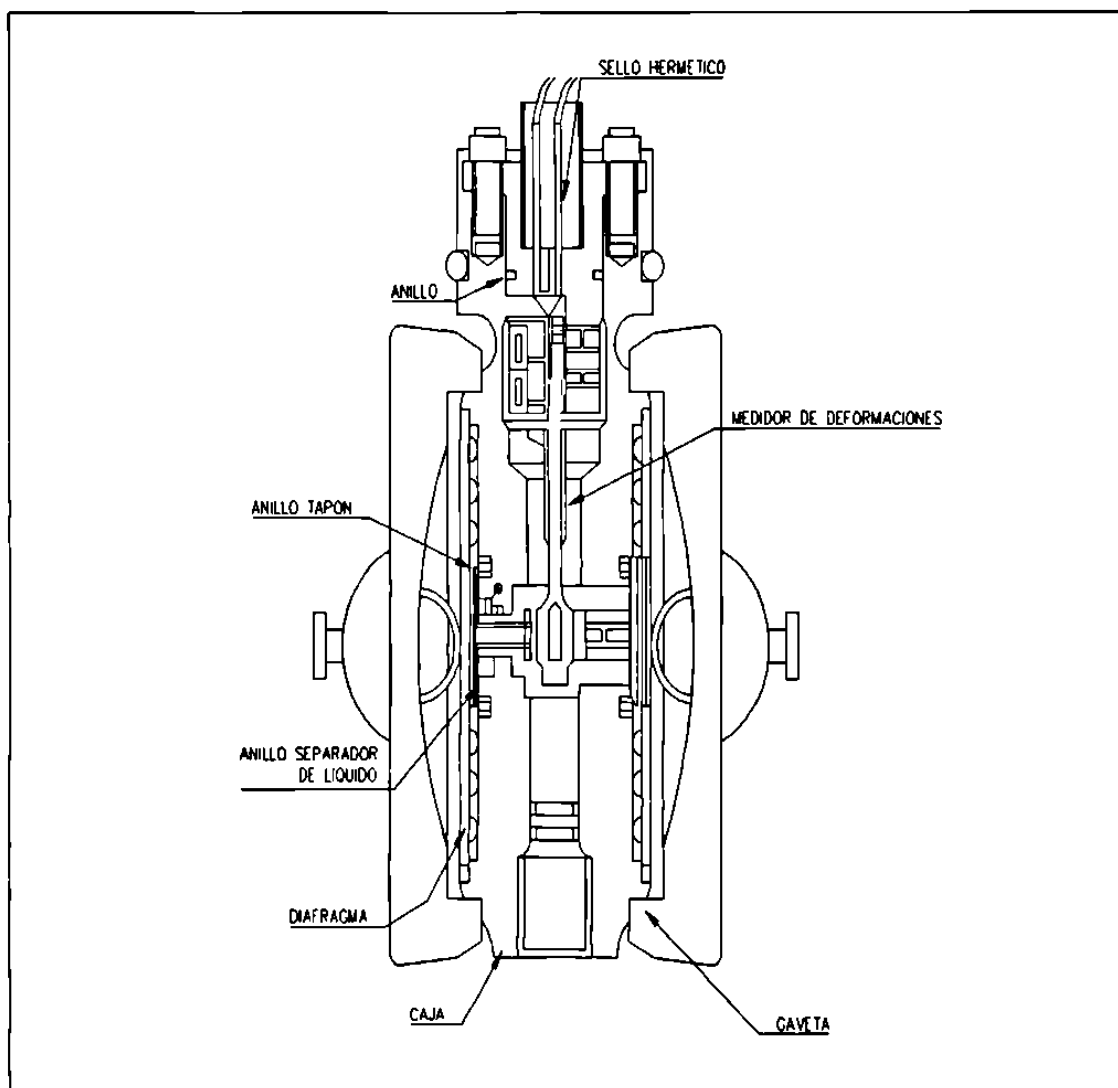


Figura 2.1 Célula Diferencial Tipo "Dri-Flo"

Cuando se aplican diferentes presiones, el fuelle del lado de alta presión se contrae, moviendo el eje de conexión en la dirección de baja presión, ocasionando así la expansión del fuelle del lado de la cámara de baja presión.

El movimiento de los fuelles se transmite mediante un tubo de troqué directamente al brazo de la pluma de un registrador, o un transductor.

2.5.1.2 Célula Diferencial Tipo "Strain Gage"

En este tipo de elemento secundario, la presión diferencial se transfiere hacia el elemento de medición (Strain Gage), a través de una cámara sellada llena de silicón (Fig. 2.2).

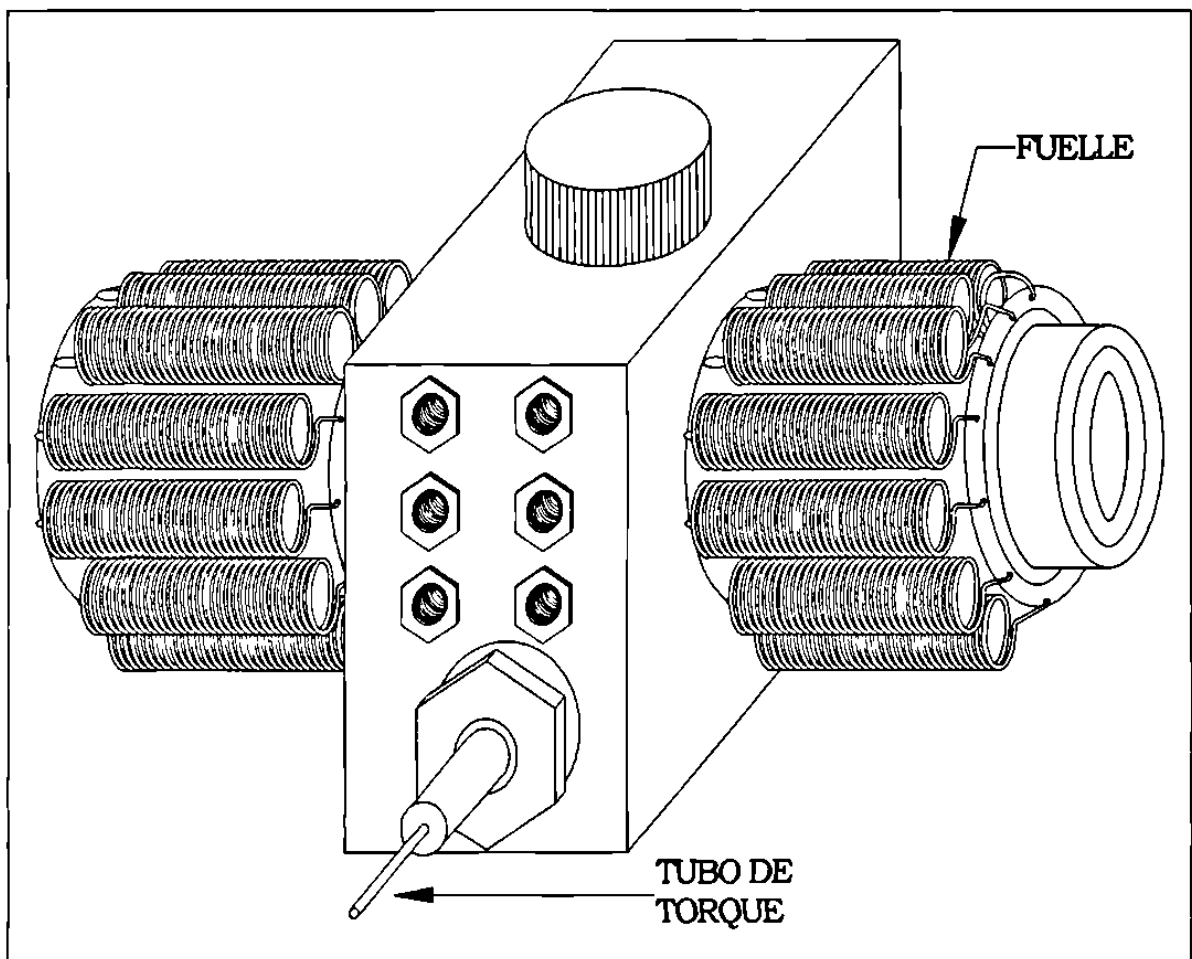


Figura 2.2 Célula Diferencial Tipo "Strain Gage"

A la salida del "Strain Gage", la señal es amplificada y convertida luego en una señal de salida de 4 a 20 m. amps. (c.d.) para ser transmitida al registrador y demás componentes del circuito.

2.5.1.3 Transmisores Electrónicos

Los transmisores electrónicos (transductores) son dispositivos que forman parte de los elementos secundarios de un equipo de medición; reciben señales que pueden ser del tipo: hidráulico, neumático, eléctrico, etc. y la convierten en señales que a su vez son transmitidas a otro dispositivo que pueden ser: registradores analógicos, equipos de cómputo, o graficadores, donde se decodifica y es presentada como información sobre caudales, volúmenes, etc.

Generalmente se construyen de acero inoxidable y aunque en el mercado hay mucha variedad de estos equipos, pocas compañías han utilizado los "Strain Gages" como base principal para la medición de caudales, ya que generalmente se utilizan como transmisores.

2.5.2 Registradores

Los registradores son los elementos secundarios que convierten las señales enviadas por los transmisores de presión diferencial, en información sobre caudales y volúmenes, ya sea en forma gráfica o digital.

Cuando sea necesario seleccionar este tipo de equipo, hay que poner especial cuidado en que sea compatible con la señal que produce el elemento primario y el transmisor, y que sea congruente con los

sistemas integrados de medición con que cuente el sistema de agua potable y saneamiento.

TABLA 2.1.1
CLASIFICACION DE MACROMEDIDORES

Medidores de agua	En conductos a presión	Velocidad	Helice o Propela	Woltmann	Vertical
				Silleta	Horizontal
			Cuello bridado Tipo carrete		
		Turbina Micromolinetete			
		Presion diferencial	Tubo Venturi	Corto	
				Largo	
			Tubo Dall Tobera Diafragma		
			Placa orificio	Concentrico Excentrico segmentado	
		Tubo de Pitot	Cole Simplex Modificado		
		Ultrasonicos	Tiempo en transito		
Efecto Doppler					
Electro-magneticos					
En conductos a gravedad	Vertedores Canal Parshall Area-Velocidad				

CAPITULO 3

INSTRUMENTACION CON MEDIDORES ELECTRONICOS DE DEFORMACION (STRAIN GAGES)

CAPITULO 3

INSTRUMENTACIÓN CON MEDIDORES ELECTRÓNICOS DE DEFORMACIÓN

3.1 Introducción.

En su forma más elemental un Strain Gages, una banda extensométrica o un medidor electrónico de deformación está constituida por un hilo metálico muy fino, en forma de parrilla montado sobre un soporte (Fig. 3.1), de tal manera, que la mayor parte de su longitud sea paralela a una dirección fija. Si se desea conocer las deformaciones de una estructura según una dirección, se pegará el extensiómetro con sus hilos paralelos a dicha dirección y, al deformarse aquella, producirá deformaciones en la geometría del hilo del extensiómetro que originarán una variación de su resistencia; por lo tanto, disponiendo de instrumentos capaces de medir variaciones pequeñas de la resistencia original del extensiómetro, se pueden conocer las deformaciones mecánicas de la estructura en la que se pegó. Por todo eso, un "Strain Gage" actúa como un elemento transductor, transformando la variación de una magnitud mecánica en la de una eléctrica y ésta, a la vez, se puede transformar en un parámetro a medir, en especial (Olivares Ponce, 1991).

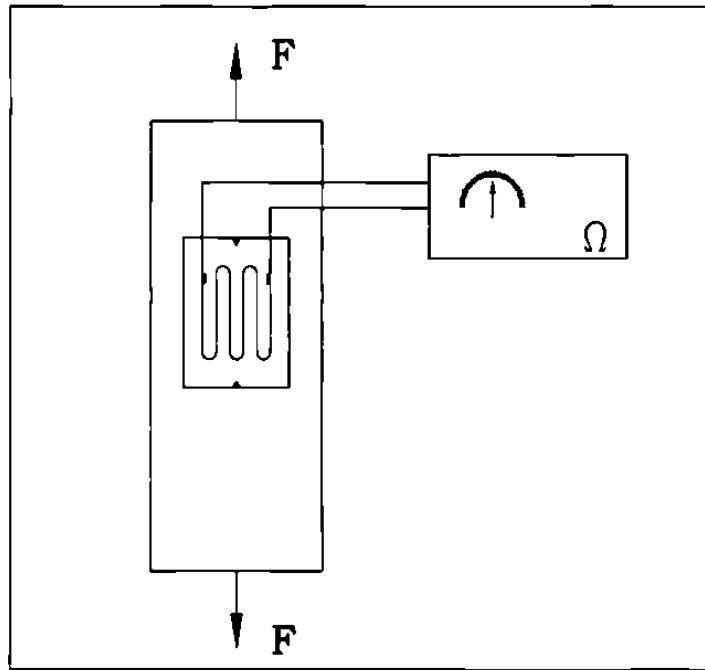


Figura 3.1. "Strain Gage" (Deformímetro electrónico)

3.2 Selección de Medidores Eléctricos de Deformación.

La instrumentación con "Strain Gages" requiere, como primera consideración, una selección apropiada para que éste sea adecuado al trabajo específico de que se trate. De ningún modo se debe considerar esto como un refinamiento exagerado; ya que, en gran parte, este aspecto de la medición será determinante en los resultados de un análisis de esfuerzos, conducido por este método o en el funcionamiento de un transductor, instrumentado con "Strain Gages".

La cuidadosa y racional selección de las características de los "Strain Gages" y la ponderación de los parámetros actuantes en las mediciones, constituyen factores muy importantes en la optimización

del trabajo, lo cual lograría una buena precisión en la determinación de las deformaciones unitarias y minimizaría los costos de operación.

3.3 Parámetros que Influyen en el Comportamiento de los Medidores Eléctricos de Deformación.

Las características de instalación y operación de un "Strain Gage" son afectadas por los siguientes parámetros, los cuales pueden determinarse en mayor o menor grado, en todos los casos de aplicación.

- La sensibilidad a la deformación de la aleación del filamento.
- El material de la base.
- La longitud de medición.
- La configuración del filamento.
- La autocompensación a las variaciones de temperatura.
- La resistencia eléctrica original.
- Opciones en la presentación.

Considerando todas las posibles combinaciones de los parámetros antes mencionados, la selección de un "Strain Gage" entre los 30 ó 40 mil opciones que presentan la producción de un solo fabricante, es un serio compromiso.

Debe complementarse básicamente la combinación de parámetros que sean compatibles con las condiciones ambientales y satisfacer las condiciones de instalación y operación. Los requerimientos son los siguientes:

- El grado de precisión.
- La estabilidad.
- La máxima elongación.
- La duración de la prueba.
- Las sollicitaciones cíclicas.
- La simplicidad y la facilidad de instalación

El costo de un "Strain Gage" no debe de ser motivo prioritario en la elección; el ahorro en el tiempo de instalación y la garantía de buen funcionamiento, en muchas ocasiones justifica el costo más elevado de un "Strain Gage" seleccionado.

Durante el proceso de selección, frecuentemente se presenta la situación de no satisfacer plenamente todos los requerimientos, debido a que los parámetros considerados tienden a resolver parcialmente el compromiso.

Otro aspecto práctico que permanentemente se presenta durante la elección de un "Strain Gage", es la disponibilidad. Ante esta situación, no podrá quedar nada establecido, sin embargo, el conocimiento profundo de las condiciones que no se cumplen servirá para realizar correcciones en las mediciones y tener una absoluta confianza en los resultados.

3.4 Identificación de los Medidores Eléctricos de Deformación.

Con el fin de ejemplificar cómo se identifican los "Strain Gages", se utilizará información de los productos de la compañía Micromeritics (M-M), considerando que los productos de otras compañías especializadas en la fabricación de "Strain Gages", tienen material semejante, y son los conceptos generales válidos para la medición de esfuerzos cuando se utiliza esta técnica.

El código para la identificación de los "Strain Gages" es particular para cada compañía productora; generalmente se utiliza una combinación de letras y números en determinada secuencia. En los catálogos correspondientes, se encuentran los códigos para interpretar estas clasificaciones.

Como ejemplo se describe el código de la compañía Micromeritics (M-M)

FA - XX - 250BG - 120 - Z

F = tipo de base

A = material del filamento

XX = coeficiente de autocompensación (STC)

250 = longitud de la parte activa del filamento (base de medida)

BG = configuración del filamento correspondiente a un catálogo de la compañía productora

120 = resistencia eléctrica en Ohms (nominal).

Z = opción

En todos los "Strain Gages" del tipo "foil" (filamento laminar) se encuentran indicados los ejes de la configuración y el logotipo del fabricante.

3.5 Características de los "Strain Gages".

3.5.1 Sensibilidad a la Deformación de la Aleación de Filamento

El factor principal que determina las características de operación de un "Strain Gage" es la sensibilidad a la deformación de la aleación utilizada en la construcción de la rejilla; sin embargo, este aspecto no puede ser considerado separadamente, ya que existe una interacción con la base o el soporte que lo contiene, formando un sistema. No es factible para un fabricante producir todas las combinaciones posibles con cinco tipos de base e igual número de aleaciones, y considerar como otra variable los cientos de configuraciones diferentes, esto sin tomar en consideración las distintas opciones de un mismo tipo.

Las diferentes aleaciones con que se fabrica el filamento de los "Strain Gages" producidos por M-M son las siguientes:

A = constantan (aleación autocompensada)

P = constantan (aleación templada)

D = aleación isoelástica (ARMOUR)

K = aleación de níquel-cromo (KARMA autocompensada)

C = aleación de hierro-cromo-aluminio (similar a D)

N = aleación de níquel-cromo (similar a NICROMEL "V")

3.5.2 Base de los "Strain Gages".

Convencionalmente, un "Strain Gage" del tipo "foil" está constituido por un filamento hecho por el proceso de fotograbado, montado en una base delgada de plástico, la cual tiene importantes funciones, como son:

- Proporcionar al sistema un medio que facilite el manejo del elemento sensible, durante la instalación.
- Presentar una superficie amplia para el pegado a la superficie del espécimen de prueba.
- Un medio de aislamiento eléctrico entre la superficie del espécimen de prueba y el filamento.

Básicamente, son tres los materiales que constituyen la base de los "Strain Gages" producidos por M-M: poliamida (polymide), epoxy y epoxy-fenólica, reforzada con fibra de vidrio.

Como en el caso de las aleaciones del filamento, la base no es un parámetro que deba seleccionarse separadamente. Ciertas combinaciones de aleación y base, aunados a algunas características de fabricación, son designadas como un sistema y dadas como características de una serie de "Strain Gages". Como consecuencia del procedimiento de selección de un "Strain Gage" no es posible elegir por

separado la aleación del filamento y el material de la base, esto queda limitado a la combinación que se fabrica. Cada serie tiene sus propias características y sus áreas preferenciales de aplicación.

A continuación se mencionan las características de los diferentes materiales que constituyen el respaldo o la base de los "Strain Gages", mas no las diferentes combinaciones con aleaciones de filamento que constituye una serie.

La base poliamida (polymide) es extremadamente flexible y es posible aplicar los "Strain Gages" fabricados con esta materia en contornos con muy pequeños radios de curvatura; además, este material es muy resistente, y hace que los "Strain Gages" sean poco susceptibles a dañarse durante la instalación.

Por la facilidad en el manejo y la posibilidad de aplicación a temperaturas entre los - 195 °C a + 175 °C el material poliamídico es ideal en la instrumentación para propósitos generales en el análisis de esfuerzos bajo sollicitaciones estáticas y dinámicas. La capacidad de elongación de este material es muy grande llegando al 20 % de deformación unitaria.

El material poliamida (polymide "E") es característico en las series EA, CEA. EP de los "Strain Gages" producidos por M-M.

El material de la serie MA es propiamente una resina epóxica, especialmente formulada, caracterizada por su alta rigidez y que no presenta ninguna deformación con el tiempo (creep).

Para las características antes mencionadas, los "Strain Gages" de la serie MA son recomendados para la instrumentación de transductores, ya que en esta aplicación se requiere de máxima estabilidad y precisión. Dada la naturaleza frágil de la resina epoxy, los Strain Gages de la serie MA no resultan apropiados para el trabajo de análisis de esfuerzos ya que son demasiado frágiles teniendo además muy limitada su capacidad de deformación (hasta 2%).

Para un buen trabajo de los "Strain Gages" en un amplio intervalo de temperaturas los "Strain Gages" con base de resina epoxy-fenólica reforzada con fibra de vidrio, resulta una selección adecuada. Esta base puede usarse en mediciones estáticas o dinámicas entre $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+290\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durante periodos cortos de medición este intervalo puede ampliarse a $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$. La deformación de este material se limita hasta aproximadamente el 2%. La resina epoxy-fenólica reforzada es empleada en las siguientes series producidas por M-M: WA, WK, SA, SK, WD, SD, TA, TK, y TD.

3.6 Componentes de un "Strain Gage".

3.6.1 La Longitud de Medición.

La longitud o base de medida de un "Strain Gage" es la parte activa o sensible de la rejilla; la porción final de cada filamento y las terminales son consideradas insensibles, debido a su sección transversal relativamente mayor y baja resistencia eléctrica.

En la selección de Strain Gages, una consideración muy importante es la longitud de medición y debe ser el primer parámetro a definir. Frecuentemente, la medición de deformaciones se realiza principalmente en los puntos críticos de una estructura o parte de máquina; esto es, en los puntos de mayor nivel de esfuerzo. Generalmente los puntos más esforzados están asociados con la concentración donde el gradiente es muy grande y el área de máximo esfuerzo se reduce a una pequeña región.

Siendo el Strain Gage un integrador que reporta la deformación que se produce a lo largo del filamento o rejilla, y siendo el promedio de cualquier deformación no uniforme; siempre menor que el máximo, un "Strain Gage" con base de medición mayor que la región, necesariamente indicará una deformación menor.

Como regla práctica, cuando es posible aplicarla, la longitud del medidor no debe ser mayor que 0.1 veces el radio de un agujero o ranura.

Por otra parte, debe recordarse, que con los "Strain Gages" muy pequeños se tienen algunos problemas, por lo tanto, habrá que ser muy cuidadosos en la elección.

Los "Strain Gages" muy pequeños, con base de medida menor de 1/8" (3.1 mm) presentan una degradación permanente de sus características originales, particularmente la capacidad de elongación y estabilidad bajo solicitaciones estáticas, y baja considerablemente su capacidad cuando se sujetan a deformaciones cíclicas. Cuando cualquiera de estas consideraciones es más importante que el promedio de deformaciones reportado por un Strain Gage de mayor longitud de medición, debe optarse por éste último.

Los "Strain Gages" con base de medición grande deben de ser seleccionados si se justifica su aplicación, y si presentan ventajas tales como una mayor facilidad de manejo e instalación, alambrado, etc.; sin embargo deberá de tomarse en cuenta la limitación en la capacidad de disipación del calor de los "Strain Gages" de grandes dimensiones, para la misma resistencia eléctrica nominal: bajo wattage por unidad de área del filamento. Esta consideración resulta muy importante cuando los "Strain Gages" se instalan en plástico u otros materiales con muy bajo poder de disipación térmica. Una inadecuada capacidad de disipación térmica genera un calentamiento en el filamento, en la base, en el adhesivo y en la estructura, y acarrea una consecuencia importante en la estabilidad, posición y, en general, en la alteración de las características originales de los "Strain Gages".

Hay casos de instrumentación con "Strain Gages" en que la selección de éstos deberá inclinarse por un extensómetro de gran

tamaño, a pesar de los inconvenientes antes mencionados; como, por ejemplo, la instrumentación de materiales heterogéneos para que la medición corresponda a la deformación promedio de los elementos constituyentes de la estructura. El caso de mediciones en concreto es un ejemplo típico de esta situación.

Sin pretender establecer una regla general en lo referente a la selección de la longitud de un "Strain Gages", se puede establecer que la dimensión longitudinal de un medidor comprendido entre 3 y 6 mm representa la mejor opción, ya que dentro de estas dimensiones se encuentran grandes variedades de configuraciones y resultan más económicos que los miniatura y con extra-largos.

3.6.2 La Configuración del Filamento.

Dentro de este aspecto de los "Strain Gages" deberá complementarse lo referente a la distribución del filamento, el número y orientación de los filamentos cuando se trata de arreglos múltiples. La forma y las dimensiones de las terminales para la conexión soldada y algunas otras características que son consideradas como estándar para un patrón en particular.

Todos los productores de "Strain Gages" elaboran catálogos en los cuales presentan los diseños o configuraciones de los "Strain Gages", generalmente designados por una clave, fabricándolos con diversas aleaciones en el filamento, los materiales de la base y otras opciones. Extendiendo la posibilidad de selección, en cuanto a la configuración del filamento, para adecuarse a las necesidades de instalación y los requerimientos de la medición.

3.6.3 Las Terminales

Estas deben de ser seleccionadas en función del espacio disponible para la instalación y con la orientación adecuada, debiendo tomar en consideración la habilidad del operario en el manejo de los "Strain Gages".

3.6.4 El Ancho de la Rejilla Formada por el Filamento.

Cuando se presenta en la superficie de la estructura un grado alto de deformación, perpendicular al eje longitudinal del "Strain Gage", un diseño angosto minimiza el error promedio en esas condiciones. Un diseño ancho de rejilla es ventajoso, debido a que se tiene un mayor poder de disipación térmica y consecuentemente una mayor estabilidad, principalmente cuando la instalación se hace en materiales pobres en poder de disipación térmica.

3.6.5 La Resistencia Eléctrica.

En algunos casos, la única diferencia entre dos configuraciones de la misma serie es la resistencia eléctrica del filamento, típicamente entre 120 y 350 Ohms. Cuando la posibilidad de selección exista, la mejor opción será la de la resistencia mayor, en virtud de generar un calentamiento menor; en proporción de 3 a 1, cuando se alimentan con

el mismo voltaje. Los "Strain Gages" con alta resistencia eléctrica presentan una ventaja adicional por lo que respecta al efecto de la resistencia parásita que presentan los conductos de conexión a los instrumentos indicados y los efectos al existir gradientes térmicos en estos alambres. En forma similar, los efectos indeseables en las mediciones causados por "switchéo", anillos friccionantes u otras fuentes de perturbación de resistencia.

En el análisis experimental de esfuerzos, los "Strain Gages" unidireccionales deben usarse cuando se trate de mediciones en campos uniaxiales o biaxiales, pues es perfectamente conocida la dirección de los esfuerzos principales. Esta situación limita considerablemente el uso de este tipo de consideración, lo cual puede ser superada con la aplicación de rosetas de dos o tres elementos. Esta última es indispensable cuando no se conoce la dirección de los esfuerzos principales. Existen condiciones que establecen por consideraciones teóricas la dirección de los esfuerzos principales o bien es posible utilizar previamente a la instrumentación con "Strain Gages". Algunos métodos auxiliares, como por ejemplo las lacas frágiles o la fotoelásticidad reflectora para su determinación; en este caso pueden utilizarse rosetas con dos "Strain Gages", con terminales independientes o interconectadas, orientados a 90° , ya sea separados o superpuestos.

Las rosetas de tres elementos, orientados a 45° ó 60° (rectangular o delta), generalmente se instalan procurando que el eje de un elemento coincida con el eje de simetría de la pieza o con una referencia preestablecida. Como en el caso de las rosetas ortogonales de dos elementos, los "Strain Gages" de las rosetas rectangulares o deltas pueden estar separados o traslapados. Esta configuración se selecciona cuando el gradiente de deformación que se presenta en el punto de

medición es muy alto. Se debe tener cuidado con los aspectos de disipación térmica que este arreglo presenta y con el hecho de que la medición se efectúa a una distancia de la superficie. También deberá tomarse en cuenta la poca deformabilidad que presenta este tipo de rosetas para adaptarse a superficies con algún radio de curvatura. El espacio disponible es otro aspecto que debe contemplarse, para seleccionar entre las rosetas planas y las superpuestas.

CAPITULO 4

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN TRANSDUCTOR DIGITAL DE CAUDALES Y DE LA CONSOLA REGISTRADORA

CAPITULO 4

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN TRANSDUCTOR DIGITAL DE CAUDALES Y DE LA CONSOLA REGISTRADORA

4.1 Base del Diseño

El transductor digital de caudales tiene como base de diseño el comportamiento de una viga "en cantilever", es decir, empotrada en un extremo y con el otro extremo libre. A través de medir la deformación en el transductor, con la instrumentación de "strain gages", que producirá la fuerza de empuje del agua, se asociará esta al gasto que este pasando en ese momento, para así poder realizar la calibración del transductor y utilizarlo para aforar conductos circulares a presión con cualquier tipo de agua, ya sea potable, tratada o residual industrial - doméstica.

Se elaborará el diseño para que funcione en tuberías de cuatro pulgadas de diámetro, debido a que las pruebas se realizarán en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en un aparato de tuberías provisto de una tubería de cuatro pulgadas, de acero galvanizado; sin embargo, el transductor se dejará preparado para, posteriormente, poder trabajar con tuberías de 1 hasta 12 pulgadas de diámetro y un caudal máximo de 150 lps (como se mencionó en los alcances y limitaciones).

En el diseño se tomará en cuenta el hecho de que el transductor se podrá utilizar en aguas residuales del tipo industrial – doméstico, por lo cual la selección del material para su construcción será de duraluminio y acero inoxidable, los cuales soportan los efectos corrosivos de los posibles contaminantes presentes.

El diseño del transductor digital quedará tal y como se observa en la figura 4.1, en la cual se presentan ya ensambladas las diferentes piezas que lo constituyen.

4.2 Las Piezas que Forman el transductor Digital y los Materiales a Utilizar

La primera pieza es un vástago o viga “en cantilever” (empotrada en uno de sus extremos) con un diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada (1.27 cm) y una longitud de 7 pulgadas (17.78 cm), la cual se fabricará de acero inoxidable, para evitar problemas de corrosión, ya que estará en contacto directo con el agua (fig. 4.2), su diseño es tal que uno de sus extremos se empotre a través de un tornillo de $\frac{1}{4}$ de pulgada (0.635 cm) en una segunda pieza que se fabricará de duraluminio, con la forma y las dimensiones especificadas en la figura 4.3, la cual se instrumentará con “strain gages”, con el fin de medir la deformación transmitida del vástago a esta pieza de duraluminio, al aplicársele la fuerza con la cual el agua lo empuje y que el otro extremo quede al centro de la tubería en estudio, en el cual se colocará una tercera pieza, la cual va a tener la función de recibir el empuje del agua. La pieza tiene forma circular, con un diámetro de 1 pulgada (2.54 cm) sujeta al vástago a través de un tornillo de $\frac{1}{4}$ de pulgada (0.635 cm), según se observa en la figura 4.2.

Como el prototipo será fabricado especialmente para esta investigación, la longitud del vástago será tal que quede al centro de la tubería a aforar (tubería de 4 pulgadas de diámetro).

Una vez construídas y ensambladas las piezas antes mencionadas, la pieza de duraluminio se instrumentará, con base en "strain gages", tal y como se observa en la figura 4.1 y estas piezas se enroscarán en una tercera pieza, de acero inoxidable con rosca interna (npt) y un diámetro interno de 1 pulgada (2.54 cm). Esta pieza se tendrá que soldar al tubo que se pretenda aforar, por lo cual, a la tubería en estudio se le tendrá que realizar una perforación circular de diámetro de 1 pulgada (2.54 cm). Las dimensiones de esta pieza se muestran en la figura 4.4.

4.3 Selección de Strain Gages Para la Instrumentación del Transductor Digital.

Los "strain gages" que se seleccionarán tendrán como base una resina epóxica que se caracteriza por su alta rigidez y no presenta ninguna deformación con el tiempo; esto para asegurar que no se modifique con el tiempo la forma de operar del transductor.

La colocación de los "strain gages" se realizará a puente completo* (ver fig. 4.5) y se deberá de proteger ésta con un tramo de manguera de hule, sujeta con abrazaderas o algo similar.

* el "circuito a puente completo" es aquél cuyas cuatro ramas son activas, es decir, todas se deforman por sollicitaciones mecánicas, ya que todas intervienen en la medida.

Los "strain gages" que se seleccionarán para la instrumentación del transductor digital se adquirirán de la compañía Micromeritics (M-M) cuyo código es MA-13-125-BG-350.

En el código del "Strain Gage" seleccionado, la letra "M" es el tipo de base del "Strain Gage", el cual se seleccionó porque es una resina epóxica que se caracteriza por su alta rigidez y no presenta deformación con el tiempo (creep).

La literal "A" indica el material del filamento, el cual es un tipo constatan, de una aleación que tiene la característica de ser una aleación compensada (45%Ni-55%Cu-sensibilidad(F_s)=2.1), la cual es procesada para que adquiera compatibilidad con respecto al coeficiente de dilatación térmica de los materiales más frecuentemente usados en la fabricación de estructuras y partes de máquinas, lo cual la convierte en una aleación compensada con el mismo coeficiente de dilatación lineal (STC) que en el material de la estructura o parte de máquinas, teniendo una mínima deformación aparente en el intervalo de temperatura entre los -45°C a 205°C

Otras razones por las cuales se escogió este material son: que tiene una alta sensibilidad a la deformación (F_s), una alta resistividad, también que se caracteriza por tener un buen comportamiento bajo condiciones de fatiga, y tiene capacidad para soportar grandes deformaciones.

En general el material de la serie MA es propiamente una resina epóxica especialmente formulada para que se caracterice por su alta rigidez y por no presentar ninguna deformación con el tiempo.

El número 13, en el código, indica el coeficiente de autocompensación (STC) el cual es el más cercano al del material de la pieza de duraluminio, ya que ésta es la que se va a instrumentar.

El número 125 indica la parte activa del filamento, y se seleccionó así por su facilidad de manejo y la instalación del alambrado.

Las literales BG, en el código, indican la configuración del filamento correspondiente al catálogo de la compañía Micromerements (M-M).

El número 350, representa la resistencia eléctrica del "strain gage" en Ohms, el nivel de variación de la resistencia oscila entre 120 y 350 Ohms. Se utilizará esta resistencia de 350, debido a que, entre mayor sea la resistencia eléctrica, menor será el calentamiento del "strain gage", además, los "strain gages" con alta resistencia eléctrica presentan una ventaja adicional, por lo que respecta a la resistencia parásita que presentan los conductos o alambres de conexión de los instrumentos y los efectos indeseables al existir gradientes térmicos en estos alambres. Además, minimizan los efectos causados por el switcheo u otras fuentes de perturbación de resistencia.

4.4 Diseño de la Consola o Registrador.

La consola o registrador (Fig. 4.6) para su funcionamiento requiere conectarse a la corriente directa (110 volts) o tiene la capacidad de trabajar con corriente alterna, para lo cual se requiere de 4 pilas de 1.5 volts. En sí, la consola es una armazón metálica que cuenta con las siguientes partes:

- a).- Un circuito eléctrico conectado a una pantalla líquida de cuarzo, en la cual se van a registrar las lecturas que manden los "strain gages".
- b).- En la parte de atrás de la consola se tiene una entrada de cuatro conectores, en la cual se van a conectar los cables de cada uno de los "strain gages".
- c).- También cuenta con una conexión para poder utilizar la consola con corriente alterna (110 volts) y un tornillo de ganancia de lectura, el cual sirve para tener la posibilidad de que en la pantalla se registre cualquier valor inicial de lectura, antes de iniciar las pruebas o mediciones.
- d).- En la parte trasera también se dejó un conector de salida, para que en el futuro se pueda sistematizar la medición de caudales con el transductor digital, al conectarse a una PC.

e).- Por la parte frontal de la consola se tiene el switch de encendido y apagado, una perilla que sirve para ajustar las lecturas y un conector para retener la lectura en cualquier momento de la aforación.

4.5 Instalación y Funcionamiento del Transductor Digital.

La instalación del transductor digital es relativamente fácil, excepto que se requiere realizar una perforación en la tubería a aforar, de aproximadamente 1 pulgada de diámetro y, posteriormente, acoplar mediante soldadura, una pieza con rosca externa (npt) para fijar en ella el transductor. Una vez fijado el transductor, el vástago o viga en cantilever del transductor quedará al centro de la tubería y éste se conecta a la consola registradora, se enciende la consola y, posteriormente, se hace pasar flujo en la tubería, para iniciar la prueba de medición de caudal; aclarando que la medición será instantánea, es decir, se podrá obtener el gasto que pasa en la tubería en el mismo momento que se registre la lectura en la consola. La desventaja de la consola es que no tiene la capacidad de almacenar los datos que registra, con respecto al tiempo; por lo cual siempre se requiere un operador que este anotando las lecturas.

El funcionamiento del transductor es relativamente sencillo, ya que, al pasar un flujo de agua en la tubería en estudio, ésta impactará en el vástago, el cual transmitirá una deformación a los "strain gages" y éstos mandarán un registro a la pantalla que llamaremos lectura en consola, la cual se pretende relacionar con el gasto.

4.6 Mantenimiento del transductor.

El diseño y construcción del prototipo debe ser tal, que el mantenimiento sea el mínimo necesario, ya que los materiales utilizados serán capaces de resistir al medio ambiente y los contaminantes del agua, si es que los tiene.

Mientras se trabaje en el nivel o rango para el cual se diseña no debe de requerirse mantenimiento correctivo y sólo se requerirá mantenimiento preventivo, como limpieza del transductor después de realizarse pruebas o mediciones. Cuando se utilice la consola o el registrador con baterías o pilas se deberá asegurar que éstas tengan carga y, de ser posible, siempre haya un lote de repuesto.

4.7 Tendencias para el Futuro.

Se pretende, en el futuro, poder conectar el transductor a una PC, generando un software específico o mandar la información registrada a una base de datos en el software microsoft excel, y así tener la capacidad de almacenar la información registrada, para poder dejar trabajar el transductor en tiempos largos de operación, sin la necesidad de que se tenga un operador durante todo el tiempo de las mediciones, y para tener registrados los cambios de gastos en función del tiempo en periodos muy largos de pruebas.

Otra tendencia para el futuro sería construir más transductores y una estación fija de captura de datos, los cuales se mandarían a control remoto, desde el punto donde se coloquen los transductores. Esto sería más práctico, ya que se podrían aforar diferentes tuberías a la vez, sin la necesidad de que cada transductor tenga su propia estación de captura de datos. Esto ya está al alcance, pues actualmente estos sistemas se utilizan en equipos medidores de temperatura, de humedad relativa, de velocidad de vientos, etc.

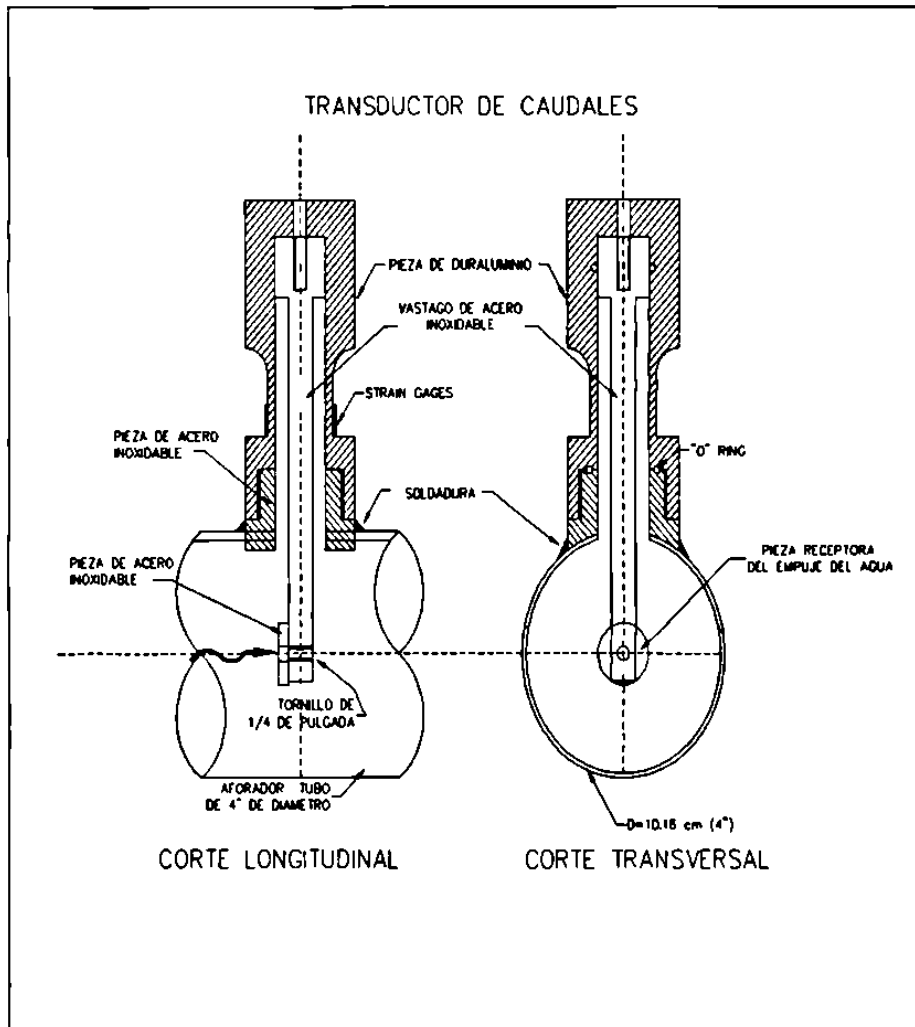


Figura 4.1 Corte Longitudinal y Transversal del Transductor digital ensambladas todas las piezas que lo constituyen.

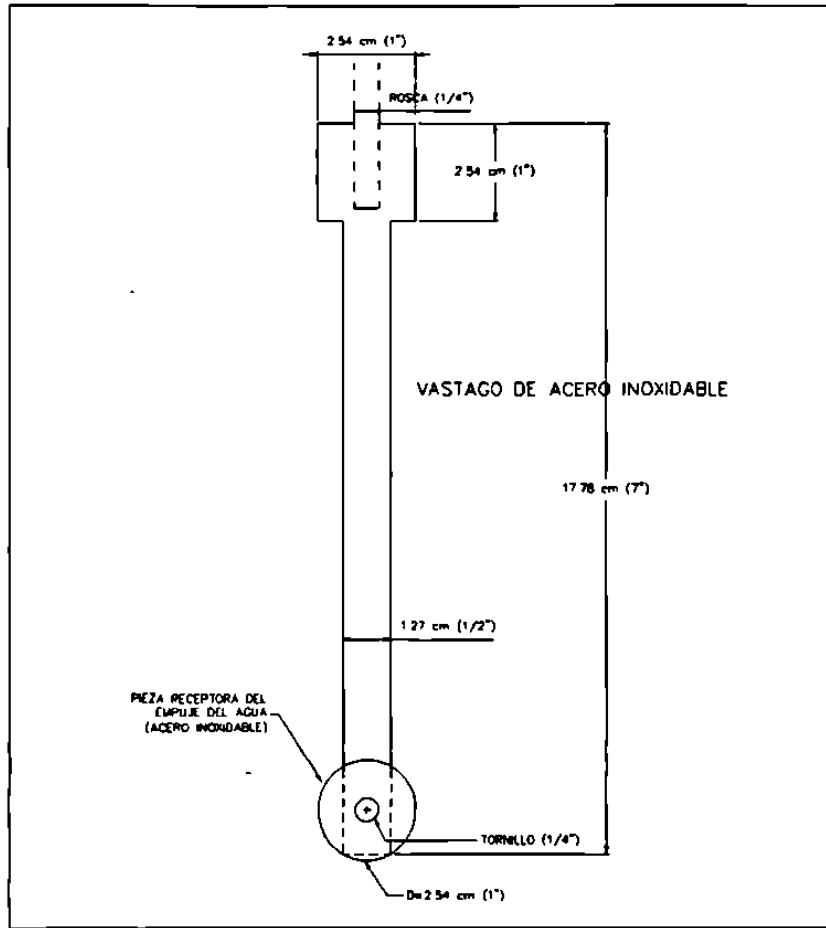


Figura 4.2 Vástago o Viga en Cantiliver

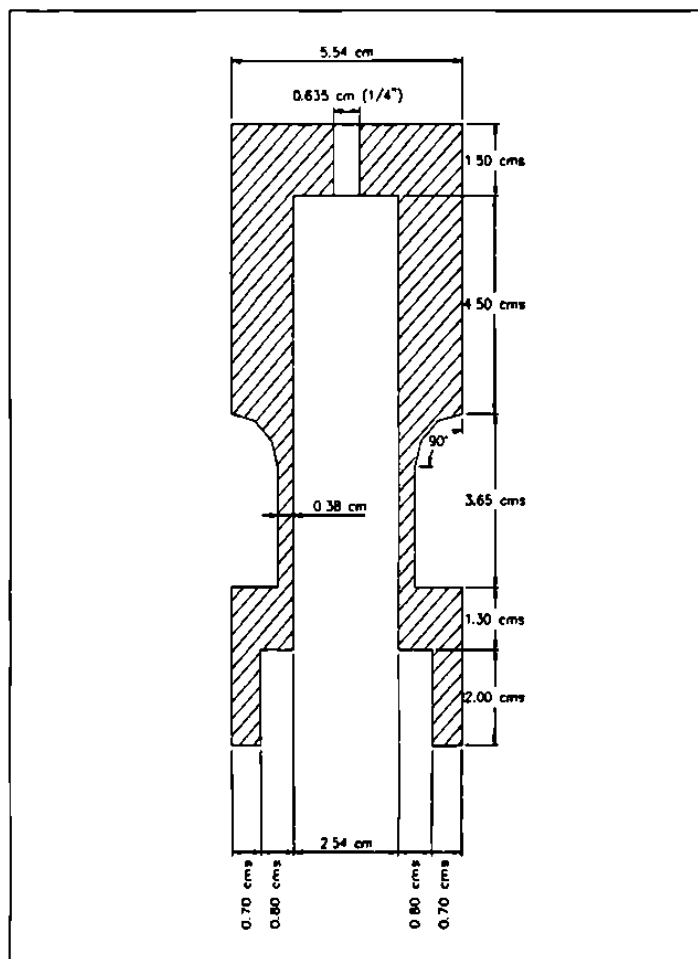


Figura 4.3 Pieza de Duraluminio

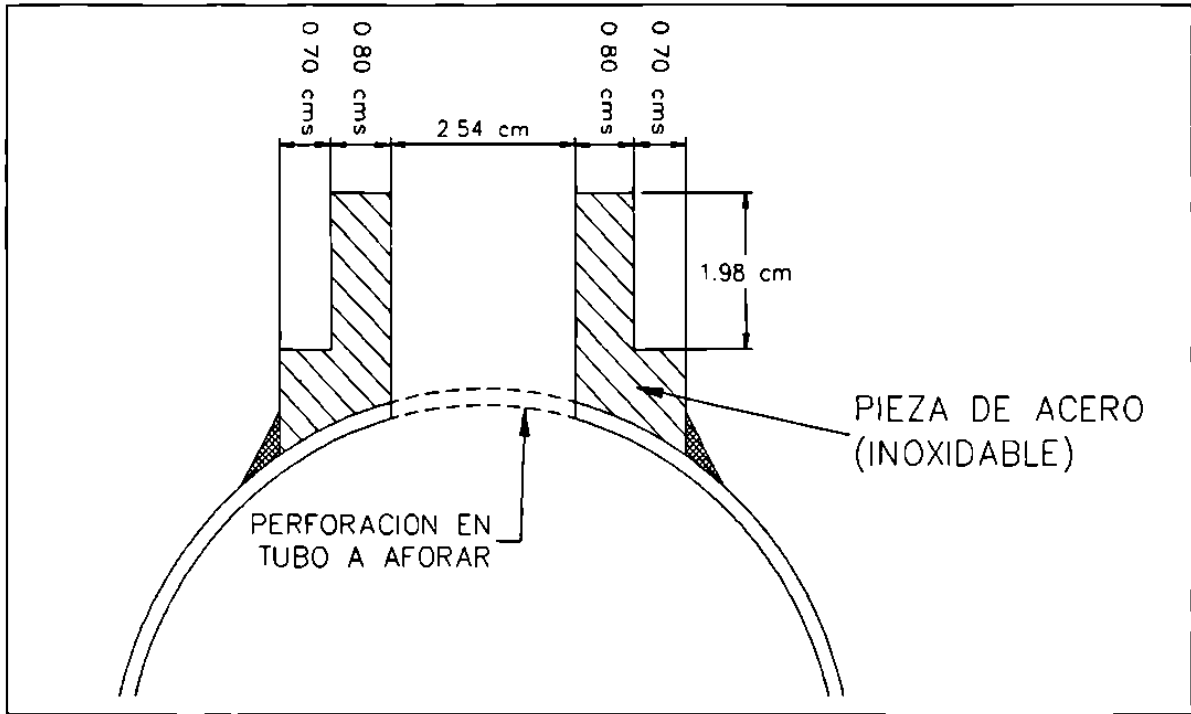


Figura 4.4 Cople Soldado a la Tubería para la Colocación del Transductor

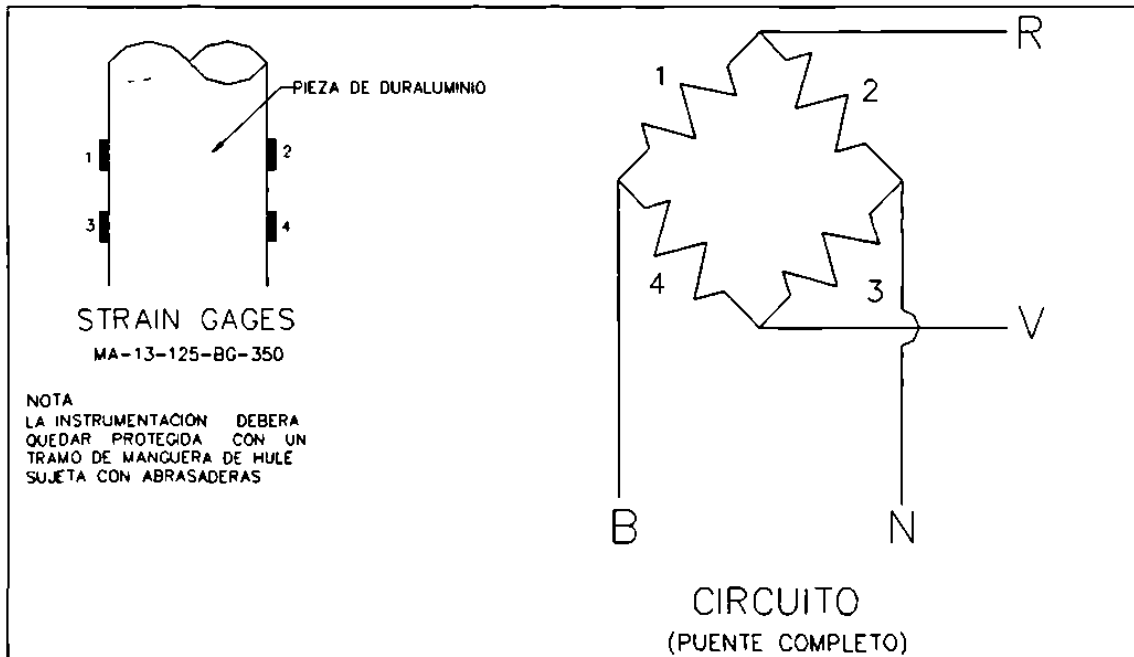


Figura 4.5 Instrumentación de "Strain Gage" a Puente Completo

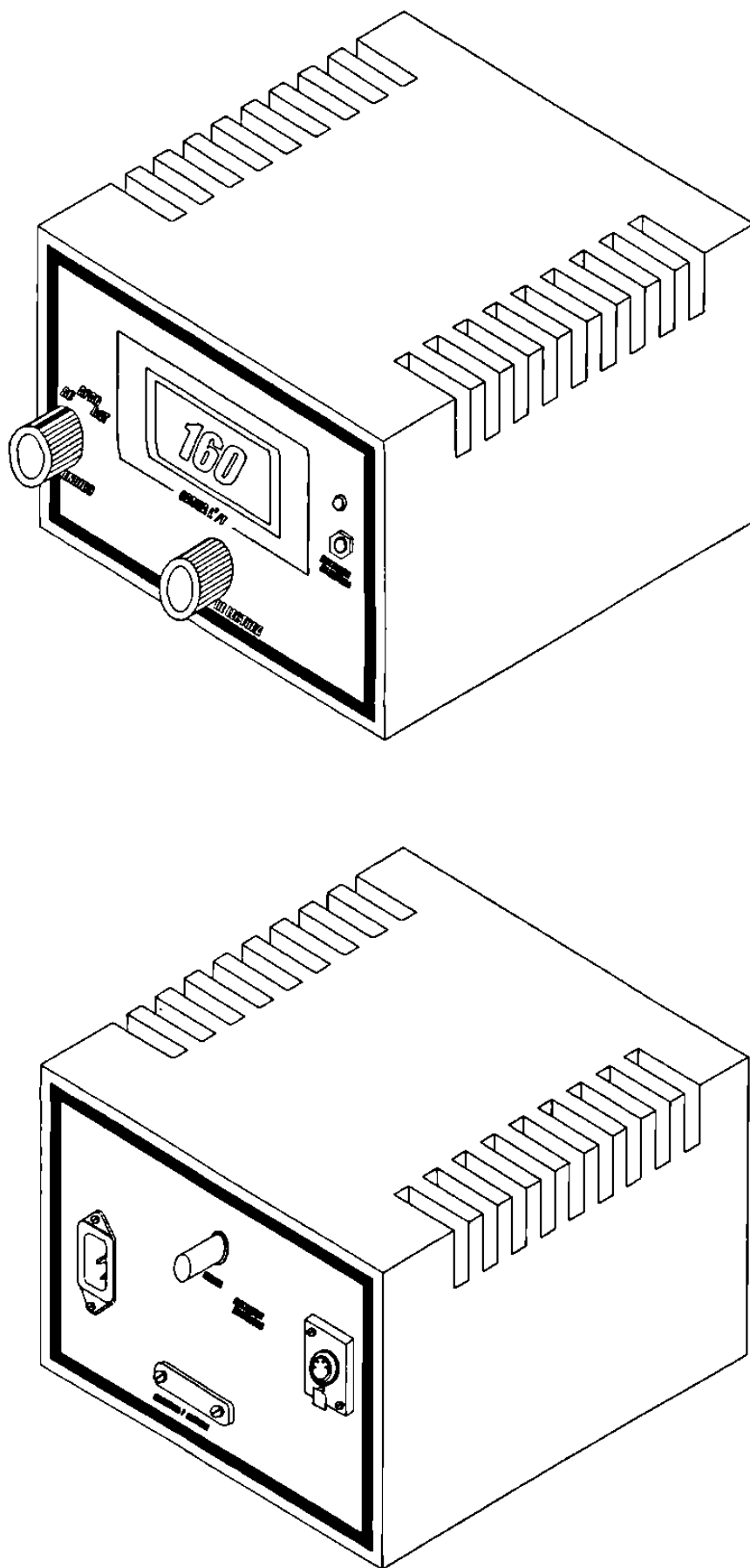


Figura 4.6 Consola Registradora

CAPITULO 5

CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DIGITAL DE CAUDALES Y VERIFICACION DE LA ECUACION OBTENIDA.

CAPITULO 5

CALIBRACION DEL TRANSDUCTOR DIGITAL DE CAUDAL

5.1 Descripción del Laboratorio de Hidráulica

El Laboratorio de Hidráulica se ubica dentro de las instalaciones del Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, entre las Avenidas: Fidel Velázquez y Avenida Universidad, en el Municipio de san Nicolás de los Garza, N.L y depende directamente del Departamento de Hidráulica (fig. 5.1).

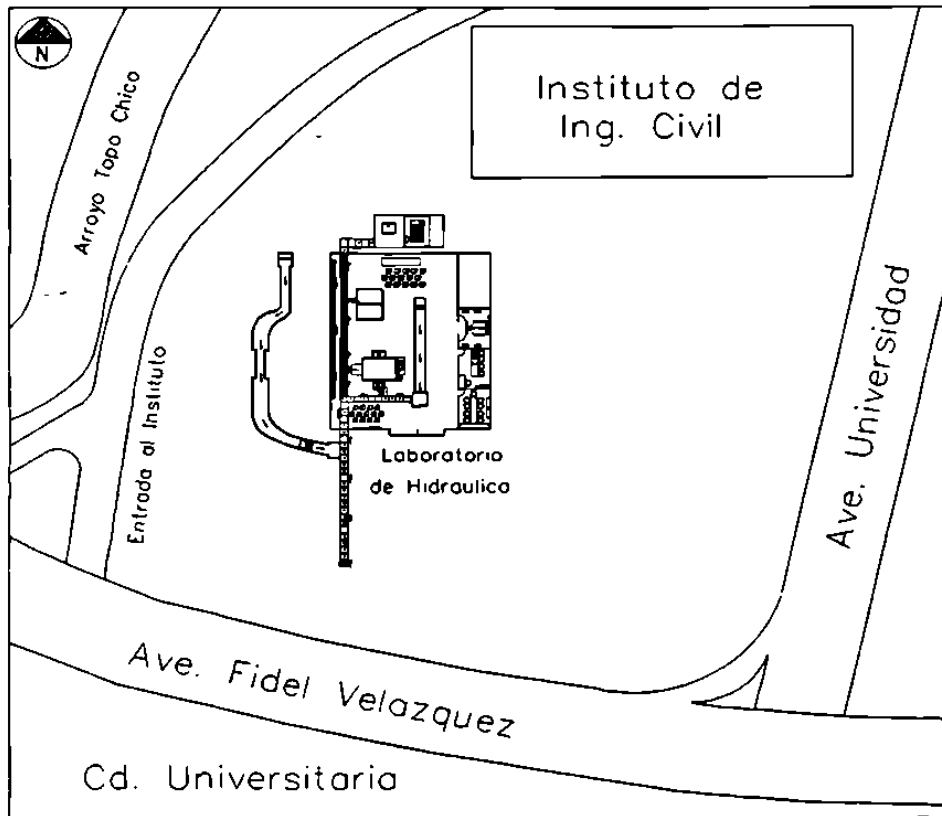


Figura 5.1 Ubicación del Laboratorio de Hidráulica.

Este laboratorio fue diseñado con un fin académico, ya que los estudiantes de licenciatura cursan varias materias teórico - prácticas para validar y entender todos los conocimientos teóricos adquiridos en sus clases y también con el fin de realizar investigaciones y modelaciones físicas de los fenómenos hidráulicos.

5.2 Funcionamiento del Laboratorio de Hidráulica.

El funcionamiento hidráulico del laboratorio es un ciclo cerrado, ya que en una cisterna se almacena agua proveniente de la red de agua potable de la ciudad; una vez almacenada ésta, se manda hacia un tanque elevado o de carga constante, a una altura de 7 m, a través de un sistema de bombeo que toma el agua de la cisterna y se mantiene una carga o altura de agua constante en el tanque y, por gravedad, el agua fluye del tanque hacia los modelos hidráulicos para poder realizar las pruebas que se deseen y una vez que el agua pasa por los modelos hidráulicos, ésta llega a un canal de retorno, por el cual regresa toda el agua utilizada hacia la cisterna y vuelve a comenzar el ciclo; es decir, las bombas toman el agua de la cisterna, la mandan hacia el tanque de carga constante y de él baja por gravedad, entra a los modelos hidráulicos y sale de ellos hacia el canal de retorno a la cisterna y así, sucesivamente, se cumple el ciclo hasta el momento en que se suspenda el sistema de bombeo (fig. 5.2.).

5.3 Partes Integrales del Laboratorio de Hidráulica Utilizadas en la Calibración

A continuación se describirán las partes que integran el laboratorio de hidráulica, tanto las instalaciones, como los modelos hidráulicos, los equipos y los accesorios utilizados en los modelos hidráulicos.

5.3.1 Cisterna

La cisterna está ubicada en la parte norte, fuera del laboratorio; tiene como función la de almacenar agua, con el fin de asegurar que el laboratorio siempre cuente con ella y, por consiguiente, en cualquier momento poder realizar pruebas. La alimentación a la cisterna se hace a través de una tubería de 1 pulgada de diámetro, conectada a la red de agua potable de la ciudad y tiene la capacidad de almacenar, aproximadamente, 80 m³, debido a que sus dimensiones son de 6.0 m de largo por 4.5 m de ancho, una profundidad de 3.0 m. Además, se cuenta con un cárcamo de bombeo, para que de ahí las bombas tomen el agua .

5.3.2 El Cuarto de Bombeo

Sobre la cisterna se encuentra instalado el cuarto de bombeo, el cual cuenta con dos bombas verticales, conectadas en serie, de tipo turbina; cada una con columna de succión de 8 pulgadas de diámetro por 3 m de longitud y un cuerpo de tazones de un paso con un motor eléctrico de 15 HP y capacidad de 50 lps, cada una las cuales tiene como función alimentar de agua el tanque elevado. Para su protección cuentan con un sistema de electroniveles, para asegurar que si la cisterna no tiene la cantidad mínima de agua requerida por las bombas estas no trabajen o se paren automáticamente, para evitar daños a las partes móviles de ellas.

En el cuarto de bombeo se tiene un sistema de válvulas de 8 pulgadas de diámetro, con el fin de dirigir el agua, si se requiere, directamente al laboratorio, sin pasar por el tanque elevado o mandar el

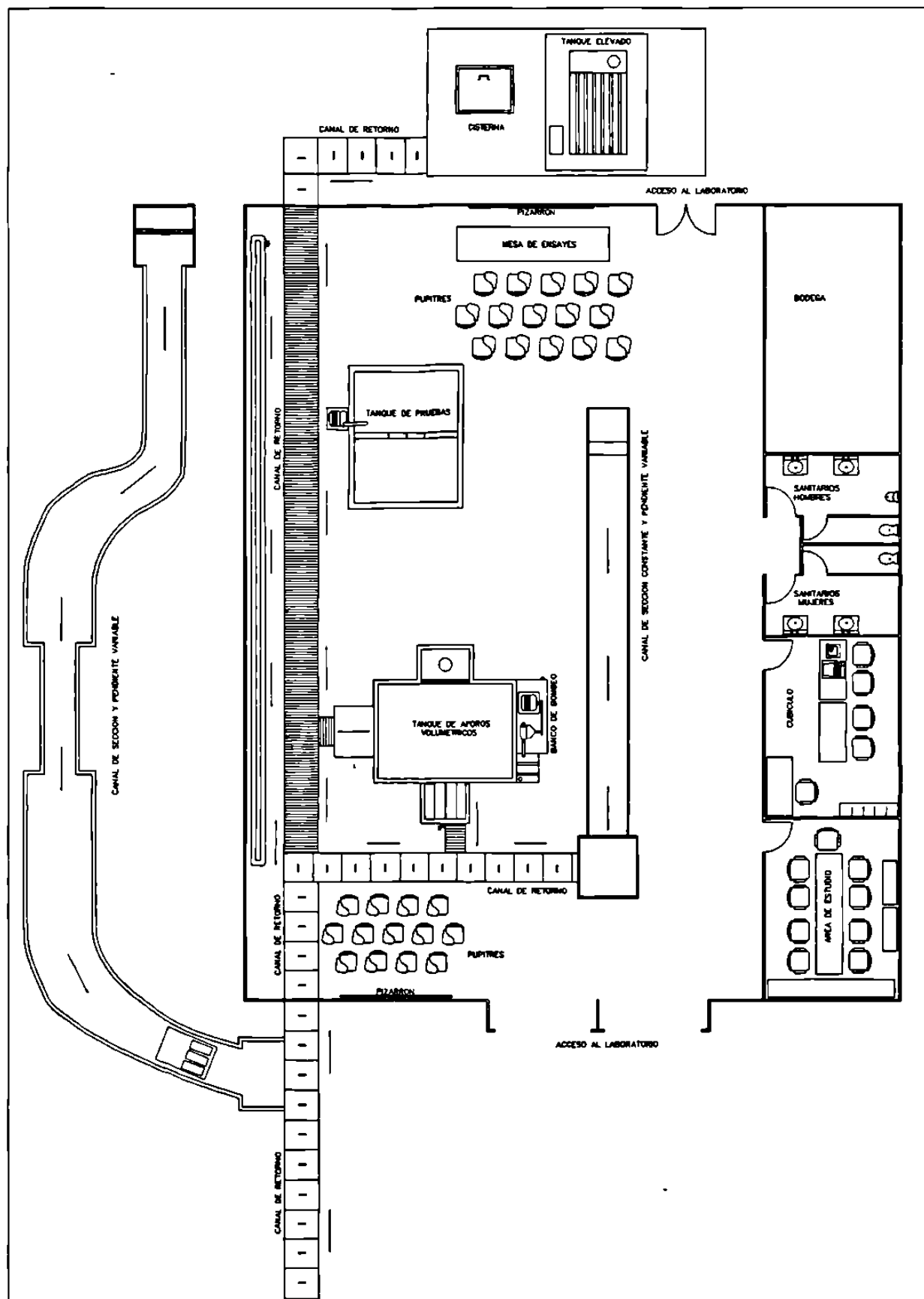


Figura 5.2 Laboratorio de Hidráulica

agua hacia una tubería externa al laboratorio, para vaciar la cisterna y darle mantenimiento.

5.3.3 El Tanque Elevado o Tanque de Carga Constante

Arriba del cuarto de bombeo, se tiene un tanque elevado, con una altura o carga hidráulica de 7 m, el cual es alimentado por las bombas antes mencionadas. Cuenta con un sistema de canaletas de demasías (ver anexo I) cuyo objetivo es asegurar una carga o altura de agua constante en cualquier momento de las pruebas, para así asegurar que el gasto que le llegue a los modelos hidráulicos no varíe, con respecto al tiempo. El agua en excedencia entra a esas canaletas, para posteriormente regresar directamente a la cisterna, a través de una tubería de retorno de diámetro de 12 pulgadas.

Del tanque elevado bajan tres tuberías de 8 pulgadas: dos de ellas dan alimentación a los modelos hidráulicos fijos, instalados en el laboratorio (tanque de aforos volumétricos, aparato de flujo en tuberías, canal de pendiente variable con sección constante y canal de sección y pendiente variable), y la tercera tubería alimenta fuera de laboratorio, para el caso de realizar modelaciones físicas a escala, o bien, para descargar en los jardines, al desaguar la cisterna.

5.3.4 El Aparato de Flujo en las Tuberías

La principal función de este aparato es la calibración de los equipos de medición, tanto de caudal como de presión y el estudio de pérdidas de energía del agua, debidas a la fricción y a la colocación de piezas especiales, tales como válvulas, cambios de dirección, bifurcaciones, ampliaciones y reducciones de sección.

Cuenta con cuatro tuberías de acero galvanizado (fig. 5.3), tres de ellas son completamente horizontales, de diámetros de 1, 2 y 4 pulgadas de diámetro nominal y una cuarta tubería, en la cual se tienen colocadas las piezas especiales antes mencionadas, con variación de diámetros, cambios de dirección y válvulas de diferentes tipos. Cada una de las tuberías cuenta, en su inicio, con un diafragma (aforador de caudal basado en caída de presión) con el cual se puede medir la cantidad de agua que pasa por ellas. Las tuberías están conectadas, al inicio del aparato, a través de una tubería vertical de 4 pulgadas de diámetro, en la cual se instaló una válvula de compuerta para poder regular la entrada de agua a las tuberías y, al final de cada una de ellas, se tiene otra válvula del mismo diámetro que la tubería, con el fin de regular la descarga. Todas descargan a una tubería común, de 4 pulgadas de diámetro, la cual, a la vez, descarga en el canal de retorno hacia la cisterna (ver anexo I).

A lo largo de la tubería se tienen, en diferentes puntos estratégicamente seleccionados, tomas piezométricas, las cuales sirven para medir la presión del agua en dichos puntos, así como tomas piezométricas antes y después de los diafragmas, con el fin de medir la caída de presión en el diafragma y así, a través de su ecuación de calibración, obtener el gasto que pasa por la tubería en estudio.

Para el registro de las presiones se cuenta con equipos instalados tales como: manómetros diferenciales de agua, (para medir presiones pequeñas), manómetros diferenciales de mercurio, (para medir presiones moderadas y altas) y manómetros de carátulas, para la medición de presiones altas.

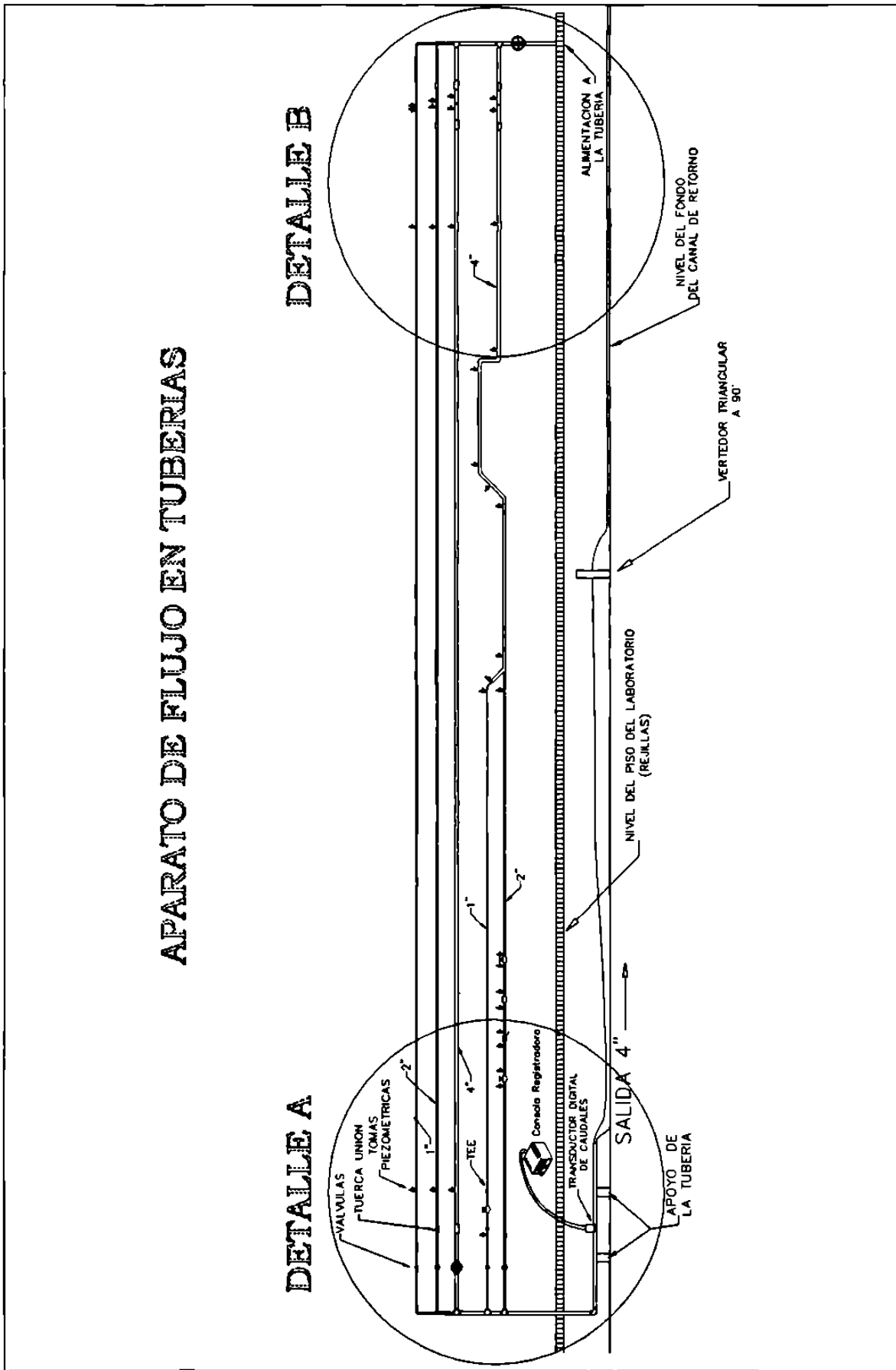
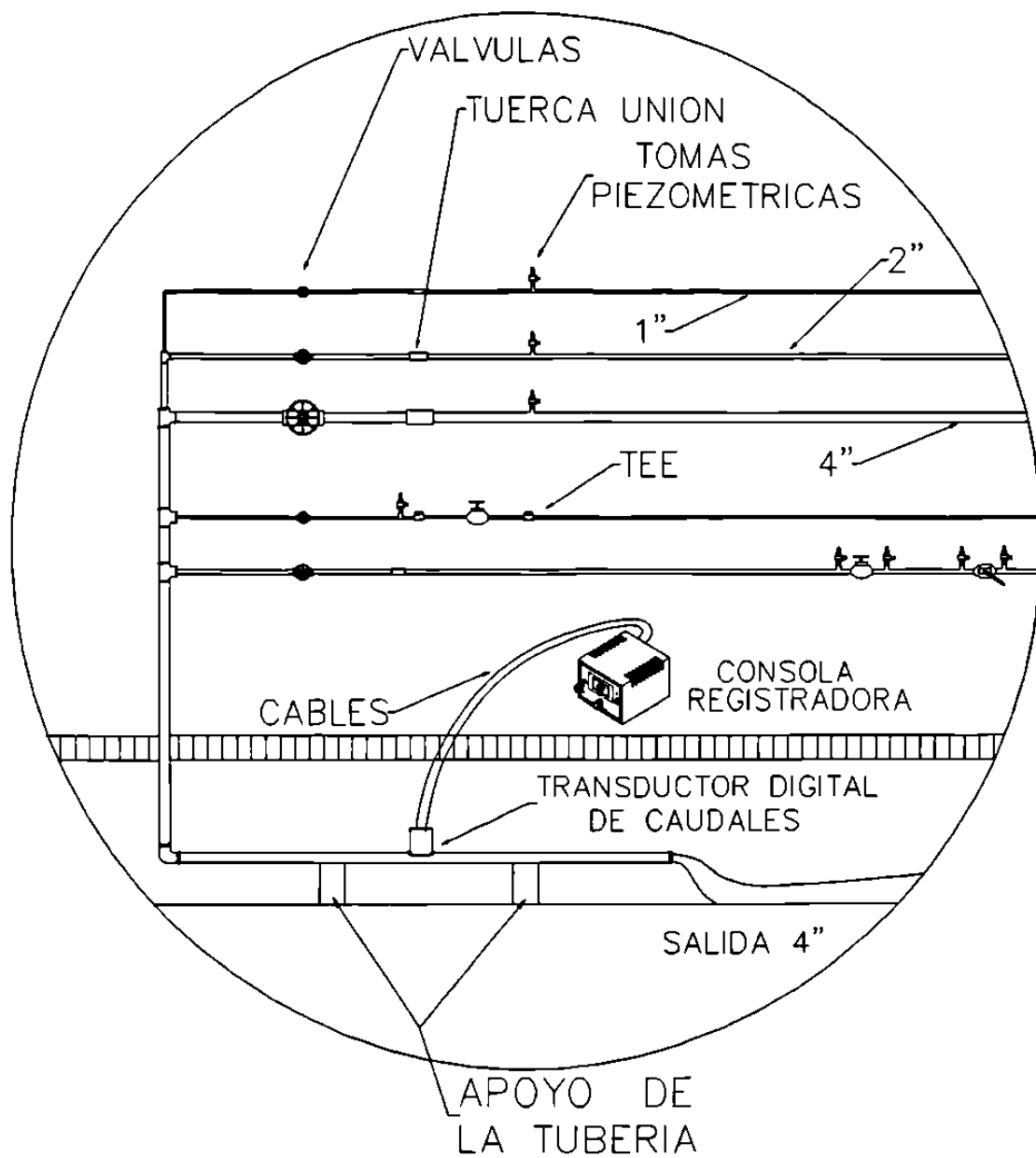
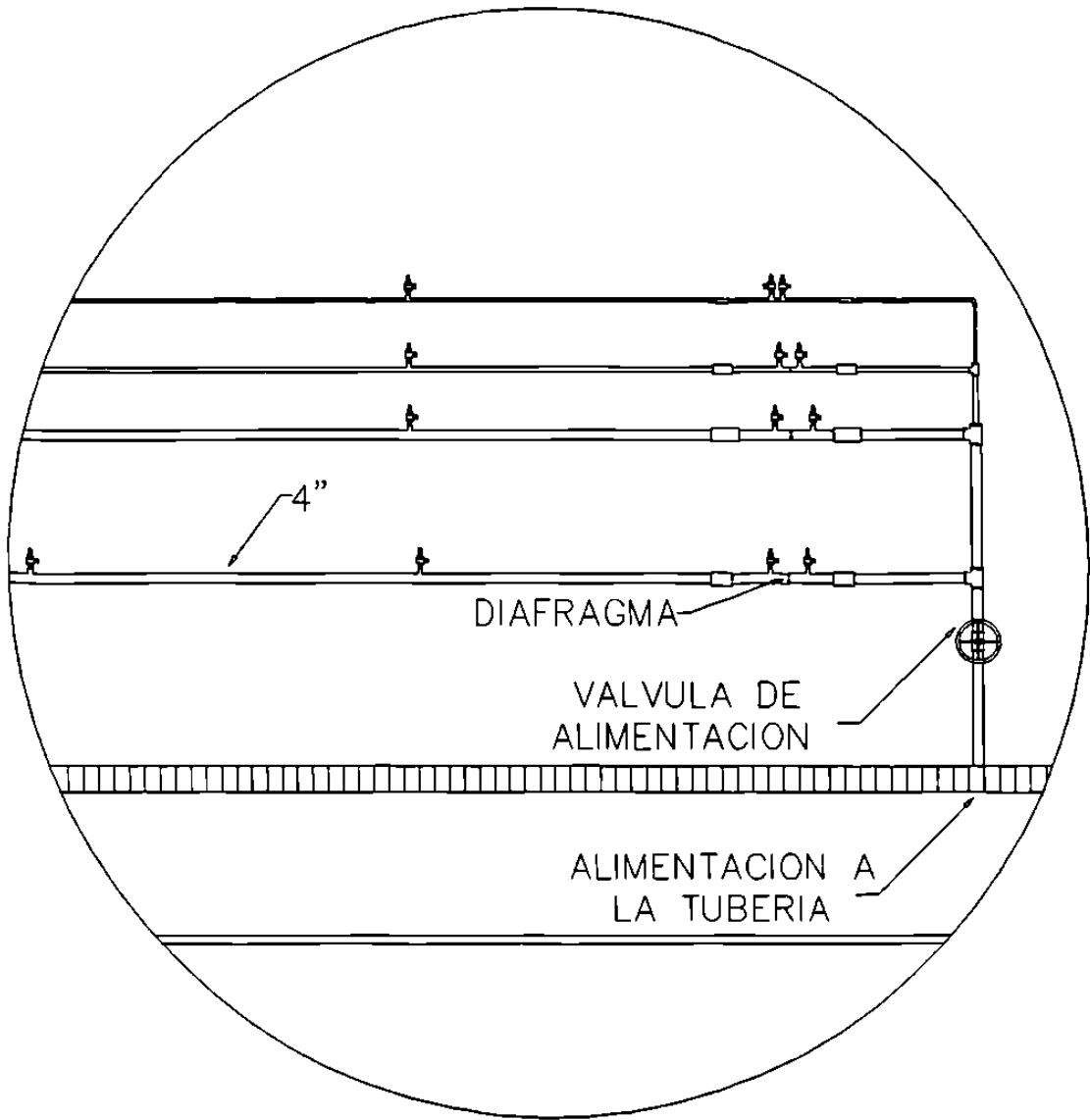


Figura 5.3 Aparato de Tuberías



Detalle A

Instalación del Transductor Digital de Caudales.



Detalle B

Instalación del Transductor Digital de Caudales.

Debido a que el laboratorio tiene un fin académico y de investigación, prácticamente a diario se utilizan estos equipos, por lo cual, al realizar pruebas y antes de ellas, se revisan las curvas y ecuaciones de calibración de los equipos; por lo cual garantiza que siempre estén dando lecturas correctas.

Además, el laboratorio cuenta con otros modelos hidráulicos tales como, canal de sección constante y pendiente variable, canal de sección y pendiente variable, tanque de aforos volumétricos, banco de bombeo provisto de bomba centrífuga y equipos menores que se utilizan como apoyo en las pruebas; tales como: calibrador de manómetros, rotámetro, multímetro, tacómetro, tubo de pitot, vertedores, venturímetros, diafragmas, toberas, higrómetro, densímetros, molinete hidráulico, limnómetro, limnógrafo, vernier, cintas métricas, tubos cortos, etc.

5.4 Calibración del Transductor Digital

A continuación, se explica cómo se realizaron las pruebas de calibración en el laboratorio, así como las adecuaciones que se tuvieron que hacer al aparato de tuberías.

5.4.1 Adecuaciones en el Aparato de Tuberías Para Realizar la Calibración.

En sí, las adecuaciones necesarias que se realizaron en el aparato de tuberías fueron en su descarga, ya que ésta era directamente al canal de retorno, a través de un tubo vertical de 4 pulgadas de diámetro, al cual se le colocó un codo de noventa grados, del mismo diámetro y en éste se unió o ensambló un tramo de tubería horizontal de 3 m de longitud, en el cual se hizo una perforación de aproximadamente una

pulgada de diámetro, a 1 m de la descarga de la tubería, en la cual se soldó la pieza que se utilizará para colocar el transductor (ver apéndice fotográfico).

5.4.2 Instalación del Transductor Digital

La instalación del transductor es relativamente sencilla, ya que una vez que se tenga la pieza soldada (la cual tiene rosca externa) en el tramo de tubería que se anexó en la descarga del aparato de tuberías, ahí se colocará o acoplará el transductor (rosca interna), de forma que el vástago quede al centro de la tubería.

Una vez colocado el transductor, el conector (macho) de los cables de los "Strain Gages" se conectará en la entrada de la consola o registradora (conector hembra), para posteriormente conectar la consola a la corriente alterna (110 volts) o bien utilizarse con pilas (4 pilas de 1.5 volts cada una), encenderla y en ese momento estar preparados para iniciar las pruebas de calibración.

5.4.3 Procedimiento de Calibración del Transductor Digital

El procedimiento para la calibración del transductor digital es el siguiente.

- a).- Verificar que la cisterna cuente con el volumen de agua mínimo que se requiere, para el buen funcionamiento de los equipos de bombeo (para las pruebas de calibración se asegurara que la cisterna este llena a su máxima capacidad para evitar problemas de entrada de aire a las tuberías).

- b).- Verificar que las válvulas de alimentación a los demás modelos del laboratorio estén cerradas para garantizar que toda el agua que se mande hacia los modelos, se canalice sólo hacia el aparato de tuberías.
- c).- Instalar el transductor digital de caudal en el aparato de tuberías tal y como se menciona anteriormente.
- d).- Encender la consola registradora del transductor digital de presión y colocar en la pantalla el valor de cero (esto con la perilla de ajuste de lectura).
- e).- Se colocarán las mangueras del manómetro diferencial de mercurio, en las tomas piezométricas del diafragma de la tubería horizontal de 4 pulgadas de diámetro.
- f).- Encender los equipos de bombeo y esperar a que se estabilice la carga en el tanque elevado, para asegurarse que ésta se mantenga constante, ya que esto asegurará que el gasto que mande el tanque hacia el aparato de tuberías no varíe con el tiempo(gasto constante).
- g).- Se abrirá al máximo la válvula de alimentación al aparato de tuberías y se cerrarán todas las válvulas de descarga del aparato de tuberías. Se abrirán las válvulas de expulsión de aire, colocadas en el manómetro diferencial de mercurio con el fin purgar el aire en las tuberías y el propio manómetro diferencial de mercurio para garantizar que dentro de ellas solo se tenga flujo de agua y así asegurarse que las lecturas de presión que se obtengan sean exclusivamente por el agua.
- h).- Una vez purgadas todas las tuberías se abrirá a discreción únicamente la válvula de descarga de la tubería horizontal de 4 pulgadas

- i).- Una vez estabilizado el flujo se procede a medir y a registrar las siguientes lecturas:
- La caída de presión en el diafragma de la tubería horizontal de 4 pulgadas de diámetro, registrada en el manómetro diferencial de mercurio.
 - La lectura registrada en la consola del transductor
- j).- Una vez registradas las lecturas antes mencionadas, se cierra, a discreción, un poco la válvula de alimentación al aparato de tuberías y se vuelve a medir y a registrar las lecturas del paso i
- k).- El paso anterior se realiza tantas veces se como pueda, tratando de obtener el mayor número de mediciones.

5.5 Datos obtenidos de las Pruebas de Calibración del Transductor Digital

Las pruebas en el laboratorio, para obtener la gráfica y la ecuación de calibración del transductor, se realizaron tal y como se describió en el procedimiento de calibración, obteniéndose los registros de laboratorio que se presentan en las tablas 5.5.1, 5.5.2 y 5.5.3, en las cuales se registran los datos de la lectura en la consola o registrador del transductor digital (lectura de consola) y la caída de presión del agua al pasar por el diafragma de la tubería horizontal de cuatro pulgadas de diámetro del aparato de tuberías (caída de presión en el diafragma, en metros columna de mercurio) para los tres ensayos realizados.

TABLA 5.5.1
REGISTRO DEL LABORATORIO DE LA PRUEBA No. 1

LECTURA EN LA CONSOLA ADIMENSIONAL	CAIDA DE PRESION EN EL DIAFRAGMA EN METROS COLUMNA DE MERCURIO (mcHg)
0	0.9
10	2.6
28	5.4
35	6.2
48	6.8
60	8.8
67	9.2
77	9.5
85	10.1
91	10.7
105	11.2
118	12.1
122	12.3
128	12.6

TABLA 5.5.2
REGISTRO DEL LABORATORIO DE LA PRUEBA No. 2

LECTURA EN LA CONSOLA ADIMENSIONAL	CAIDA DE PRESION EN EL DIAFRAGMA EN METROS COLUMNA DE MERCURIO (mcHg)
0	0.9
6	1.9
20	3.9
31	5.8
41	6.6
54	7.6
64	9.0
72	9.4
90	10.7
96	10.8
102	11.0
115	11.9
124	12.4
130	12.7

TABLA 5.5.3
REGISTRO DEL LABORATORIO DE LA PRUEBA No. 3

LECTURA EN LA CONSOLA ADIMENSIONAL	CAIDA DE PRESION EN EL DIAFRAGMA EN METROS COLUMNA DE MERCURIO (mcHg)
0	0.9
3	1.5
13	3.0
25	4.8
30	5.7
45	6.7
57	8.2
62	8.9
81	9.7
87	10.4
93	10.7
99	10.8
109	11.5
126	12.5

5.6 Procedimiento de Cálculo Para la Obtención de la Ecuación y de la Gráfica de Calibración del Transductor Digital de Caudales.

Una vez que se obtuvieron los datos en las pruebas de laboratorio se utilizó el siguiente procedimiento de cálculo:

- a).- Con los datos de caída de presión registrada en las tomas piezométricas del diafragma, se calcularon los gastos reales que pasan por la tubería usada en la calibración; esto se realizó utilizando la ecuación de caudal a través del diafragma.
- b).- Una vez calculados los caudales reales, éstos se relacionaron con las lecturas correspondientes en la consola del transductor y se realizó una regresión lineal a través de mínimos cuadrados para obtener la ecuación de calibración del transductor.

c).- Una vez que se obtuvo la ecuación de calibración se graficaron los valores de lectura de consola (LC) contra los caudales reales (Q) y la lectura de consola (LC) contra los caudales obtenidos a través de la ecuación de calibración(Qc), con el fin de observar en un mismo gráfico los valores reales y los teóricos.

Enseguida se da una explicación del método de la regresión lineal, utilizando mínimos cuadrados, con el fin de explicar el procedimiento matemático que se siguió en la obtención de la ecuación de calibración.

La expresión matemática de una línea recta que representa a un conjunto de parejas de datos (x,y) es la siguiente:

$$y = A_0 + (A_1) * (x) + E$$

En donde A_0 y A_1 son coeficientes que representan la intersección con el eje de las abscisas y la pendiente, respectivamente y E es el error o residuo entre el modelo y las observaciones, que se puede representar reordenando la ecuación anterior como:

$$E = y - A_0 - (A_1) * (x)$$

Por lo tanto, el error o residuo es la diferencia entre el valor real de "y" y el valor aproximado, $A_0 + (A_1) * (x)$, predicho por la ecuación lineal.

El criterio para el mejor ajuste es el de minimizar la suma de los cuadrados de los residuos (SR) de la siguiente manera:

$$SR = \sum_{i=1}^N Ei^2 = \sum_{i=1}^N (yi - Ao - (A1) * (xi))^2$$

donde:

N= Es el número de datos obtenidos en las pruebas de laboratorio.

i = Es un contador de los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio.

$\sum_{ii=1}^N Ei^2$ = Es la sumatoria de los cuadrados de los residuos entre los valores obtenidos en laboratorio con respecto a los obtenidos a través de la regresión lineal.

Este criterio tiene la ventaja de que el ajuste es a una línea única a un conjunto de datos dados y se minimiza el error.

Para determinar los valores de Ao y A1, se deriva la ecuación del error o residuo con respecto a cada uno de los coeficientes.

$$\frac{\partial SR}{\partial Ao} = -2 \sum_{i=1}^N (yi - Ao - (A1) * (xi))$$

$$\frac{\partial SR}{\partial A1} = -2 \sum_{i=1}^N ((yi - Ao - (A1) * (xi)) * (xi))$$

Al igualar las derivadas anteriores a cero se obtiene un mínimo de la suma de los cuadrados de los residuos (SR), haciendo esto la s ecuaciones anteriores se expresan como:

$$0 = \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N A_0 - \sum_{i=1}^N (A_1 * x_i)$$

$$0 = \sum_{i=1}^N (y_i * x_i) - \sum_{i=1}^N (A_0 * x_i) - \sum_{i=1}^N (A_1 * (x_i)^2)$$

Considerando que la sumatoria de los coeficientes que representan la intersección con el eje de las abscisas es igual a el número de datos multiplicado por el coeficiente de intersección con el eje de las abscisas

$\sum_{i=1}^N A_0 = N * A_0$, las ecuaciones anteriores se pueden expresar como un

sistema de dos ecuaciones lineales con dos incógnitas (A_0 y A_1), las cuales se resolverán directamente en el software para computadora Mathcad y así conocer las incógnitas antes mencionadas.

Posteriormente se estima el error obtenido en el ajuste, esto se realiza calculando lo siguiente:

- 1) La media (YMED), la cual es la suma de los datos individuales dividida por el número de datos.

$$YMED = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}$$

- 2) La sumatoria de los cuadrados de los residuos entre los datos y su media (ST).

$$ST = \sum_{i=1}^N (y_i - YMED)^2$$

- 3) La desviación estándar (SY), la cual es la medida de dispersión más común entre los datos y su media.

$$SY = \sqrt{\frac{SR}{N-1}}$$

- 4) La sumatoria de los cuadrados de los residuos entre los datos y los obtenidos con el ajuste (SR).

$$SR = \sum (y_i - A_0 - (A_1) * (x_i))^2$$

- 5) El error estándar de aproximación (EEA), el cual es la medida más común de dispersión entre los datos y la línea de regresión. Si el error estándar de aproximación es menor que la desviación estándar, esto indica que la regresión es válida.

$$EEA = \sqrt{\frac{SR}{N-2}}$$

- 6) El coeficiente de determinación (R2), el cual nos dirá que tan confiable es el ajuste realizado.

$$R2 = \frac{(ST - SR)}{ST} * 100$$

El coeficiente de correlación (R), el cual nos representa que tan representativo es el ajuste con respecto a los datos iniciales.

$$R = \sqrt{R^2}$$

5.7 Cálculos Realizados Para la Obtención de la Ecuación y Gráfica de Calibración del Transductor Digital de Caudales.

5.7.1 Cálculo de los Gastos a Través del Diafragma Colocado en la Tubería en Estudio.

Identificación de variables:

Q = Caudal a través de la tubería en estudio, en lps.

C_d = Coeficiente de descarga del diafragma, adimensional.

D_t = Diámetro de la tubería en estudio, en m.

D_o = Diámetro del orificio contraído en el diafragma, en m.

γ_m = Peso específico del mercurio, en kg/m^3 .

γ_a = Peso específico del agua, en kg/m^3 .

A_t = Area de la sección transversal de la tubería en estudio, en m^2 .

A_o = Area del orificio contraído en el diafragma, en m^2 .

g = Aceleración de la gravedad, en m/s^2 .

Δh = Lecturas registradas de caída de presión registrada en las tomas piezométricas del diafragma, en mHg.

LC = Lecturas registradas en la consola del transductor digital, adimensional.

I = Contador utilizado en la lectura de los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio.

N = Número de datos obtenidos en las pruebas de laboratorio.

M = Matriz de coeficientes del sistema de ecuaciones lineales utilizadas para la obtención de la ecuación de calibración.

V = Vector de términos independientes del sistema de ecuaciones lineales utilizadas para la obtención de la ecuación de calibración.

A_o = Coeficiente independiente de la ecuación de calibración del transductor digital, el cual representa la intersección de la recta con el eje de las ordenadas.

A_1 = Coeficiente del término dependiente de la ecuación de calibración del transductor digital, el cual representa la pendiente de la recta.

Q_c = Caudal obtenido con la ecuación de calibración, en lps.

Y_{MED} = Media de los valores de gasto obtenido de los datos de laboratorio, en lps.

ST = Sumatoria de los cuadrados de los residuos entre los datos de caudal obtenidos de las pruebas de laboratorio y su media.

SY = Desviación estándar entre los datos de caudal obtenidos de las pruebas de laboratorio y su media.

SR = Sumatoria de los cuadrados de los residuos entre los datos de caudal obtenidos de las pruebas de laboratorio y los obtenidos con la ecuación de calibración.

EEA = Error estándar de aproximación entre los datos de caudal obtenidos de las pruebas de laboratorio y la línea de regresión.

R2 = Coeficiente de determinación, el cual representa la confiabilidad del ajuste.

R = Coeficiente de correlación.

Asignación de variables (datos conocidos):

$Cd := 0.63$	$Do := 0.051$	$\gamma_m := 13600$	$I := 0..42$
$g := 9.81$	$Dt := 0.102$	$\gamma_a := 1000$	

Lectura de archivos externos realizados en el editor del sistema operativo de la computadora (datos obtenidos en el laboratorio).

$LC := \text{READPRN}(\text{LECTURA})$ $\Delta h := \text{READPRN}(\text{DIFERENCIAL})$

Donde:

READPRN es un comando del software mathcad que sirve para poder procesar la información de los archivos externos generados fuera de este software.

LECTURA es el archivo externo en el cual se tiene la información de los datos o lecturas registrados en el transductor digital.

DIFERENCIAL es el archivo externo en el cual se tiene la información de los datos o lecturas de caídas de presión registradas en el manómetro diferencial de mercurio en el diafragma utilizado para la calibración del transductor digital.

Cálculo del área de la sección transversal de la tubería en estudio, en m².

$$A_t = \frac{\pi D_t^2}{4} \qquad A_t = 0.008$$

Cálculo del área de la sección transversal del orificio contraído en el diafragma, en m².

$$A_o = \frac{\pi D_o^2}{4} \qquad A_o = 0.002$$

Cálculo de los gastos a través de la tubería para los diferentes ensayos de laboratorio, en lps.

$$Q_l := \left[C_d \cdot A_o \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_a} - 1 \right) \cdot \frac{\Delta h_1}{100}} \right] \cdot 1000$$

Los valores obtenidos se presentan en la tabla 5.7.1

5.7.2 Obtención de la Ecuación de Calibración del Transductor Digital de Caudales a Partir de un Ajuste Lineal Utilizando Mínimos Cuadrados.

$$N = \text{length}(\text{LC})$$

Donde:

length es un comando del software mathcad el cual sirve para leer en número de datos obtenidos en las pruebas de laboratorio de lectura en consola del transductor digital y caída de presión registrada en las tomas piezométricas del diafragma utilizado en la calibración del transductor digital.

$$M = \begin{bmatrix} N & \sum_I LC_1 \\ \sum_I LC_1 & \sum_I (LC_1)^2 \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} \sum_I Q_1 \\ \sum_I (LC_1) \cdot (Q_1) \end{bmatrix}$$

SOLUCION := Isolve(M, V)

SOLUCION = $\begin{pmatrix} 0.055 \\ 0.035 \end{pmatrix}$

A0 = SOLUCION_{0,0}

A0 = 0.055

A1 = SOLUCION_{1,0}

A1 = 0.035

Qc₁ := A0 + A1·LC₁

Qc = 0.055 + 0.035 * LC

(ecuación del transductor digital de caudales)

Donde:

Isolve es un comando de mathcad a través del cual se le da solución al sistema lineal de ecuaciones generado para determinar la ecuación de calibración del transductor digital.

M es la matriz de coeficientes del sistema lineal de ecuaciones generado para poder determinar los coeficientes de la ecuación de calibración del transductor digital.

V es el vector de los términos independientes del sistema lineal de ecuaciones generado para poder determinar los coeficientes de la ecuación de calibración del transductor digital.

5.7.3 Cuantificación del Error en el Ajuste de la Ecuación de Calibración.

Cálculo de la media de los datos de gasto obtenidos en el laboratorio.

$$Y_{MED} = \frac{\sum Q_i}{N} \qquad Y_{MED} = 5.526$$

Cálculo de la sumatoria de los cuadrados de los residuos entre los datos de laboratorio y su media.

$$ST = \sum_I (Q_i - Y_{MED})^2 \qquad ST = 126.076$$

Cálculo de la desviación estándar. (medida más común de la dispersión de una muestra de datos con respecto a su media).

$$SY = \sqrt{\frac{ST}{N-1}} \qquad SY = 1.733$$

Cálculo de la sumatoria de los cuadrados de los residuos entre los datos de gasto obtenidos en el laboratorio y los obtenidos con la ecuación de calibración.

$$SR = \sum_I (Q_i - Q_{c_i})^2 \qquad SR = 0.127$$

Cálculo del error estándar de aproximación. (medida más común de la dispersión de una muestra alrededor de la línea de regresión).

$$EEA = \sqrt{\frac{SR}{N-2}} \qquad EEA = 0.056$$

Sí el error estándar de aproximación es menor que la desviación estándar entonces se puede aceptar que los datos originales se pueden representar por una recta y como el error estándar de aproximación es 0.056 y la desviación estándar es 1.733, entonces el ajuste es válido.

Cálculo del coeficiente de determinación, el cual representa que tan confiable es el ajuste.

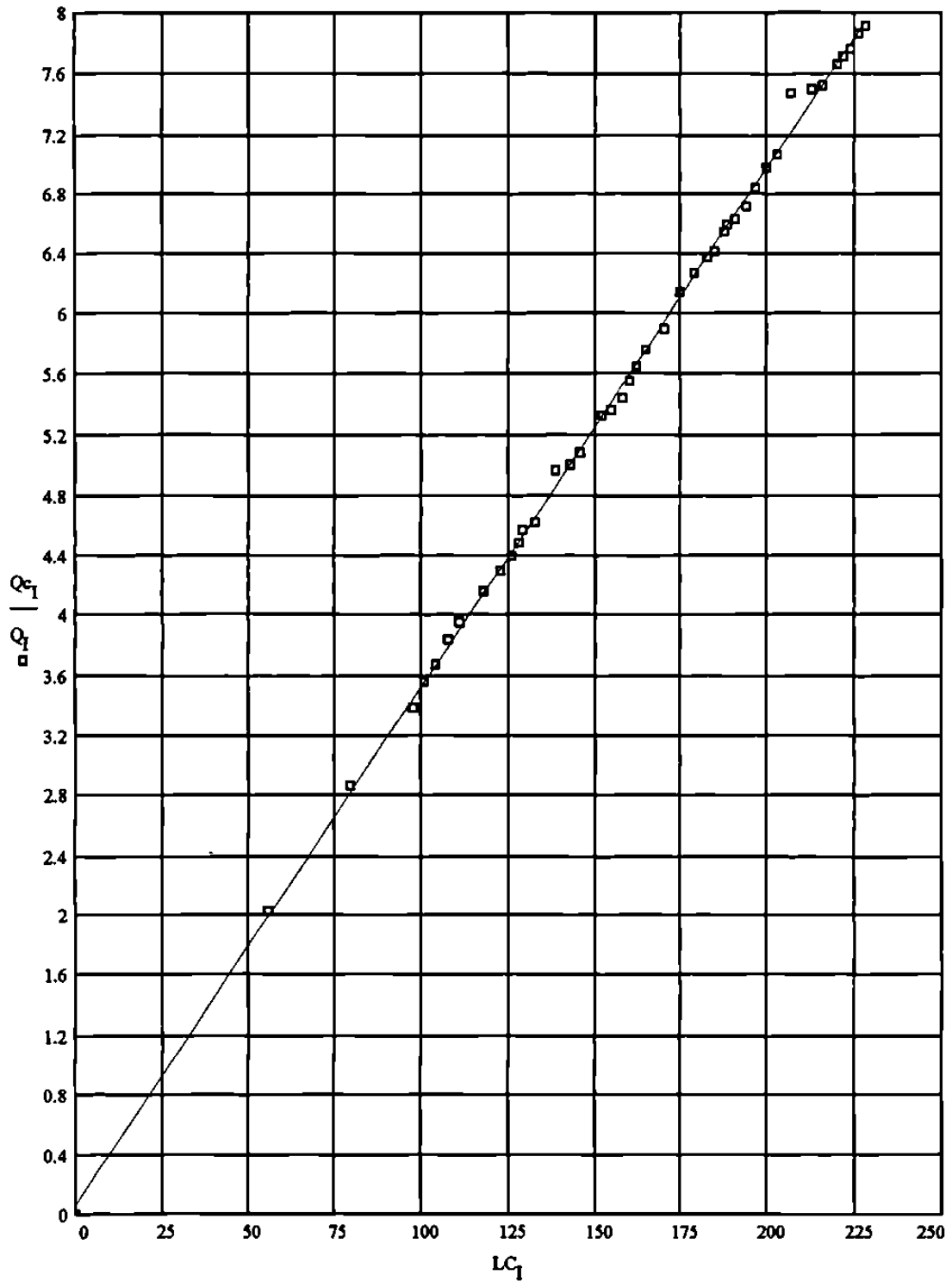
$$R^2 = \frac{ST - SR}{ST} \cdot 100 \qquad R^2 = 99.9$$

Por lo tanto se tiene una confiabilidad del 99.9 % en los valores que se obtengan a través de la ecuación de calibración del transductor digital.

Cálculo del coeficiente de correlación, el cual representa que tan parecidos son los valores de gasto obtenidos con los datos del laboratorio y los obtenidos con la ecuación de calibración.

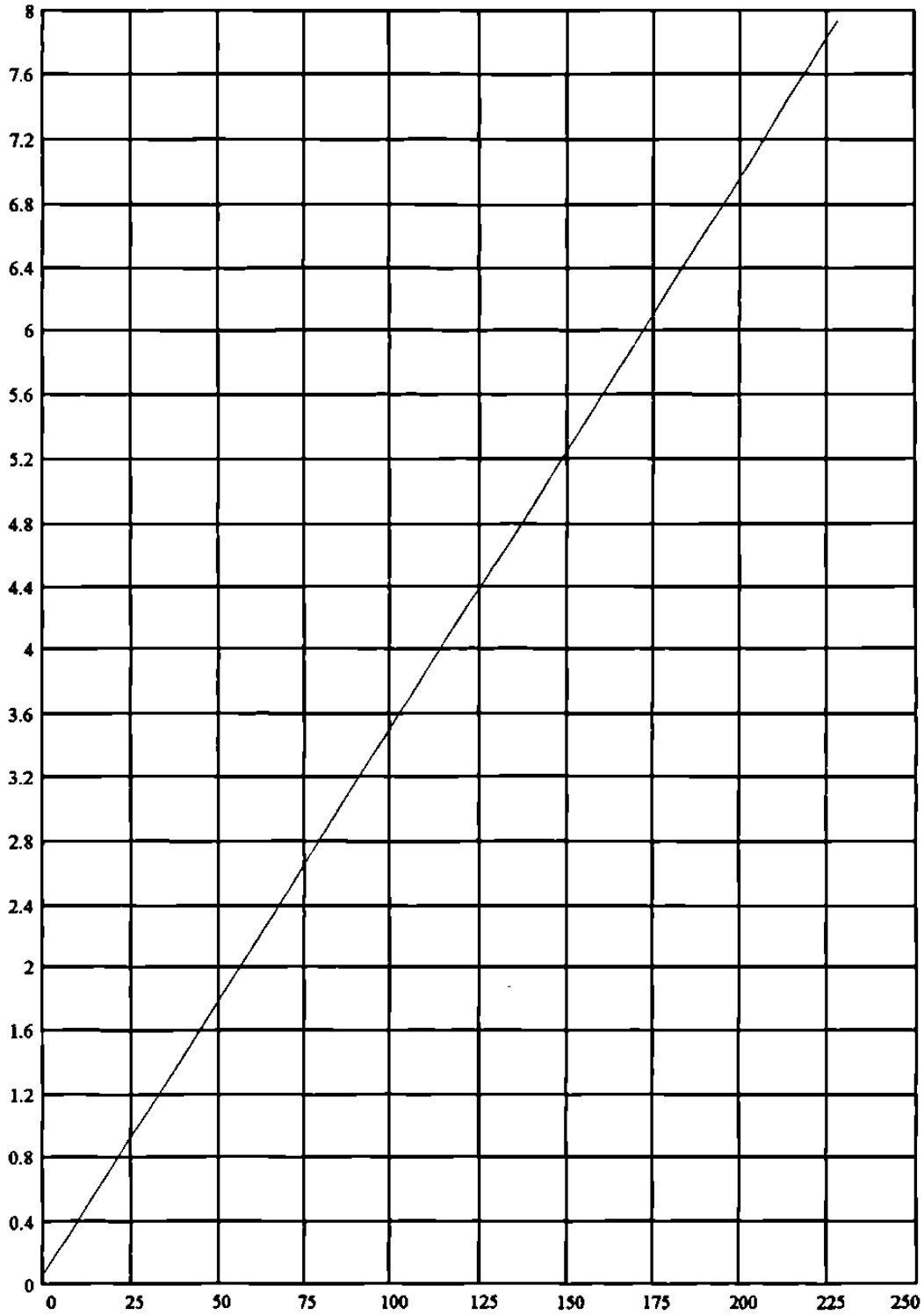
$$R = \sqrt{\frac{R^2}{100}} \cdot 100 \qquad R = 99.95$$

5.7.4 Obtención de la Gráfica de Comparación con los Valores Obtenidos en el Laboratorio y los Obtenidos con la Ecuación de Calibración.



Gráfica 5.1 Comparación de los valores obtenidos en el laboratorio y los obtenidos con la ecuación de calibración.

5.7.5 Obtención de la Gráfica de Calibración del Transductor Digital de Caudales.



Gráfica 5.2 Gráfica de calibración del transductor digital de caudales.

TABLA 5.7.1

TABLA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS
EN LAS PRUEBAS DE CALIBRACION

LECTURA DE CONSOLA LC_1 adimensional	CAÍDA DE PRESIÓN EN EL DIAFRAGMA Δh cmHg	CAUDAL EN EL DIAFRAGMA Q_1 lps	CAUDAL EN EL TRANSDUCTOR Q_{c_1} lps
0.00	0.00	0.00	0.05
56.00	1.00	2.02	1.99
80.00	2.00	2.86	2.82
98.00	2.80	3.39	3.44
101.00	3.10	3.56	3.55
104.00	3.30	3.68	3.65
108.00	3.60	3.84	3.79
111.00	3.80	3.94	3.89
118.00	4.20	4.15	4.13
123.00	4.50	4.29	4.31
126.00	4.70	4.39	4.41
128.00	4.90	4.48	4.48
129.00	5.10	4.57	4.51
133.00	5.20	4.61	4.65
139.00	6.00	4.96	4.86
143.00	6.10	5.00	5.00
146.00	6.30	5.08	5.10
152.00	6.90	5.32	5.31
155.00	7.00	5.35	5.41
158.00	7.20	5.43	5.52
160.00	7.50	5.54	5.59
162.00	7.80	5.65	5.66
165.00	8.10	5.76	5.76
170.00	8.50	5.90	5.93
175.00	9.20	6.14	6.11
179.00	9.60	6.27	6.24
183.00	9.90	6.37	6.38
185.00	10.00	6.40	6.45
188.00	10.40	6.53	6.55
189.00	10.60	6.59	6.59
191.00	10.70	6.62	6.66
194.00	11.00	6.71	6.76
197.00	11.40	6.83	6.87
200.00	11.90	6.98	6.97
203.00	12.20	7.07	7.07
207.00	13.60	7.46	7.21
213.00	13.70	7.49	7.42
216.00	13.80	7.52	7.52
220.00	14.30	7.65	7.66
222.00	14.50	7.71	7.73
224.00	14.70	7.76	7.80
226.00	15.10	7.86	7.87
228.00	15.30	7.92	7.94

5.8 Verificación de la Ecuación de Calibración del Transductor Digital de Caudales.

Esta parte de la investigación se desarrolló con el objeto de verificar la ecuación obtenida del transductor digital de caudales, para lo cual se realizó una prueba de comparación de los gastos o caudales obtenidos a través de la ecuación a verificar y los gastos registrados a través de un vertedor triangular a noventa grados (debido a que este tipo de vertedores son de alta precisión comparados con otros tipos de vertedores).

El vertedor se colocó aguas abajo de la descarga del aparato de flujo, en tuberías en el canal de retorno de flujo hacia la cisterna (ver figura 5.3), con el fin de que todo el caudal que descargue el aparato de flujo en las tuberías pase a través del vertedor y así, por continuidad, todo el flujo de agua que sale del aparato de tuberías entre al vertedor y se pueda asegurar que el gasto o caudal registrado con el transductor digital de caudales es igual al gasto medido en el vertedor.

Esta prueba también se realizó en el Laboratorio de Hidráulica de la U.A.N.L. siguiendo el procedimiento de laboratorio que a continuación se presenta.

- a).- Se colocó el transductor digital de caudales en la tubería de descarga del aparato de flujo en tuberías y se conectó a la consola registradora, posteriormente se colocó un vertedor triangular a noventa grados, aguas abajo de la descarga del aparato de flujo, en tuberías en el canal de retorno.

- b).- Una vez colocados los dos equipos de medición antes mencionados, se procedió a encender las bombas para que éstas mandaran el flujo de agua hacia el tanque de carga constante.
- c).- Una vez que se estabilizó el nivel en el tanque, se procedió a abrir parcialmente la válvula de alimentación al aparato de flujo en tuberías y a la vez se abrieron al máximo todas sus válvulas de descarga.
- d).- Se esperó el tiempo necesario para que se purgara el aire atrapado en las tuberías y se estabilizara la carga hidráulica sobre el vertedor.
- e).- Se registró la lectura del transductor digital de caudales, que se observó en la consola y utilizando un limnómetro con precisión de 0.001 pie (0.0003048 m), se midió la carga hidráulica sobre el vertedor.
- f).- Una vez registrados los datos anteriores, se abrió un poco más la válvula de alimentación al aparato de flujo en tuberías, esperando el tiempo necesario para que se estabilizara el flujo.
- g).- Una vez estabilizado el flujo, se midió la carga sobre el vertedor y se registró, la lectura en la consola, y así se fue realizando la prueba hasta que se llegó a abrir al máximo la válvula de alimentación al aparato de flujo en tuberías.
- h).- Una vez que se obtuvo el registro de laboratorio, se procedió a realizar los cálculos de los gastos, a través del transductor digital de caudales y el vertedor.

Enseguida se presentan las formulas utilizadas en el cálculo y los resultados obtenidos en esta prueba de verificación (ver tabla 5.8.1)

Ecuación del vertedor triangular a noventa grados:

$$Q_v = 1380 * H^{\frac{3}{2}}$$

$$0.06 \text{ m} \leq H \leq 0.60 \text{ m} \text{ (Rango de la Carga Hidráulica)}$$

Donde:

Q_v = Caudal registrado en el vertedor triangular, en lps

H = Carga hidráulica sobre el vertedor triangular, en m.

Ecuación de calibración del transductor digital:

$$Q_c = 0.055 + .035 * LC$$

Donde:

Q_c = Caudal registrado en el transductor, en lps.

LC = Lectura de consola registrada, adimensional.

TABLA 5.8.1

**TABLA DE COMPARACION DE GASTOS OBTENIDOS
CON EL TRANSDUCTOR DIGITAL DE CAUDALES
Y UN VERTEDOR TRIANGULAR A NOVENTA GRADOS**

LECTURA DE CONSOLA LC adimensional	CAUDAL EN EL TRANSDUCTOR Qc lps	CARGA HIDRAULICA EN VERTEDOR H m	CAUDAL EN EL VERTEDOR QV lps
0	0.055	0.0000	0.000
34	1.245	0.0606	1.248
50	1.805	0.0703	1.808
73	2.610	0.0814	2.609
99	3.520	0.0918	3.524
130	4.605	0.1022	4.608
159	5.620	0.1106	5.614
203	7.160	0.1219	7.160
252	8.875	0.1328	8.869
295	10.380	0.1414	10.375
350	12.305	0.1514	12.308
402	14.125	0.1600	14.131
477	16.750	0.1713	16.760
548	19.235	0.1810	19.234
623	21.860	0.1905	21.858
704	24.695	0.2000	24.686
821	28.790	0.2127	28.794
849	29.770	0.2200	31.328
1016	35.615	0.2316	35.623
1121	39.290	0.2409	39.307
1244	43.595	0.2511	43.601
1358	47.585	0.2600	47.568
1506	52.765	0.2710	52.760
1641	57.490	0.2800	57.250
1788	62.635	0.2903	62.661
1942	68.025	0.3000	68.027
2165	75.830	0.3133	75.819

CAPITULO 6

DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

CAPITULO 6

DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

6.1 Discusiones.

A lo largo de la investigación se fueron presentando interrogantes y a la vez generándose varias posibles soluciones a ellas, por lo cual fue necesario tomar decisiones de cuál solución era la más viable, para poder desarrollar la investigación, aquí intentará explicar cómo se generaron esas interrogantes y cómo se solucionaron.

La primer interrogante fue propiamente el diseño del transductor digital de caudales, así como en qué se utilizaría el prototipo y los materiales a utilizar en su construcción, para lo cual se optó por diseñarlo con varias piezas ensamblables, basándose en el comportamiento de una viga en cantilever, la cual se instrumentó con “strain gages” para así poder relacionar la deformación de la viga con el gasto que pasara por una tubería a presión que conduciría agua en la cual se colocaría el prototipo.

Dentro del diseño se pretendía que se pudiera utilizar el transductor en tuberías a presión, expuestas a la intemperie, que condujeran agua, tanto potable como residual, del tipo industrial-doméstica, y

considerando los tipos de contaminantes de esas aguas, que generalmente son grasas y aceites, materia orgánica e inorgánica en suspensión y los propios contaminantes del medio ambiente; principalmente los compuestos generan la oxidación y corrosión de los metales, se decidió construirlo de acero inoxidable y de duraluminio. También se tomó la decisión de construirlo para utilizarse en tuberías de diámetro nominal de cuatro pulgadas (0.1016m), dejándose preparado para posteriormente adecuarlo para poder utilizarse en tuberías hasta de doce pulgadas de diámetro (0.3048 m).

Una vez que se definió el diseño, se mandó construir el prototipo torneando cada una de las piezas y posteriormente ensamblándolas. También se vio la necesidad de construir una consola digital capaz de registrar las deformaciones del transductor y para poder medir estas deformaciones, se seleccionaron de entre un gran número de "strain gages", uno que tuviera la capacidad de estar expuesto a deformaciones prolongadas y no sufriera daños.

Ya contruidos el transductor y su consola registradora, se empezó a tratar de ver dónde se podrían realizar las pruebas de calibración, por lo cual se optó por utilizar el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil, ya que éste está diseñado principalmente para poder llevar a cabo investigaciones de este tipo y, además, cuenta con un aparato de flujo en tuberías que, con un mínimo de adecuaciones, serviría para realizar la calibración.

Ya que se tuvo acceso a utilizar el Laboratorio de Hidráulica, se procedió a adecuar el aparato antes mencionado, que se utilizaría para la calibración del prototipo. Lo único que se hizo fue anexar en la descarga

del modelo un tramo de 3 metros de tubería de cuatro pulgadas en el cual se colocaría el transductor.

Una vez que se realizaron las adecuaciones se planteó el método a seguir en las pruebas de calibración del prototipo y el equipo de medición de caudal a utilizar como calibrador, para lo cual se optó por utilizar un diafragma conectado a un manómetro diferencial de mercurio, para así poder relacionar la deformación registrada en el transductor y el gasto que pasara en este momento, registrado con el diafragma.

Al realizar las pruebas en el laboratorio, se obtuvieron datos de caudal a través del diafragma y la deformación registrada, como una lectura en la consola del transductor, con los cuales se pretendía obtener la ecuación y gráfica, para lo cual se realizaron líneas de tendencia de los datos de laboratorio del tipo lineal, logarítmico, polinomiales de diferente orden, potenciales y exponenciales, llegando a la conclusión que los datos obtenidos en de laboratorio tendían a graficarse como una línea recta.

En base a la deducción anterior, se realizó una regresión lineal, utilizando el método de mínimos cuadrados, para así obtener la ecuación y curva o gráfica de calibración

Prácticamente, al obtener esa ecuación y gráfica de calibración, se daba fin a la investigación; sin embargo se procedió a realizar una prueba de comparación en el laboratorio, consistente en medir diferentes caudales que pasaban por el aparato de tuberías, registrados con el transductor digital de caudales y un vertedor triangular a noventa grados que se colocó en el canal de descarga del propio aparato de tuberías, para así asegurar que el caudal de descarga del aparato de tuberías era el caudal

de llegada al vertedor por lo cual los dos equipos de aforación deberían registrar el mismo valor.

6.2 Conclusiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación se tiene un prototipo de transductor digital de caudales en conductos a presión cuya ecuación de calibración es:

$$QC = 0.055 + 0.035 * LC$$

La ecuación anterior se obtuvo de los datos obtenidos en el laboratorio, al realizar las pruebas de calibración, con la cual, al obtener un gasto se tuvo una confiabilidad del 99.9 % según el coeficiente de determinación que se obtuvo al realizar el ajuste de los datos de laboratorio a una línea recta a través de mínimos cuadrados. A través del coeficiente de correlación obtenemos en forma general que los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio y con la ecuación del transductor, podrían variar en un valor no mayor al 0.05 %.

Al realizar la prueba de comparación, con el fin de verificar la ecuación obtenida, se observó que los valores de gastos obtenidos con el prototipo y los obtenidos con el vertedor variaban en un rango 0.00 a 1.00 %, es decir, la variación fue prácticamente nula.

Con base en la prueba de comparación realizada, se puede concluir que el prototipo fue calibrado correctamente y, por lo tanto, se puede utilizar como un aforador de tuberías a presión de diámetro

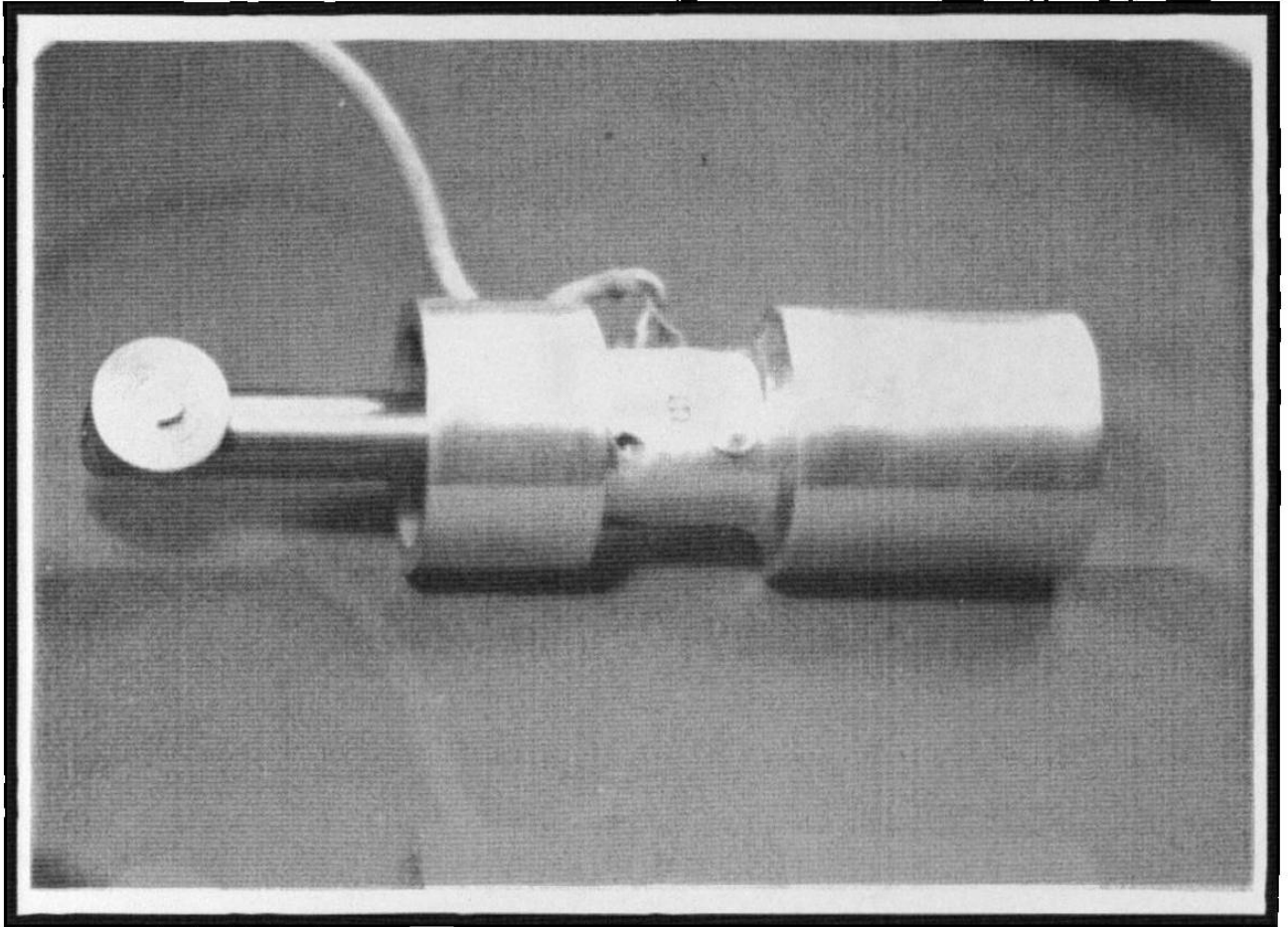
nominal de cuatro pulgadas, las cuales pueden conducir tanto agua potable como residual del tipo industrial - doméstica, ya que en la selección de los materiales que se utilizaron al construirlo (acero inoxidable y duraluminio) se tomaron en cuenta los posibles contaminantes de dichas aguas. Así como la posibilidad de estar a la intemperie en el medio ambiente y sus contaminantes u otros factores adversos.

BIBLIOGRAFIA

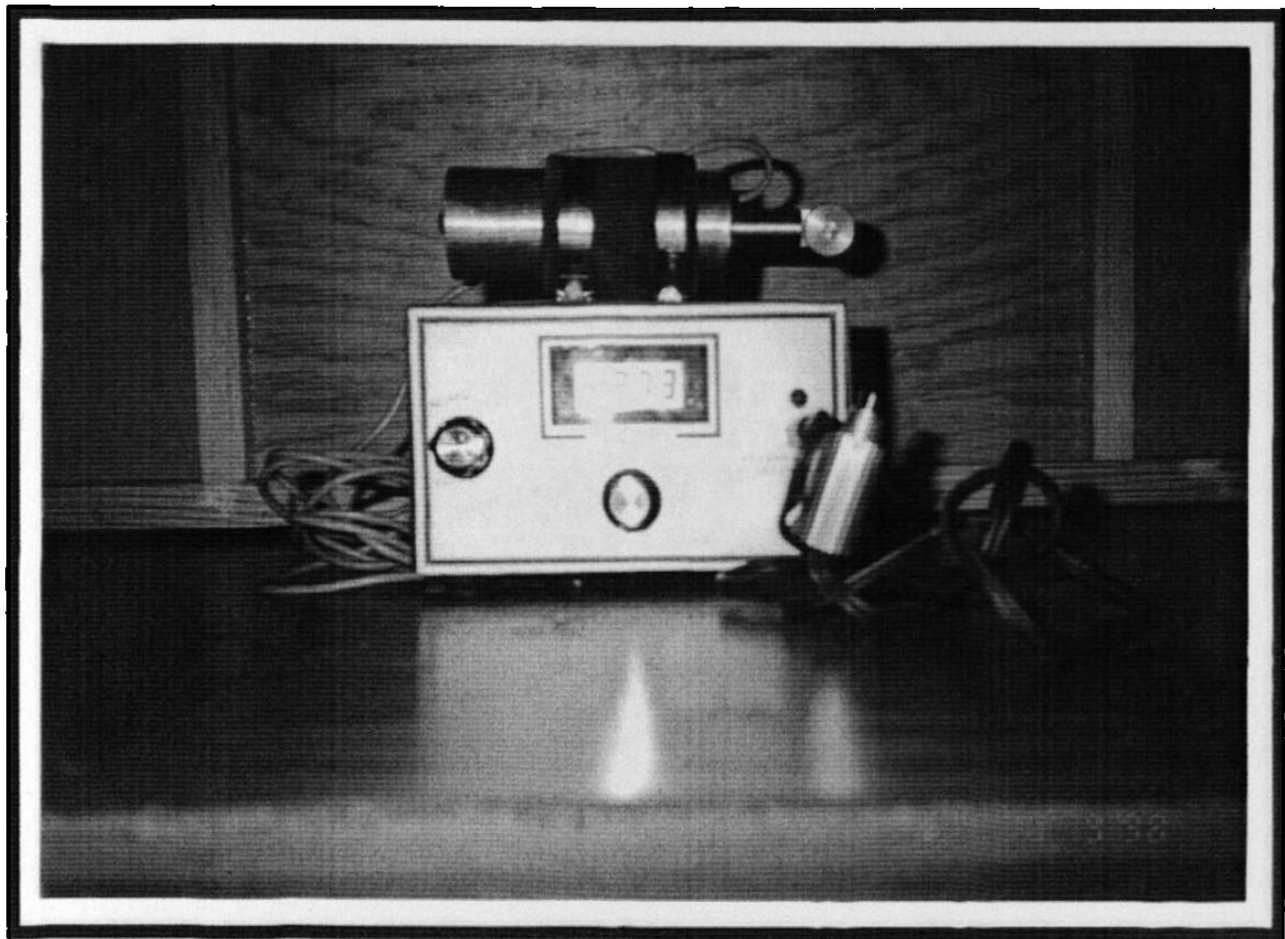
- Azevedo J.M. de y Acosta Guillermo A. 1992 Manual de Hidráulica México, HARLA.
- Sotelo Avila Gilberto, 1997, Hidráulica General, México, LIMUSA
- Briones Sánchez Gregorio y García Casillas Ignacio , 1988, Aforo de Aguas en Tuberías y Canales, México, TRILLAS.
- Williams King Horance, 1995, Manual de Hidráulica, México, LIMUSA.
- L. Mott Robert , 1996 , Mecánica de Fluidos Aplicada, México, (Prentice Hall.
- México. Comisión Nacional del Agua, 1994, Selección de Instalación de Equipos de Macromedición, Libro III (3.3.1).
- Ing. Olivares Ponce Alfredo , 1991 , Curso Instrumentación, México, Parte 1.
- C. Chapra Steven y P. Canale Raymond , 1988 Métodos Numéricos para Ingenieros con Aplicación en Computadoras Personales, México, McGraw-Hill.
- V. Giles Ronald y Evett Cheng Liu Jack B. , 1988 Mecánica de los Fluidos e Hidráulica, México, McGraw-Hill.
- Russel George E., 1988 Hidráulica, México, LIMUSA.
- Hughes William F., 1986 Dinámica de Fluidos, México, McGraw-Hill.
- Levine Guillermo, 1996, Estructuras Fundamentales de la Computación, México, McGraw-Hill,.
- Sánchez B. J. L., 1972, Mecánica del Medio Continuo, México, Textos Universitarios, U.N.A.M.
- Webber N. B., 1967, Fluid Mechanics for Civil Engineers, Londres, Chapman and Hall.

ANEXO I

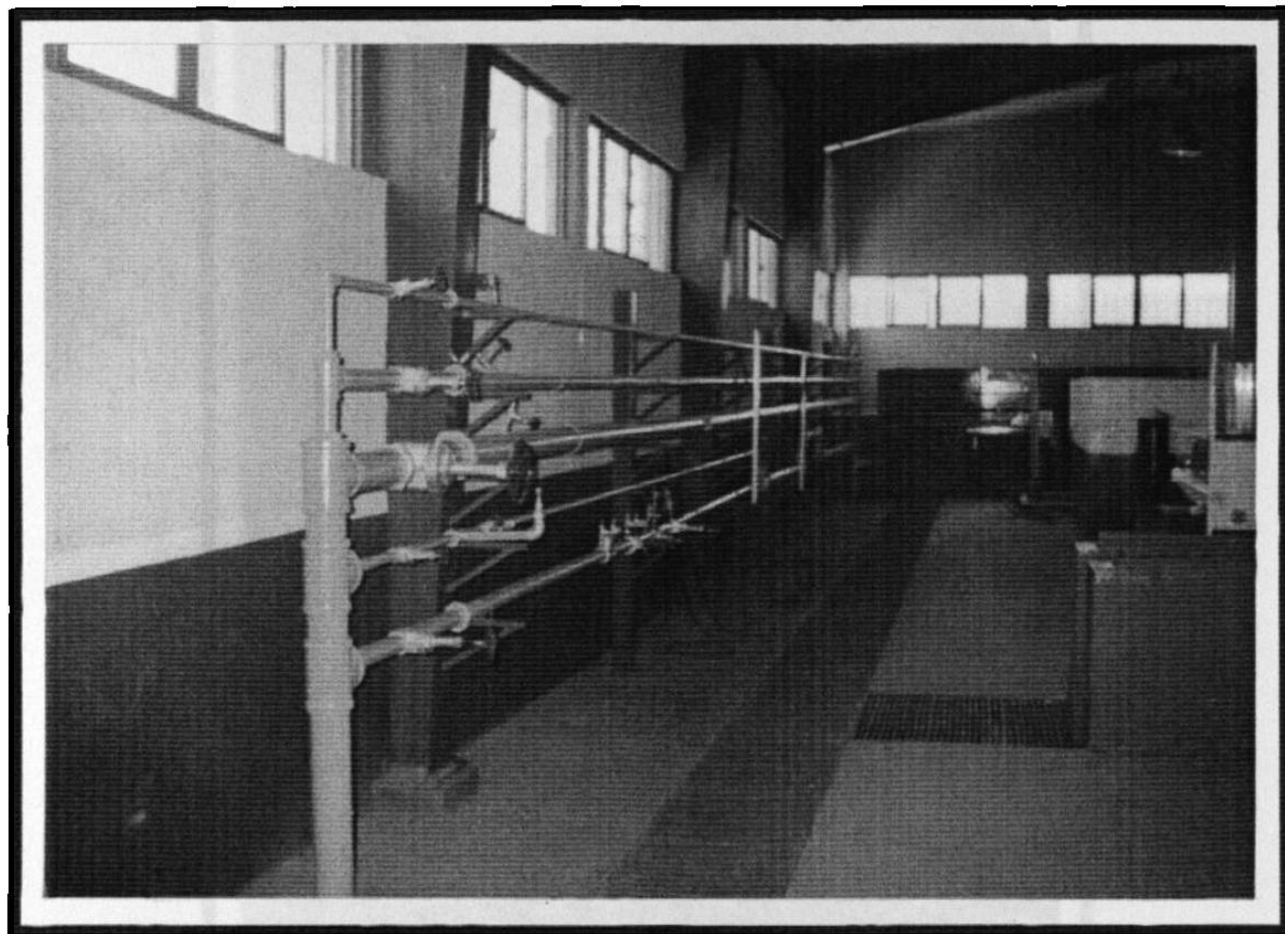
RESEÑA FOTOGRAFICA



FOTOGRAFIA No. 1 Instrumentación del Transductor Digital de Caudales con Strain Gages.

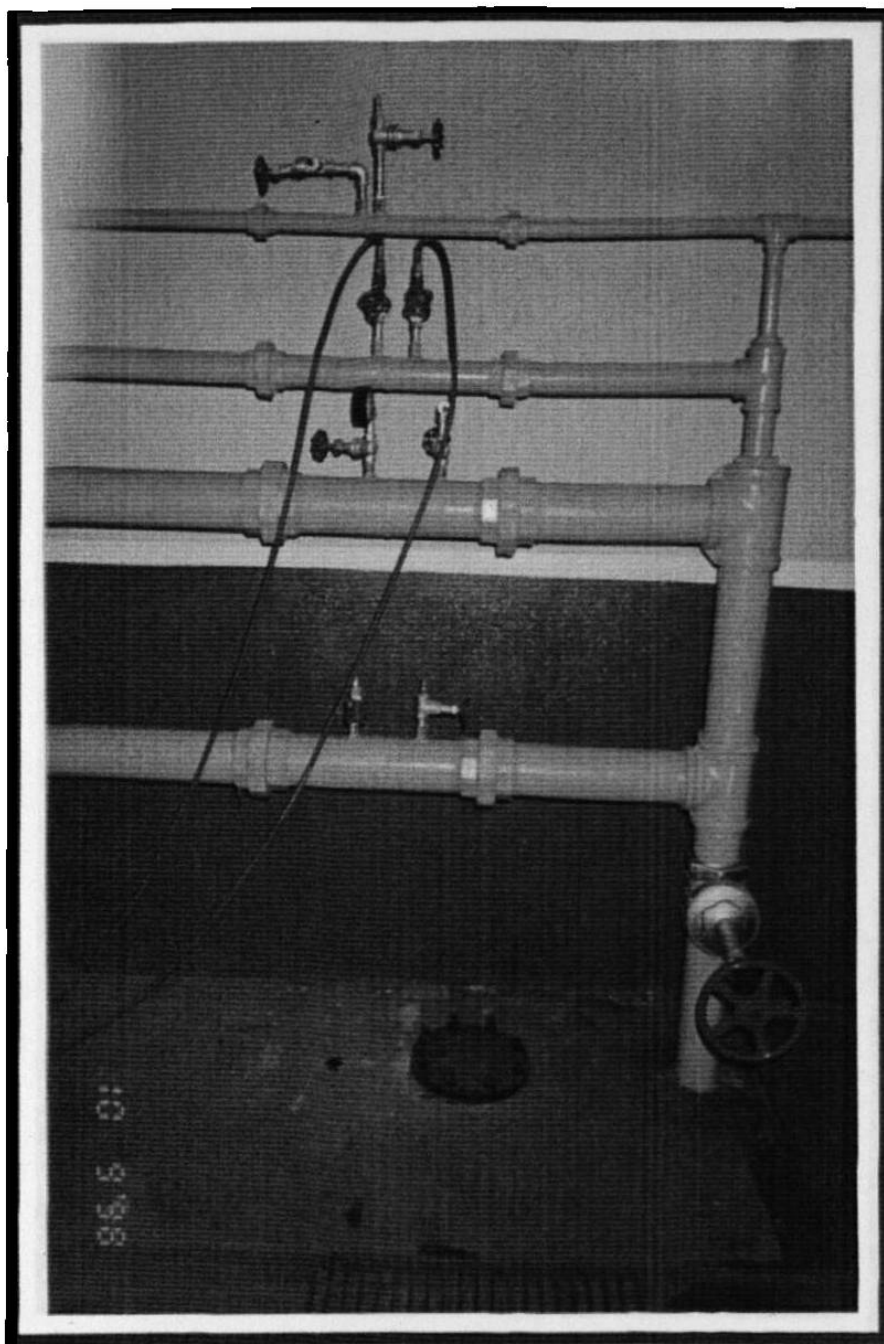


FOTOGRAFIA No. 2 Transductor Digital de Caudales y Consola Registradora.



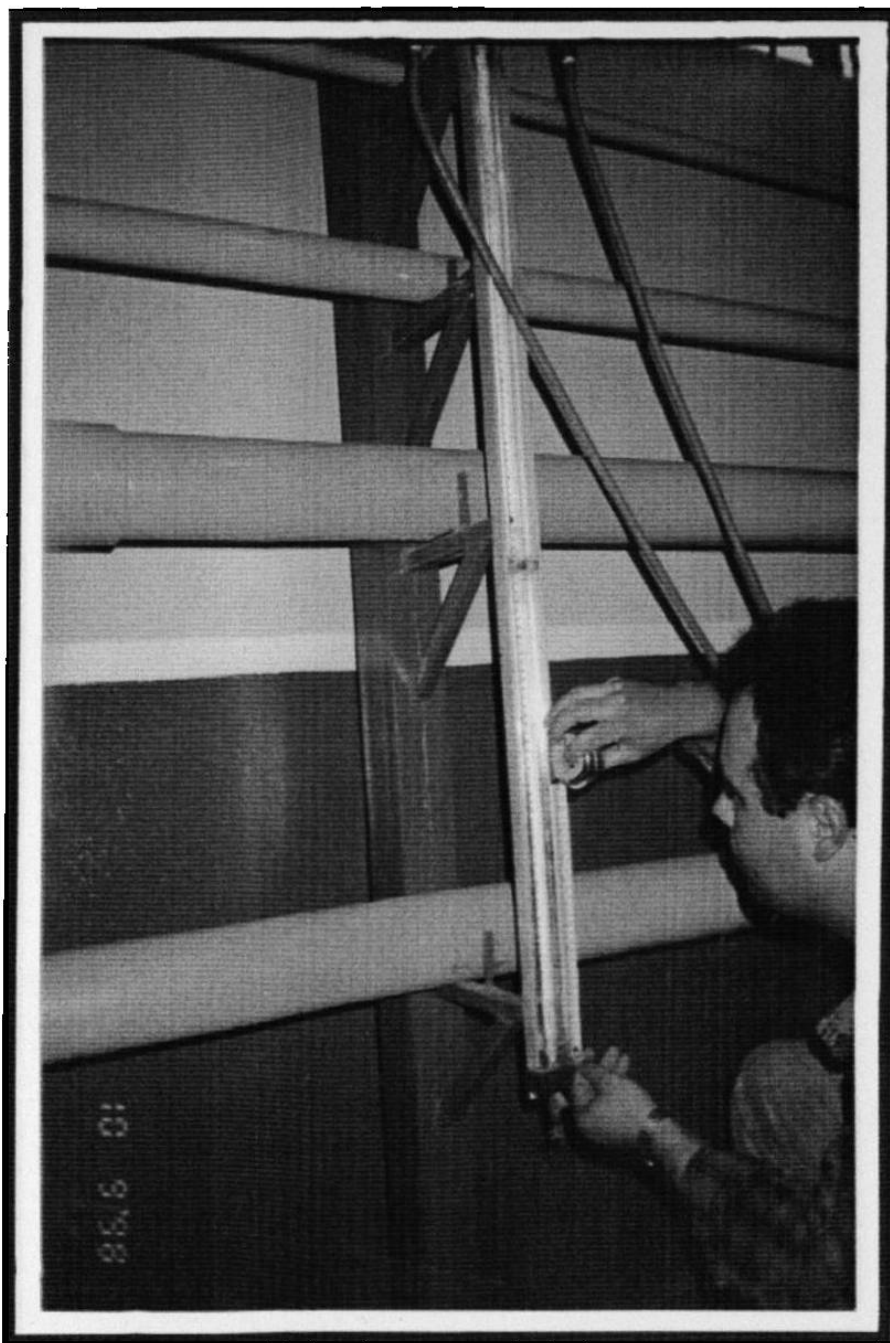
FOTOGRAFIA No. 3

Aparato de Flujo en Tuberías Utilizado en la Calibración del Transductor Digital de Caudales.



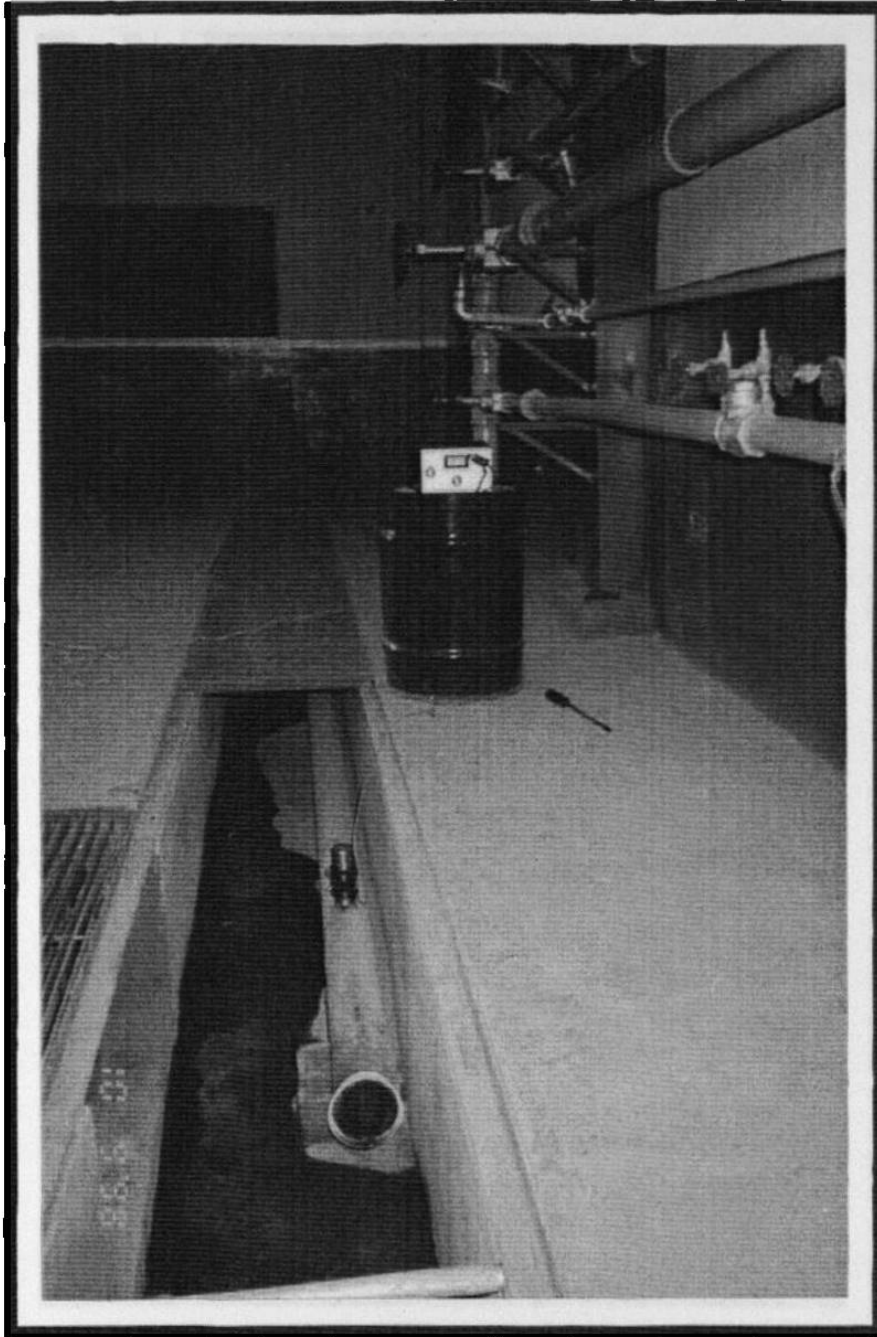
FOTOGRAFIA No. 4

Diafragmas del Aparato de Flujo en Tuberías Utilizados Para la Obtención del Gasto Real en las Pruebas de Calibración.

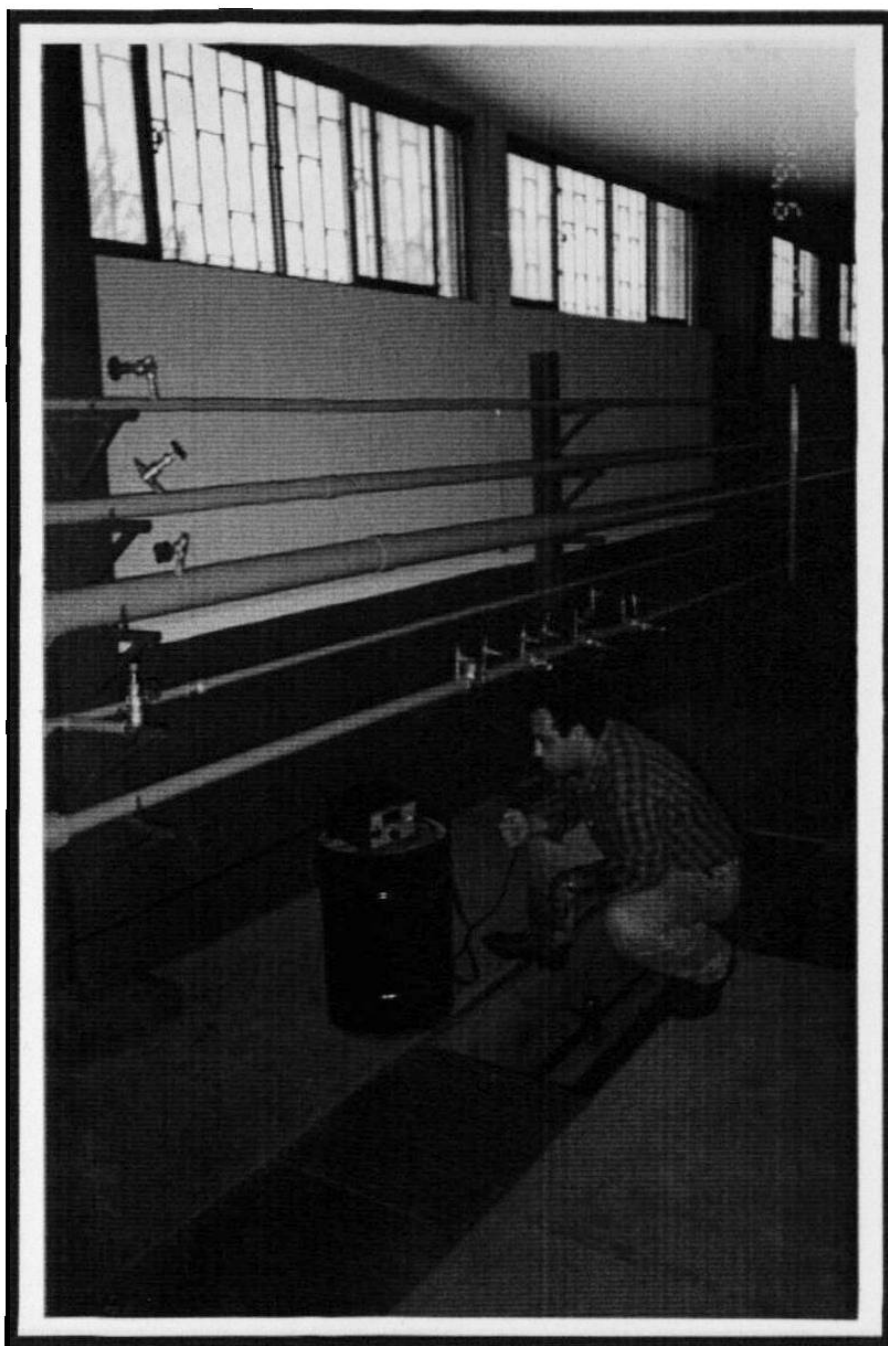


FOTOGRAFIA No. 5

Registro de la Caída de Presión en los Diafragmas Utilizando un Manómetro Diferencial de Mercurio, al Realizar las Pruebas de Calibración del Transductor Digital de Caudales.

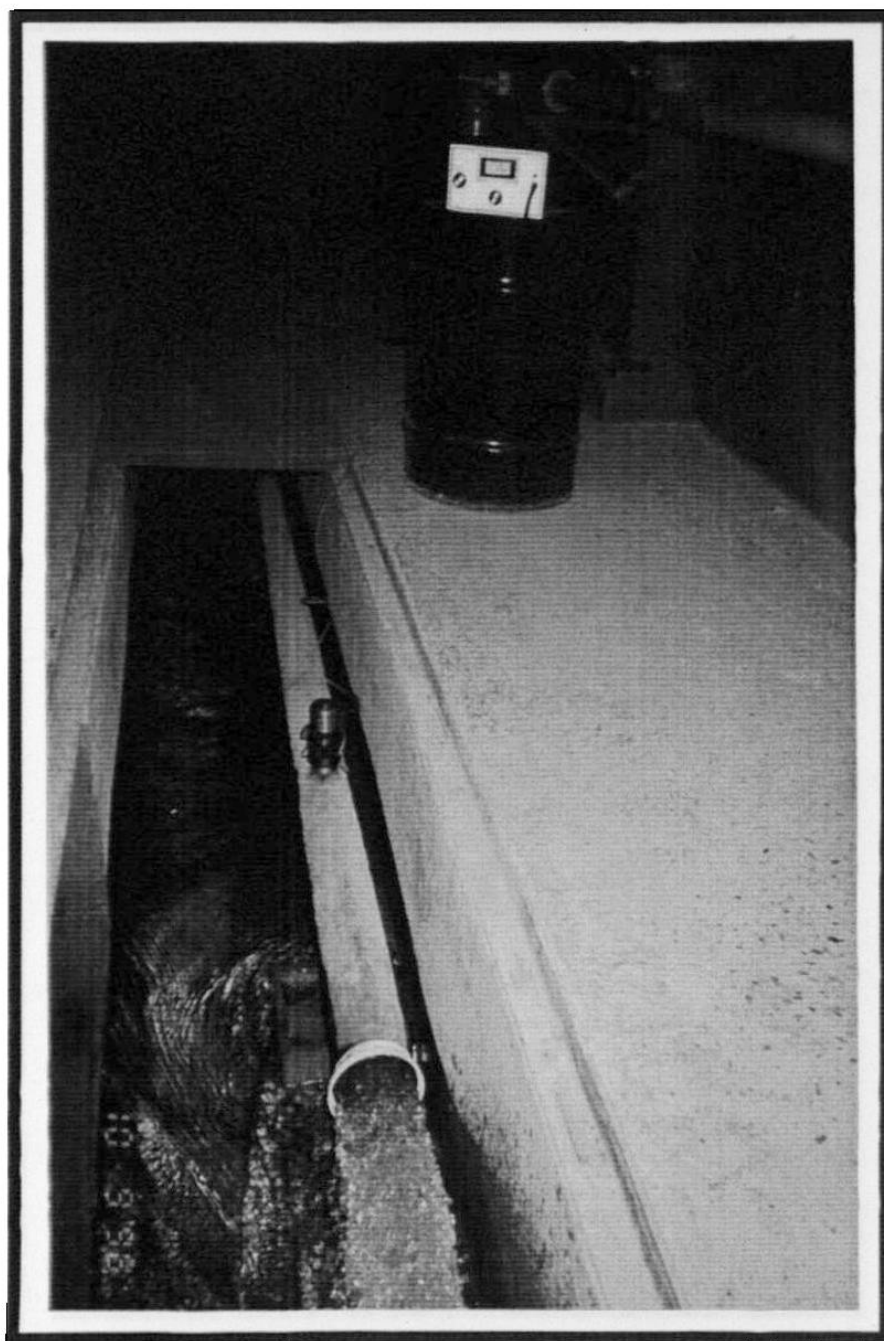


FOTOGRAFIA No. 6 Colocación del Transductor Digital de Caudales Para dar Inicio a las Pruebas de su Calibración.



FOTOGRAFIA No. 7

Lectura del Valor Registrado en la Consola al Realizar las Pruebas de Calibración del Transductor Digital de Caudales.



FOTOGRAFIA No. 8

Descarga de Agua del Aparato de flujo en Tuberías al Realizar las Pruebas de Calibración del Transductor Digital de Caudales.



FOTOGRAFIA No. 9

Prueba de Verificación de la Calibración del Transductor Digital de Caudales, Utilizando un Vertedor Triangular, Colocado Aguas Abajo de la Descarga del Aparato de Flujo en Tuberías (Fotografía Tomada de Aguas Arriba Hacia Aguas Abajo del Vertedor).



FOTOGRAFIA No. 10 Prueba de Verificación de la Calibración del Transductor Digital de Caudales, Utilizando un Vertedor Triangular, Colocado Aguas Abajo de la Descarga del Aparato de Flujo en Tuberías (Fotografía Tomada de Aguas Abajo Hacia Aguas Arriba del Vertedor).

