

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS



MEDIDORES DE FLUJO DE LIQUIDOS
PARA SISTEMAS DE CONTROL
ELECTRONICOS

T E S I S

QUE EN OPCION AL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO

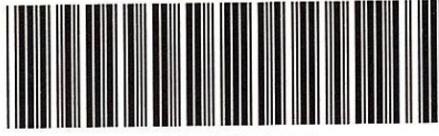
PRESENTA

WILLY RODRIGUEZ BACARREZA

MONTERREY, N. L.

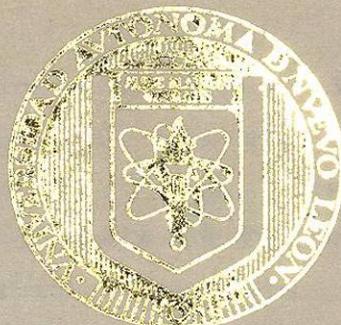
SEPTIEMBRE DE 1988

T
TJ935
R6
c.1



1080075114

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS



MEDIDORES DE FLUJO DE LIQUIDOS
PARA SISTEMAS DE CONTROL
ELECTRONICOS

T E S I S

QUE EN OPCION AL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO

PRESENTA

WILLY RODRIGUEZ BACARREZA



(78114)

MONTERREY, N. L.

SEPTIEMBRE DE 1968



T

TS935

R6



FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

Los abajo firmantes maestros de la carrera de Ingeniería Química Ing. Severo G. Flores Lira, Ing. Carlos Candelario Treviño Rodríguez, Ing. Esthela E. Blanco Alvarez, conociendo la propuesta de Tesis que en Opción a Título de Ingeniero Químico presenta el Sr. Willy Rodríguez Bacarreza, después de revisar el contenido, forma y presentación, aprobamos el desarrollo de la siguiente fase, consistente en la defensa de la misma, previos trámites correspondientes, y en la fecha que el Jurado Calificador estime convenientes.



ING. SEVERO G. FLORES L.



ING. CARLOS C. TREVIÑO R.

EEA

ING. ESTHELA E. BLANCO A.

San Nicolás de los Garza, N.L., 23 de Noviembre de 1988.

A mis padres, Lic. Lelio Rodríguez
C. y Lila B. de Rodríguez y mi
hermano Ing. Carlos Rodríguez B.
quienes me apoyaron en todo
momento.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que directa o indirectamente colaboraron en la elaboración de la presente tesis, así como a las que me ayudaron y alentaron en mis años de estudiante.

Quiero mencionar de manera especial a:

Mi asesor, el Ing. José Alberto Rodríguez R. y la Ing. Esthela Blanco A. por su tiempo y sus consejos.

José María Inclán M., Enrique Pech H. y Victor López V. por su valiosa ayuda en la elaboración de las figuras del presente reporte y en la obtención de literatura, información técnica y piezas de precisión.

INDICE

1. INTRODUCCION	5
1.1. RESUMEN HISTORICO	7
2. LOS MEDIDORES DE FLUJO	10
2.1. MEDIDORES DE CABEZA	
DE PRESION VARIABLE	11
2.1.1. Medidor de Orificio	11
2.1.1.1. Orificio en Borde de Escuadra	12
2.1.1.2. Orificios Cónico y de Borde en Cuadrante	13
2.1.1.3. Orificios Segmentales y Excéntricos	13
2.1.1.4. Cuña Segmentada	14
2.1.1.5. Orificio Anular	14
2.1.2. Tomas de Presion en Medidores de Orificio	15
2.1.2.1. Toma de Vena Contracta	15
2.1.2.2. Tomas de Brida	15
2.1.2.3. Tomas de Esquina	16
2.1.2.4. Tomas de Tubería	16
2.1.2.5. Tomas de Radio	17
2.1.3. Medidor Tipo Venturi	18
2.1.4. Medidor de Boquilla	19
2.1.5. Medidor de Codo	20
2.1.6. El Tubo de Pitot	21
2.1.7. Medidor de Escudo	22
2.1.8. Medidores Annubar	23
2.2. MEDIDORES DE CABEZA	
DE AREA VARIABLE	26
2.2.1. El Rotámetro	26

2.2.2. Medidores de Orificio y Tapón Cónico	29
2.2.3. Medidores de Pistón	30
2.3. MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO	32
2.3.1. Medidor de Disco Nutante	32
2.3.2. Medidor de Pistón Reciprocante	34
2.3.3. Medidores Rotativos	35
2.3.3.1. Medidor de Impulsor Lobulado	36
2.3.3.2. Medidores Rotativos de Aspas Deslizantes	37
2.3.3.3. Medidores Rotativos de Aspas Retráciles	38
2.3.3.4. Flujómetros Helicoidales	39
2.4. MEDIDORES DE VELOCIDAD	40
2.4.1. Turbinas	40
2.4.2. Medidores de Vórtice	42
2.4.3. Medidor Electromagnético	43
2.4.4. Medidores de Ultrasonido	45
2.4.4.1. Medidores de Efecto Doppler	45
2.4.4.2. Medidores de Tiempo de Viaje	46
2.4.5. Anemómetros	47
2.4.5.1. Anemómetro de Aletas	47
2.4.5.2. Anemómetro Térmico	47
2.4.5.3. Anemómetro de Película Caliente	48
2.4.5.4. Anemómetro de Termopar Calentado	49
2.4.5.5. Anemómetro Termistor	49
2.5. MEDIDORES DE MASA	51
2.5.1. Medidor de Coriolis	51
2.5.2. Medidor Térmico	52

3.ELEMENTOS SECUNDARIOS	
PARA MEDICION DE FLUJOS	54
3.1.MEDIDORES DE PRESION	55
3.1.1.Elementos	
de Columna Líquida	55
3.1.1.1.Medidor de Presión Absoluta	56
3.1.1.2.Manómetro de Tubo en U	56
3.1.1.3.Manómetro de Pozo	57
3.1.1.4.Manómetro de Tubo Inclinado	57
3.1.2.Medidores por Deformación	58
3.1.2.1.Tubos de Bourdon	58
3.1.2.2.Diafragmas Metálicos	58
3.1.2.3.Fuelles	59
3.1.3.Celda de	
Presión Diferencial (D/P Cell)	59
3.2.MEDIDORES DE CARATULA	61
3.3.ELEMENTOS SECUNDARIOS	
DE SEÑAL ELECTRONICA	62
3.3.1.Sensores Magnéticos	62
3.3.2.Sensores Piezoeléctricos	62
3.3.3.Sensores de Tensión	63
4.ANALISIS DE LAS CARACTERISTICAS	
DE LOS MEDIDORES	65
4.1.LOS MEDIDORES	
Y SUS CARACTERISTICAS	66
4.2.ANALISIS DE LAS GRAFICAS	74
5.DISEÑO ESQUEMATIZADO	
DE MEDIDORES DE FLUJO DE LIQUIDOS	77
5.1.MEDIDORES DE PRESION	79
5.2.MEDIDOR DE VORTICE	81

5.3.MEDIDOR DE TURBINA	82
5.3.0.1.Cuerpo del Medidor de Turbina	82
5.3.0.2.La Turbina	85
5.3.0.3.El Emisor de Pulsos	89
5.4.MEDIDORES ULTRASONICOS	90
5.4.0.1.Medidor de tiempo de viaje	90
6.CONCLUSIONES	93
7.COMENTARIOS	96
APENDICE A	100
A.1.SISTEMA BOQUILLA-ALETA	101
A.2.CONTROLADOR NEUMATICO	
PROPORCIONAL	102
A.3.LA CELDA DE PRESION	
DIFERENCIAL (D/P Cell)	104
APENDICE B	106
B.1.SENSORES DE TENSION	107
APENDICE C	112
C.1.LA FUERZA DE CORIOLIS	113
BIBLIOGRAFIA	116

1.INTRODUCCION

La ciencia y la tecnología avanzan a pasos agigantados. Su progreso se pone de manifiesto cada vez con mayor frecuencia. Tan sólo en el último siglo el hombre ha desarrollado los conocimientos que lo habrían de llevar desde la máquina de vapor hasta la exploración del espacio. Eso sólo fue posible en base al arduo trabajo de científicos y técnicos, que de ninguna manera debe incidir en sentimientos de conformismo. La evolución de vehículos e instrumentos de navegación impulsó el perfeccionamiento de materiales, y por ende, de los sistemas de control que permiten la elaboración de sustancias de mejor calidad. Los propios ingenios y sus respectivos accesorios, frecuentemente cuentan con sistemas que permiten el control mensurado y eficiente de su correcto funcionamiento. A las necesidades inherentes a la calidad se suman las referentes a la economía y velocidad de respuesta. Los controladores modernos tienen la capacidad de reaccionar en fracciones de segundo (cercaos al milésimo). Tal grado de efectividad debe ser consecuente con la sensibilidad de los actuadores y transductores de los que depende.

Respondiendo a la necesidad de información sobre los adelantos tecnológicos de nuestra época, el presente trabajo se encuentra enfocado a la compilación de la literatura referente a los elementos sensores de flujo de líquidos, así como a su análisis en función a características y operación. Finalmente, se plantea la posibilidad de construcción de modelos que precisen de tecnología moderna fácilmente asequible.

1.1.RESUMEN HISTORICO

La historia de los medidores de flujo se remonta al siglo XVII, aunque se tienen ejemplos del uso del principio de los medidores de cabeza en épocas pasadas. Así, encontramos como ejemplo el uso de orificios en la Roma de los Césares como forma de medición del agua empleada por los consumidores caseros.

La historia de la investigación de los principios, conceptos y teorías de los instrumentos de medición de flujos se refiere a principios del siglo XVII, cuando Benedetto Castelli y Evangelista Torricelli iniciaron la teoría del medidor de cabeza con el desarrollo de los conceptos siguientes:

- La razón de velocidad de flujo es igual a la velocidad multiplicada por el área.
- La descarga por un orificio varía con la raíz cuadrada de la cabeza.

A inicios del siglo XVIII Giovanni Poleni, un catedrático de matemáticas en Italia, trabajó fructíferamente con el medidor de orificio. En 1738, John Bernoulli desarrolló el teorema en el que se basan las ecuaciones hidráulicas de los medidores de carga.

El 12 de noviembre de 1732, Henri Pitot presentó un trabajo titulado: "Descripción de una Máquina para Medir la Velocidad de Agua Corriente y la Velocidad de las

Embarcaciones". Muchas aplicaciones fueron desarrolladas para el tubo Pitot mientras su autor vivió.

En 1797, Giovanni Battista Venturi publicó los resultados de su trabajo base sobre los principios del tubo Venturi y dió origen a gran parte del fundamento del instrumento actualmente utilizado.

En 1887, Clemens Herschel introdujo modificaciones al tubo Venturi, dando lugar al medidor comercial ampliamente utilizado en nuestros días.

En 1903, Thomas R. Weymouth experimentó con orificios hechos en láminas delgadas con extremos afilados, con el fin de medir grandes flujos de gas natural. Weymouth utilizó tomas de presión a una pulgada corriente arriba y una pulgada corriente abajo, distancias medidas desde la cara anterior del orificio. Este tipo de corte habría de ser un estandar predominante en la industria. Weymouth desarrolló coeficientes empíricos referidos a la razón entre el diámetro del orificio y el de la tubería.

En 1913, E.O. Hickstein publicó datos similares a los de Weymouth, excepto que estos fueron basados en un medidor con tomas a $2\frac{1}{2}$ diámetros corriente arriba y 8 diámetros corriente abajo.

En 1916, El profesor Horace Judd reportó ante la ASME datos sobre el uso de tomas de presión de "Vena Contracta". En su trabajo incluyó también el uso de orificios excéntricos y segmentados.

En la actualidad, los medidores de orificio típicos llevan las tomas de presión a un diámetro de tubería corriente arriba y a medio diámetro corriente abajo. Este arreglo es muy práctico para uso industrial, donde es frecuente que los usuarios tengan que cambiar de placa.

2.LOS MEDIDORES DE FLUJO

2.1.MEDIDORES DE CABEZA DE PRESION VARIABLE

Estos medidores funcionan bajo el principio de transformación de un tipo de energía a otro. Cuando se trabaja con líquidos, se consideran solo dos tipos de energía, y son la energía cinética y aquella debida a la presión estática. Los medidores de flujo tipo Venturi, orificio y similares, dependen de la conversión de la energía debida a la presión estática a energía cinética. En el tubo Pitot, la conversión se realiza de energía cinética a presión en el tubo de impacto.

Si en un canal se presenta una constricción, el fluido aumentará su velocidad y por lo tanto su energía cinética. Este cambio se manifiesta por una caída de presión.

Estimaciones recientes se refieren a que más de un 50% de los medidores de flujo actualmente en operación son medidores de cabeza.

Una característica importante de estos sistemas es que en general la diferencia de presión que se registra u observa es directamente proporcional al cuadrado de la razón de flujo.

$$DP \propto Q^2$$

2.1.1.Medidor de Orificio

Los medidores de orificio son los más populares debido a que son económicos, de fácil instalación, de fácil reemplazo, los resultados que se obtienen son muy reproducibles (particularmente en fluidos limpios) y son de fácil fabricación.

Un medidor de orificio es básicamente una placa perforada que se instala en una tubería. Existen varios tipos de medidores de orificio, el idóneo depende de la aplicación en particular (ver figuras 2.1.1 a 2.1.5).

2.1.1.1. Orificio en Borde de Escuadra

También denominado orificio de borde afilado u orificio concéntrico, es un orificio cuya pared interior es paralela al tubo. El corte es perfectamente hecho a escuadra. La corriente de fluido que pasa a través de este orificio alcanza su menor sección transversal a aproximadamente 0.5

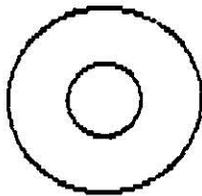


Fig. 2.1.1

Vista frontal de una placa de orificio concéntrico.

diámetros de tubería corriente abajo. A esta constricción en el fluido se le denomina vena contracta. La posición exacta de la vena contracta depende de la relación entre el diámetro del orificio y el de la tubería (ver figura 2.1.2).

No es recomendable utilizar este tipo de medidores con líquidos con sólidos suspendidos, pues estos se acumulan en la cara anterior de la placa modificando la forma del instrumento de tal manera que la distribución del flujo se ve afectada.

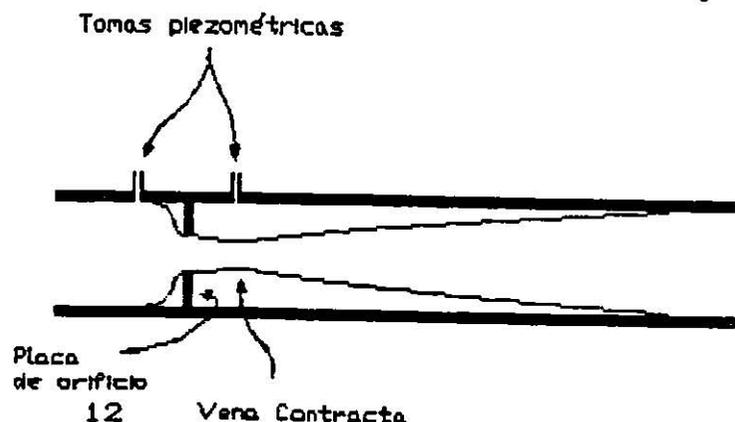


Fig. 2.1.2

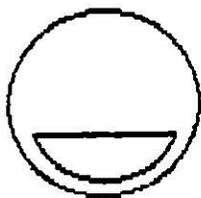
Medidor de orificio

2.1.1.2. Orificios Cónico y de Borde en Cuadrante

Estos tipos de orificio son relativamente nuevos, fueron diseñados para medición de flujo de líquidos con bajos números de Reynolds. El cónico presenta el bisel corriente arriba. El ángulo y profundidad se debe calcular y maquinar para cada aplicación en particular.

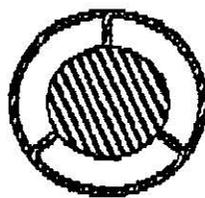
El orificio de borde en cuadrante presenta un borde redondeado a la entrada. El radio de la sección transversal del borde redondeado es igual a la longitud del orificio, midiéndose tal longitud en la sección paralela al tubo. Este tipo de medidor presenta la ventaja que puede cubrir un rango mayor de número de Reynolds bajos que el de borde afilado y además no sufre mucha alteración en los coeficientes de descarga. Esta alteración suele presentarse debido a la erosión que afecta a la forma de la sección de entrada.

2.1.1.3. Orificios Segmentales y Excéntricos



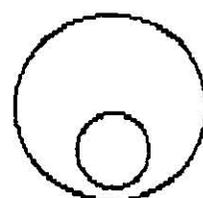
ORIFICIO SEGMENTAL

Fig. 2.1.3



ORIFICIO ANULAR

Fig. 2.1.4



ORIFICIO EXCÉNTRICO

Fig. 2.1.5

Los orificios segmentales y los excéntricos se utilizan para medir flujos de gases que arrastran líquidos o sólidos suspendidos, o flujos de líquidos que arrastran burbujas de gas. Si el fluido es un gas que arrastra gotas de líquido o

trozos de sólidos, se instala la placa con el orificio en la parte inferior. Si el fluido es un líquido con burbujas de gas, la placa es instalada con el orificio en la parte superior. Las tomas de presión, en ambos casos, se deben encontrar en el lado contrario al de la perforación.

2.1.1.4. Cuña Segmentada

Este instrumento es una variante del orificio segmentado, diseñado para trabajar con líquidos que contienen sólidos en suspensión (ver figura 2.1.6). Tienen la ventaja de poder medir líquidos con un bajo número de Reynolds y aún mantener la relación proporcional entre la diferencia de presión y el cuadrado de la razón de flujo. La dimensión crítica en este instrumento es la brecha entre la cuña y la tubería. La caída de presión total debido a este instrumento es aproximadamente la mitad de la registrada en el orificio común.

2.1.1.5. Orificio Anular

Este tipo de orificio tiene la apariencia contraria a la de los orificios descritos anteriormente: el centro es sólido y el contorno es el que permite el paso al fluido (ver figura 2.1.4). Estos sistemas son muy ventajosos para medir flujos de gases con líquidos o sólidos arrastrados o para líquidos con gases arrastrados, siempre que la concentración del contaminante sea pequeña.



Fig. 2.1.6

Cuña segmentada

2.1.2.Tomas de Presion en Medidores de Orificio

Las tomas de presión son parte importante en los medidores de orificio, ya que la confiabilidad en la lectura de flujo depende de la estabilidad y claridad de la señal de presión emitida por el instrumento. La posición de las tomas de presión no puede ser aleatoria, puesto que existen algunas zonas donde la lectura de señal es muy difícil y en ocasiones imposible.

2.1.2.1.Toma de Vena Contracta

En esta distribución la toma de presión corriente arriba se encuentra entre $\frac{1}{2}$ y 2 diámetros de tubería, distancia medida desde el borde corriente arriba de la placa de orificio. La toma corriente abajo se encuentra en el punto donde se localiza la vena contracta (véase orificio con borde en escuadra para la definición de vena contracta)(ver figura 2.1.2). Esta distribución causa el problema de tener que cambiar todo el medidor para cada placa de orificio, pues no es posible 'mover' la toma de presión. Sin embargo suele ser muy práctica cuando las condiciones a las que se utilizará un determinado medidor son siempre similares y por lo tanto, no se requiere de un cambio de placa.

2.1.2.2.Tomas de Brida

Las tomas de brida se encuentran localizadas en las bridas de unión entre la placa y la tubería. Estas tomas presentan

la ventaja de poderse revisar fácilmente y por lo tanto darles mantenimiento es sencillo. Por otro lado, se encuentran localizadas simétricamente en relación a la placa, lo cual permite su uso con flujos en ambos sentidos. Regularmente, la distancia entre la placa y cada toma es de una pulgada.

Una desventaja de esta distribución se presenta en tuberías de diámetro menor a 2 pulgadas, pues cuando la razón de diámetros entre el orificio y la tubería es grande, las lecturas corriente abajo son inestables.

2.1.2.3. Tomas de Esquina

Las tomas de presión en este arreglo se encuentran en las pestañas a ambos lados de la placa.

Esta distribución tiene la desventaja que la toma corriente arriba es muy susceptible de taparse, congelarse y de ser afectada por perturbaciones en el flujo corriente arriba.

Este sistema no es utilizado en la actualidad, pues en las pruebas que se le hicieron presentó más desventajas que ventajas.

2.1.2.4. Tomas de Tubería

En las tomas de tubería, la toma corriente arriba se encuentra localizada a $2\frac{1}{2}$ diámetros de tubería y la toma corriente abajo se encuentra localizada a 8 diámetros de la cara anterior de la placa. Estas tomas son muy confiables y

muy estables. La señal obtenida en este caso es la caída de presión total en la tubería.

Las desventajas que presenta este arreglo se refieren a la dificultad que representa su revisión y mantenimiento y a lo ineficiente que resulta utilizarlos a flujos bajos, pues la caída de presión es tan baja que difícilmente se puede detectar. Por otro lado, su uso requiere de tramos largos de tubería además de la necesaria para las tomas de presión, pues debe existir un tramo antes de la toma corriente arriba y otro después de la toma corriente abajo para asegurar la estabilidad del fluido y por lo tanto credibilidad en las lecturas.

2.1.2.5. Tomas de Radio

En las tomas de radio, la toma de presión corriente arriba se encuentra a 1 diámetro de tubería de la placa y la toma de presión corriente abajo se encuentra a $\frac{1}{2}$ de diámetro. Este tipo de distribución es sumamente práctico y cómodo, pues las tomas son fácilmente revisables y además, la toma corriente abajo se encuentra en las proximidades de la vena contracta, lo cual significa que si bien no se beneficia de la máxima caída de presión, por lo menos tiene una mayor diferencia que detectar que cualquier otra distribución, a excepción de las tomas de vena contracta por supuesto. Este sistema es compatible con una gran variedad de orificios y relaciones de diámetro.

2.1.3. Medidor Tipo Venturi

Este tipo de medidor es particularmente útil en lugares donde la pérdida de presión es muy costosa. Estos equipos ofrecen una alta recuperación de la presión en la línea, poseen un cono en la sección anterior cuyo ángulo de entrada es de aproximadamente 21 grados (ver figura 2.1.7). La siguiente sección es una garganta recta cuya longitud es igual a su diámetro. La última sección de un tubo Venturi es un cono de salida cuya pendiente puede tener entre 5 y 15 grados. Es en esta sección donde se obtiene la máxima recuperación de la presión. Como las lecturas de este medidor dependen de la presión antes y después de la constricción, el instrumento presenta una toma de presión entre 0.25 y 0.5 diámetros de tubería corriente arriba, medidos a partir del inicio del cono de entrada. La segunda toma de presión se encuentra en la garganta.

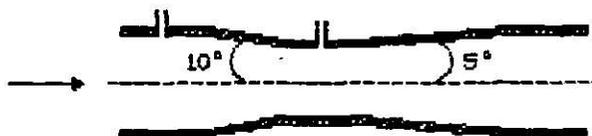


Fig. 2.1.7

Medidor Venturi

En un medidor Venturi tipo Herschel se obtiene una pérdida de presión permanente de aproximadamente 10 al 15 % de la caída de presión medida entre las tomas, para ángulos pequeños (5 a 7 grados) y 10 a 30 % para ángulos mayores (15 grados).

Los medidores tipo Venturi ofrecen la ventaja de trabajar con cantidades grandes de fluido con bajas caídas de

presión además de permitir que los líquidos contengan sólidos en suspensión.

2.1.4. Medidor de Boquilla

Estos sistemas son prácticos para el manejo de flujos altos, permiten el paso de un 60 % más del flujo que permitiría un medidor de orificio causando la misma caída de presión.

El medidor de boquilla consiste de una sección de entrada con forma de campana unido a un cuello cilíndrico, paralelo a la tubería. La sección transversal de la entrada presenta una forma elíptica, siendo la garganta un cilindro tangente a la elipse (o cuarto de elipse) (ver figura 2.1.8). Los ejes recomendados por ASME son: d y $2/3 d$ para boquillas de diámetro pequeño, $D/2$ y $1/2 (D-d)$ para boquillas de diámetro grande. En esta especificación d es el diámetro de la garganta y D el diámetro de la tubería. Se ha experimentado con otras curvaturas, pero por lo regular experimentos con un mismo instrumento en diferentes

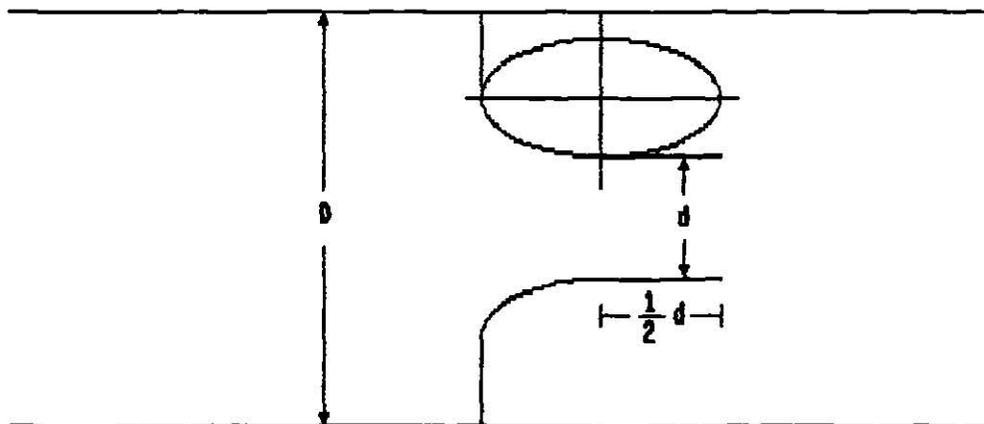


Fig. 2.1.8

Medidor de
Boquilla

laboratorios han reportado mayores diferencias que los cambios de curvatura.

La longitud de la garganta es regularmente 0.5 diámetros de boquilla.

Un detalle importante en estos medidores es la localización de las tomas de presión. Se recomienda que estén instaladas a un diámetro de tubería corriente arriba y medio diámetro de tubería corriente abajo. Cualquier intento de modificar la posición de la toma corriente abajo influye negativamente en la precisión y claridad de las lecturas. Una prueba con la toma de presión en la garganta mostró lecturas inconsistentes.

Este tipo de medidor permite la presencia de sólidos en suspensión, sin embargo no es recomendable utilizarlo con líquidos de viscosidad alta ni con líquidos con alto contenido de sólidos en suspensión que puedan adherirse a la superficie del medidor.

2.1.5. Medidor de Codo

Uno de los medidores de flujo más sencillos que se puede utilizar es un codo de tubería. Todo lo que se debe hacer es taladrar 2 agujeros a la mitad del codo (a los 45°), uno en la parte interna y el otro en la parte externa de la curvatura. Así, se mide la fuerza centrífuga diferencial entre los radios interno y externo. Resulta recomendable hacer uso de tomas piezométricas en las perforaciones del codo.

En líneas generales puede decirse que la fuerza centrífuga en el interior del codo es proporcional a la densidad del fluido por la velocidad al cuadrado. La fuerza mensurable

es inversamente proporcional al radio de curvatura del codo. Así, un codo de radio pequeño permitirá que la señal sea más fácilmente detectable que si el radio es grande.

2.1.6.El Tubo de Pitot

Este instrumento mide la velocidad local o puntual mediante la diferencia entre la presión de impacto y la presión estática. Se trata de un tubo en forma de L que se inserta en una tubería. El tubo tiene dos secciones que están en contacto con el fluido: una toma de presión estática que puede estar en la parte vertical del tubo y orientada de forma que no reciba el impacto del fluido o puede estar en la superficie de la tubería (este sistema es el que da mejor resultado). La segunda sección se refiere a la toma de presión de impacto y se trata de un orificio que se encuentra en la punta de la sección horizontal del tubo, de frente a la corriente.

Las ventajas de este medidor se basan en su fácil instalación, bajo costo, carencia de partes móviles y presenta un mínimo de caída de presión total en la tubería. A pesar de esto su uso industrial es de poca importancia, pues tiene la desventaja que cualquier impureza en la línea puede taponar al instrumento. Así, su aplicación se reduce a usos en laboratorios y pruebas de campo. También debe tomarse en cuenta su alta sensibilidad a efectos de distribución de velocidad anormal. Esta sensibilidad puede compensarse empleando varios medidores en diversos puntos de la misma sección de tubería. De esta manera, se obtiene un valor promedio.

2.1.7. Medidor de Escudo

También denominado medidor de blanco, es una aplicación del orificio anular (véase orificio anular) (ver figura 2.1.4). Se compone de un disco suspendido por un brazo en el centro de una tubería. El brazo de fuerza se encuentra conectado a un transmisor de balance de fuerza (ver figura 2.1.9). El disco permite el paso tanto de sólidos suspendidos y gases arrastrados en líquidos como partículas sólidas y gotas de líquido arrastrado en gases.

En los sistemas clásicos, la diferencia de presión a ambos lados del disco se compensa mediante el sistema boquilla-aleta (Véase Apéndice A).

Estos medidores son ideales para fluidos sucios o líquidos corrosivos.

MEDIDOR DE ESCUDO

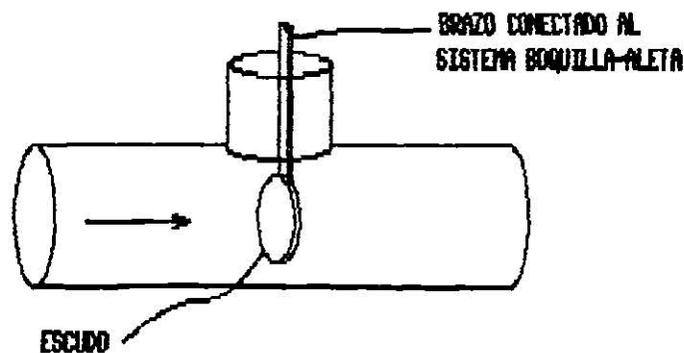


Fig. 2.1.9

2.1.8. Medidores Annubar

Los medidores de Annubar son producto de un desarrollo reciente en el que se aplica el principio del tubo de pitot, en gran medida. Se componen de una barra delgada que atraviesa al tubo diametralmente. El extremo inmerso está cerrado y el extremo que sale a la superficie del tubo se conecta a los sistemas secundarios de medición (ver figuras 2.1.10 a 2.1.13). Los medidores Annubar producen una señal de presión diferencial, la cual es proporcional al cuadrado de la razón de flujo.

$$DP \propto Q^2$$

$$DP = P_H - P_L$$

donde: P_H = presión alta promedio.

P_L = presión baja promedio.

La presión alta es producida por el impacto del perfil de velocidad sobre el sensor. El perfil de presión de impacto es captado por múltiples puertos sensibles localizados en la parte frontal del sensor. El perfil de velocidad continúa al rededor del sensor y crea un perfil de baja presión que es detectado por los puertos localizados corriente abajo, opuestos a los puertos de alta presión. Ambas cámaras obtienen una presión promedio que se transmite al equipo secundario.

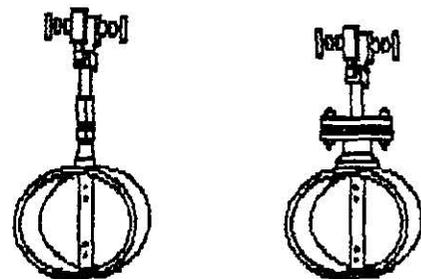


Fig. 2.1.10

Pruebas en laboratorio indican que en tuberías de diámetros grandes, existe mayor susceptibilidad a la distorsión dinámica en los perfiles de velocidad. La presencia de distorsiones puede afectar a la estabilidad y exactitud del sensor. Por este motivo, el medidor Annubar suele tener

número variable de puertos sensibles, dependiendo del diámetro de tubería con el que deberá trabajar (ver figura 2.1.13). Para las tuberías de mayor diámetro, los medidores estarán provistos de mayor número de puertos sensibles, puesto que a mayor cantidad de puertos, se presenta mayor estabilidad en la señal de presión diferencial y por lo tanto, un mejor promedio de velocidad.

MODELO CON SISTEMA DE INSTALACION

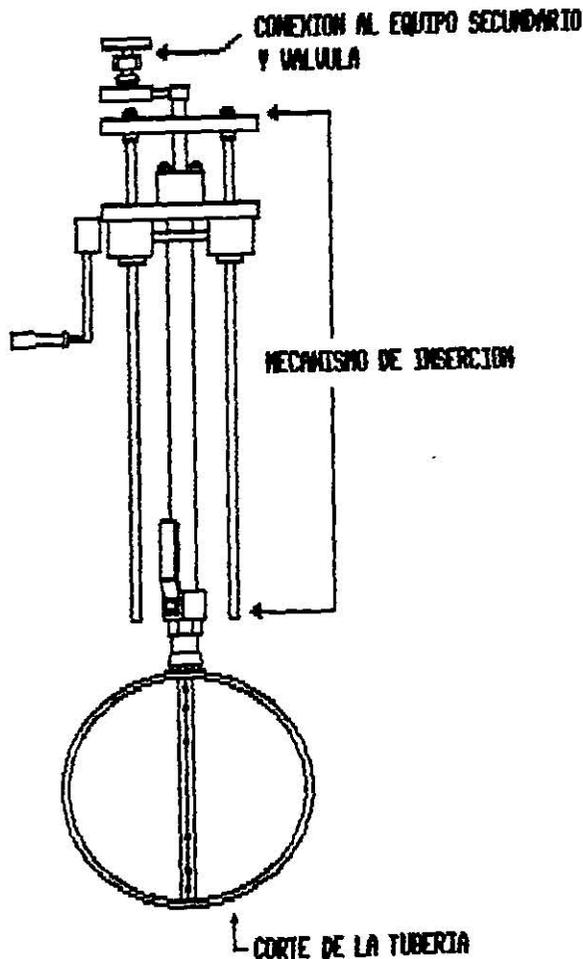
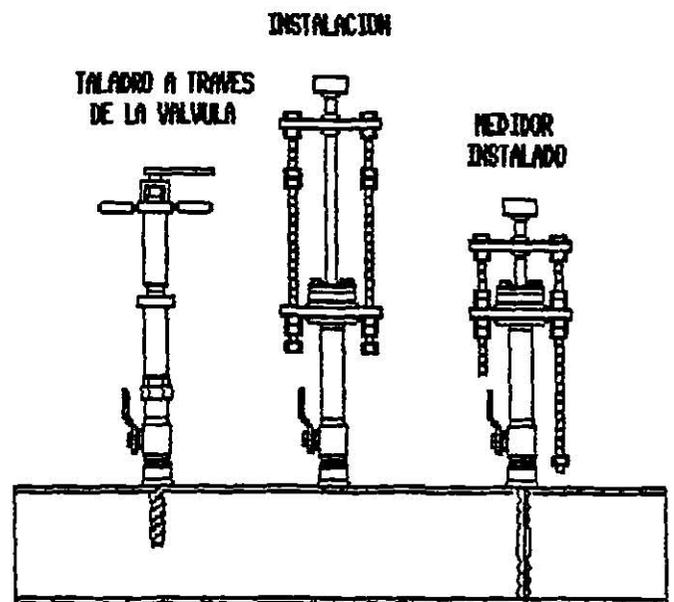


Fig. 2.1.11

Fig. 2.1.12



INSTALACION DEL MEDIDOR

Existen dos diseños para medidores de tipo Annubar, uno de ellos es el de forma de diamante y el otro es el de forma circular.

La forma de diamante establece un punto fijo de separación entre el fluido y el sensor. Esto elimina un cambio en la señal de baja presión que causaría una pérdida de precisión en la medición de flujo.

Los sensores circulares presentan un punto de separación variable entre el fluido y el sensor. Este punto depende del tipo de fluido, velocidad, turbulencia y rugosidad superficial del sensor. Estas variaciones causan que la sección de baja presión emita señales impredecibles con la consecuente pérdida de precisión. La variación puede ser hasta de un 10%.

La desviación en la precisión en un medidor Annubar es de $\pm 1\%$ en un rango de lectura de 10:1 independientemente del número de Reynolds.

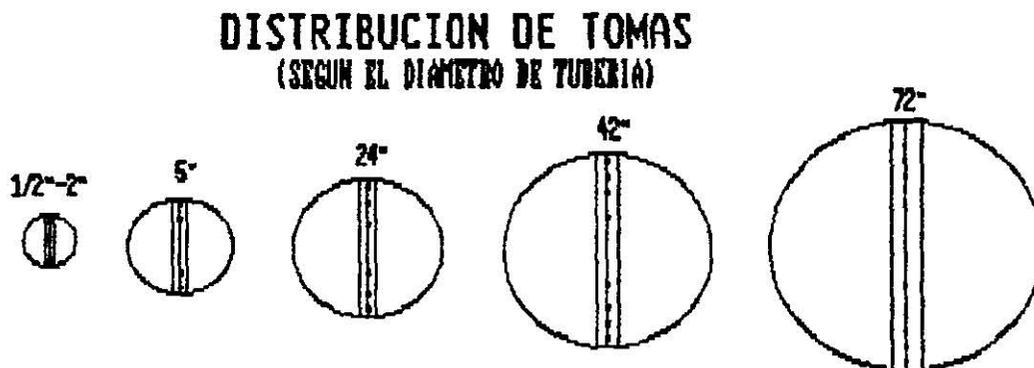


Fig. 2.1.13

2.2.MEDIDORES DE CABEZA DE AREA VARIABLE

Estos instrumentos funcionan en principio igual que los medidores de cabeza de presión variable. Así, si tomamos como ejemplo un medidor de orificio, este posee una abertura de área constante y el paso del fluido provoca una caída de presión. En el medidor de área, se tiene un orificio de área variable, siendo la diferencia de presión la que se mantiene casi constante. Es común en estos medidores que los cambios en la razón de flujo se manifiesten por cambios en el área.

Se pueden definir tres tipos de medidores de área: los rotámetros, los medidores de orificio y tapón cónico y los medidores de pistón.

2.2.1.El Rotámetro

El rotámetro típico es un tubo cónico largo en cuyo interior se encuentra un flotador. El flotador suele ser metálico y en general su densidad debe ser mayor a la del fluido con el que habrá de trabajar. El flotador llega a su posición de equilibrio dentro del tubo según la fuerza descendente debida a su peso y la fuerzas ascendentes provocadas por el fluido. En su forma más simple, el tubo es de vidrio, el cual se encuentra graduado de manera tal que la razón de flujo pueda leerse directamente al observar la posición del flotador.

El término rotámetro se deriva de las unidades que se fabricaban en un principio, los flotadores estaban provistos de canales que los ponían a rotar con el fin de lograr una buena estabilidad. La tendencia actual es a fabricar flotadores no rotatorios.

Los tubos de los rotámetros actuales no necesariamente tienen la forma completamente cónica tradicional, sino que se fabrican según las necesidades. Así, pueden encontrarse tubos que tienen una escala más expandida en la región de bajos flujos que en la de flujos mayores. Por otra parte, la forma perfectamente cónica no ofrece una distribución lineal de la graduación en unidades de flujo, para lograr este efecto, la forma interna del tubo es alterada ligeramente. En muchos casos, el tubo del rotámetro presenta estrías en su parte interna. Si tomamos en cuenta un cilindro cuyo diámetro interior sea ligeramente mayor que el diámetro externo del flotador, las estrías cambian de profundidad proporcionalmente a la altura del tubo. Así, el líquido fluye por las estrías y el flotador se mueve verticalmente hasta su punto de equilibrio sin peligro de oscilar en sentido horizontal. Este diseño es práctico cuando se opera con líquidos ligeramente opacos, pues como la distancia entre el flotador y las paredes verticales es constante y solo permite la presencia de una delgada película de líquido, el flotador puede ser visto a lo largo del medidor en todo momento. Otros modelos incluyen tubos de sección transversal triangular. En estos casos, las paredes rectas son paralelas al movimiento del flotador y las esquinas, que en la parte inferior son redondeadas, cambian paulatinamente su curvatura hasta formar el vértice en la parte superior. También es posible encontrar modelos

con una guía concéntrica al flotador, que atraviesa a todo lo largo del tubo.

Se ha visto que el diseño del flotador es de suma importancia en la sensibilidad que el instrumento habrá de tener a la viscosidad. Un flotador con esquinas afiladas es prácticamente insensible a los cambios de viscosidad.

Existen flotadores de diversos diseños según la aplicación:

- * Flotadores esféricos.
- * Aerodinámicos.
- * Compensadores de viscosidad.
- * Semicompensadores de viscosidad.

Los flotadores de forma esférica son recomendables para flujos bajos con líquidos de baja viscosidad.

Los flotadores aerodinámicos pueden utilizarse a altas velocidades de flujo. Son altamente sensibles a la viscosidad.

Los flotadores compensadores se pueden operar a altas razones de flujo con líquidos de viscosidad alta. Para su funcionamiento se requieren tubos más largos que los que precisan los aerodinámicos.

Los flotadores semicompensadores permiten trabajar con flujos altos y fluidos no demasiado viscosos.

En los instrumentos actuales, las escalas son esencialmente lineales. La calibración de las escalas se

presentan en porcentajes de máximo flujo (entre 100 y 8 %). Con cada instrumento se suele incluir una tabla de factores por los que se debe multiplicar cada lectura para obtener el valor de flujo en unidades convenientes. En caso de trabajarse con fluidos diferentes o de cambiarse las condiciones de flujo, será suficiente con cambiar los factores.

Una consideración importante, además de las anteriormente descritas, para los rotámetros cuyo material sea sensible a los cambios de temperatura es que por lo regular vienen calibrados a una determinada temperatura. Para operarse a diferentes temperaturas debe tomarse en cuenta el coeficiente de expansión del material al calcular una razón de flujo.

2.2.2. Medidores de Orificio y Tapón Cónico

Este tipo de medidores se componen de una placa de orificio montada en una cámara vertical y un flotador de forma cónica cuyo lado de menor área se encuentra en la parte inferior. El flotador tiene movimiento libre en sentido vertical y es el fluido quien le obliga a buscar la posición de equilibrio.

Este instrumento es básicamente un rotámetro de menor tamaño en el que se pueden aplicar todas las consideraciones matemáticas definidas para rotámetros. La forma cónica del flotador hace que este medidor sea más sensible a los cambios de viscosidad que el rotámetro, pues el flotador de éste está provisto de esquinas afiladas y

paredes planas verticales, lo cual hace que exista menor fuerza de arrastre entre el fluido y el cuerpo flotante. El tapón cónico ofrece un área de arrastre grande para el fluido.

Los medidores de orificio con tapón cónico son instrumentos ideales para las líneas de purga y lugares donde no es necesaria mucha precisión, pero se considere como aspecto importante la economía o el espacio.

2.2.3. Medidores de Pistón

Estos medidores poseen un pistón instalado en un cilindro, el cual está provisto tanto de una entrada como de una salida de fluido. El pistón se encuentra diseñado de tal forma que cabe exactamente dentro del cilindro. La presión del fluido entrante empuja al pistón hasta que el área del orificio de salida sea el suficiente para permitir el paso del fluido en cuestión. Externamente, la razón de flujo se determina según la posición del pistón.

Estas unidades se emplean generalmente en medios donde el fluido tiene alta presión y regularmente en tuberías de 4 pulgadas de diámetro o más.

Los medidores de pistón tienen una cámara cilíndrica donde albergan un resorte o un conjunto de pesas que ajustan la capacidad del instrumento.

Aparentemente, los medidores de pistón son influenciados por la viscosidad en alguna medida. Comparando los rotámetros con estos medidores, el arrastre del fluido

viscoso en un rotámetro se lleva a cabo en el sentido del movimiento del flotador, en un medidor de pistón el arrastre es aproximadamente normal al movimiento del pistón, ejerciendo por lo tanto menor influencia. Con el fin de poder trabajar con fluidos de altas viscosidades se puede hacer uso de un medidor con chaqueta de vapor.

Los medidores de pistón son menos caros que los rotámetros en tuberías de diámetros mayores (3 y 4 pulgadas). Sin embargo, estos aparatos son delicados y deben usarse con fluidos limpios, libres de partículas. No se recomienda intentar cambiar la capacidad del instrumento ampliando el área de las puertas, se perdería la linealidad. En aquellos medidores que usan pesas, debe observarse la verticalidad. La inclinación no debe exceder de 5° de la vertical.

2.3.MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Los medidores de desplazamiento positivo son instrumentos que dividen el líquido en volúmenes específicos que son movidos de un extremo a otro del cuerpo. El flujo total es obtenido por la suma de los diferentes volúmenes medidos.

Este tipo de instrumentos son ideales para la medición del flujo de líquidos de alta densidad y/o para el uso de sistemas mecánicos simples. Son de gran utilidad para trabajar con líquidos de alta viscosidad.

2.3.1.Medidor de Disco Nutante

En el interior de una cámara se encuentra un disco. El centro del disco contiene una esfera que actúa como eje. Una pared vertical divide la cámara entre el eje y la parte anterior, donde se encuentran la entrada y la salida del fluido. Si dividimos la cámara en dos secciones colocando el disco en posición horizontal, encontraremos que en la sección superior está la entrada del fluido y en la sección inferior, al lado contrario de la pared vertical, la salida. Al pasar el fluido por el instrumento, el disco adquiere un movimiento de balanceo haciendo que el fluido atraviese por toda la sección correspondiente (superior o



Fig. 2.3.1

inferior) de la cámara¹ (ver figura 2.3.2). De esta manera, el fluido es dividido en porciones iguales sin afectar la continuidad del flujo. La esfera que sirve de eje puede estar provista de una varilla que active un mecanismo de conteo.

Estos instrumentos permiten en manejo de flujos bajos. Su construcción puede realizarse de diversos materiales según el uso que se le quiera dar; gracias a esta ventaja es posible hacer uso de un medidor de disco nutante con líquidos corrosivos. Es muy práctico para plantas donde se trabajan con sustancias químicas concentradas, e incluso soluciones cáusticas.

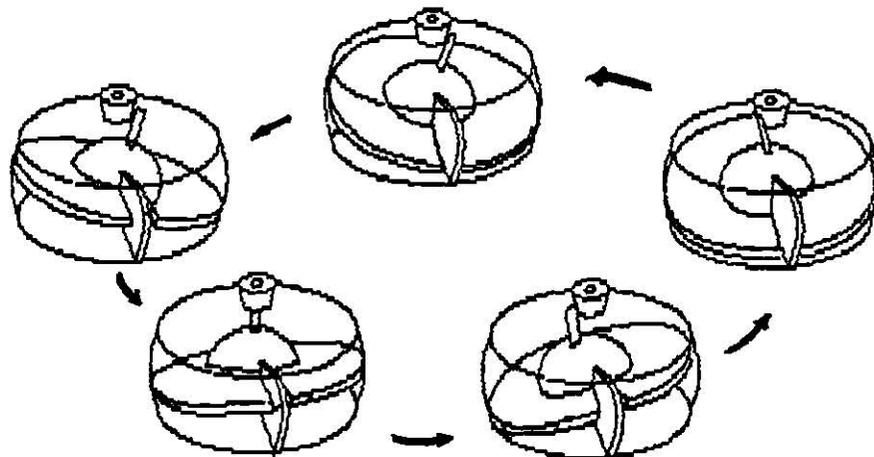


Fig. 2.3.2

Movimiento del disco nutante

¹ Si se instala una varilla sobre la esfera, de manera que quede perpendicular al plano del disco (como si se tratara del eje de rotación), el extremo libre de la varilla describiría un movimiento rotacional.

2.3.2. Medidor de Pistón Reciprocante

Existen medidores de pistón simple y de pistón múltiple. La elección del sistema adecuado depende del uso que se le quiera dar y particularmente los rangos de flujo en los que se pretende operar.

Uno de los instrumentos de este tipo es el medidor de pistón oscilante que cuenta con un pistón único (ver figuras 2.3.3 y 2.3.4). Este instrumento funciona en principio de forma similar al medidor de disco nutante. La diferencia principal radica en que el pistón oscilante se mueve en un solo plano. Si bien es cierto que el pistón tiene cierta altura, no se mueve de arriba hacia abajo. Si vemos al pistón desde un costado, el movimiento observado es oscilatorio. La cámara es cilíndrica y tiene 2 o cuatro pasos de fluido (según el fabricante): una entrada y una salida o 2 entradas y 2 salidas. También cuenta con dos secciones que se cargan y se descargan alternativamente. Una de las secciones se encuentra entre la pared externa del pistón y la interna de la cámara, la otra sección se encuentra en el interior del pistón. Una ventaja de este instrumento es que el líquido no tiene contacto con partes móviles delicadas tales como transmisiones, engranes o material que pueda corroerse fácilmente.

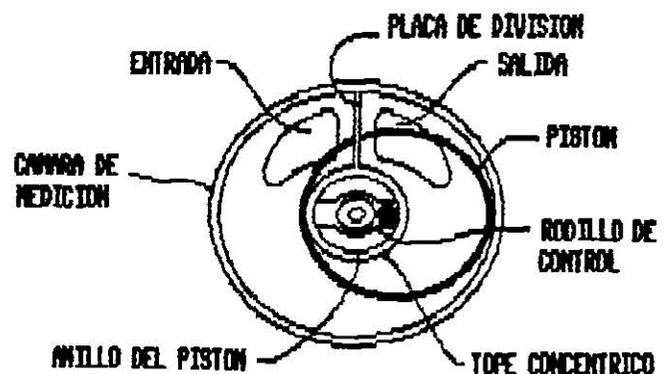


Fig. 2.3.3

Pistón recíprocante

Este instrumento también puede ser fabricado en diversos materiales, lo cual le permite manejar una amplia variedad de sustancias.

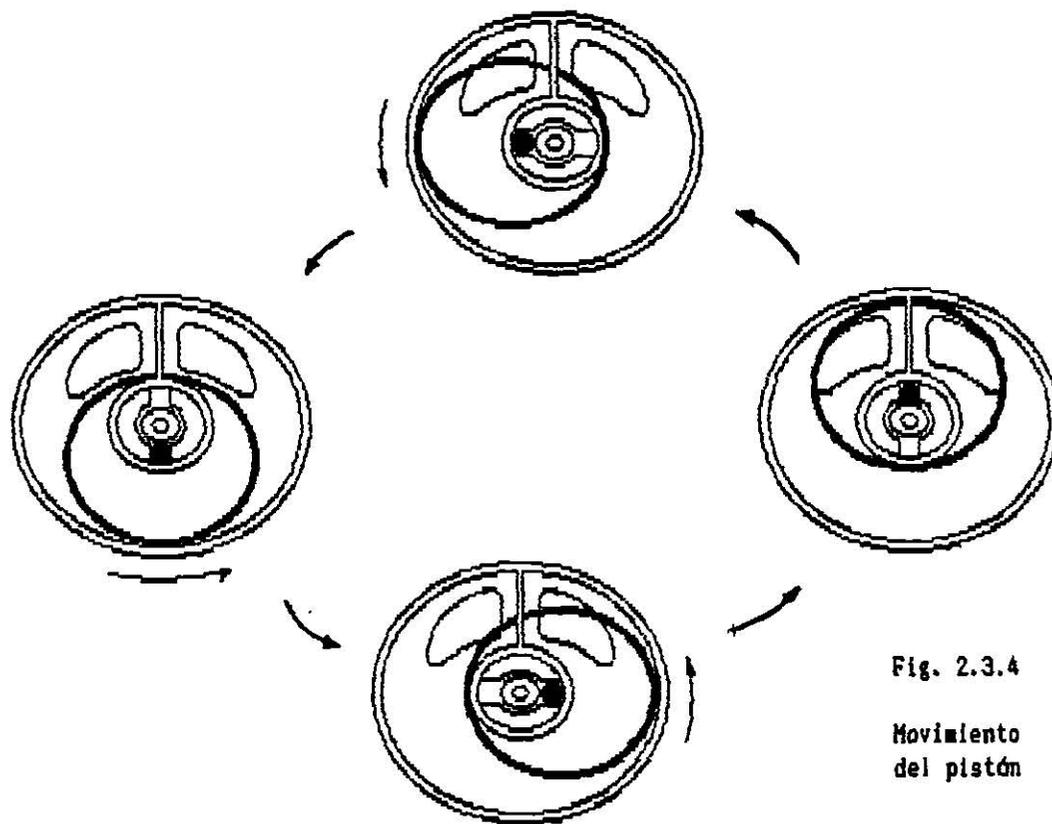


Fig. 2.3.4
Movimiento del pistón

2.3.3. Medidores Rotativos

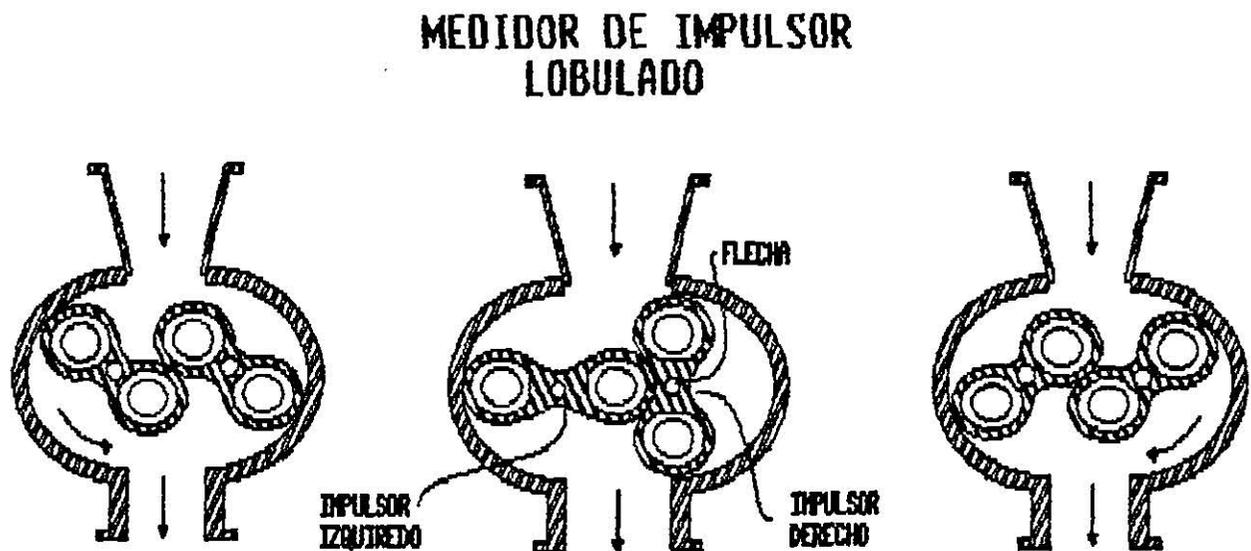
Existen diversos diseños de medidores rotativos, en general se componen de un propulsor rotativo dividido equitativamente en dos o más componentes formando dos o más cámaras. El propulsor se encuentra instalado de forma que exista un sello entre él y las paredes internas del cuerpo. En cada rotación del impulsor, un volumen determinado de

líquido es expulsado por la salida. Las revoluciones del impulsor se cuentan y registran en unidades de volumen.

Entre los medidores rotativos se encuentran los de impulsor lobulado y los de aspas. Existen dos tipos de medidores rotativos de aspas: los de aspas deslizantes y los de aspas retráctiles.

2.3.3.1. Medidor de impulsor Lobulado

Este sistema se compone básicamente de dos piezas lobuladas que se conectan entre sí de forma similar a engranes (ver figura 2.3.5). Un modelo comercial se compone de dos engranes de forma oval que se encuentran conectados entre sí.



Este instrumento puede trabajar a relativamente altas temperaturas (200°C) y altas presiones (1200 psi.). Una característica importante de este medidor es que causa una caída de presión relativamente baja en la línea. También se fabrican en los materiales más diversos. El medidor de impulsor lobulado puede emplearse con gases y con un amplio rango de fluidos ligeros a viscosos incluyendo asfaltos. Se obtiene buen rendimiento, particularmente a altas razones de flujo.

Este medidor presenta algunas desventajas, debido a su diseño tiende a ser voluminoso y pesado, lo cual se ve acrecentado en los aparatos para tuberías de mayor diámetro; los diseños grandes suelen ser caros. Por otro lado, no están preparados para manejar flujos bajos, tienden a resbalar y por lo tanto a dar lecturas inestables o erróneas.

2.3.3.2. Medidores Rotativos de Aspas Deslizantes

Los medidores rotativos de aspas deslizantes tienen un eje central sobre el que se encuentra una leva y un cilindro concéntrico (ver figura 2.3.6). La leva provoca que las aspas cambien de "longitud" entre el cilindro y la pared del cuerpo del medidor. Cuando dos aspas se encuentran totalmente extendidas se forma una cámara entre estas, el cilindro y la pared interior del cuerpo. El acceso o sellado de cada cámara es controlado por la leva.

Estos medidores se utilizan principalmente para líquidos limpios y a temperaturas inferiores a los 205°C y 900 psi.

2.3.3.3. Medidores Rotativos de Aspas Retráctiles

Los medidores rotativos de aspas retráctiles se componen de un eje central sobre el que gira un rotor de tres aspas por cuyas paredes se mueven las aspas retráctiles. Estas se encuentran provistas de algún sistema elástico (resortes por lo regular) que les obliga a permanecer extendidas (ver figura 2.3.7). El cuerpo del instrumento tiene una forma tal que controla la posición de las aspas según se necesiten (extendidas o retraídas). El sellado en el interior del cuerpo para evitar que el fluido regrese a la entrada se efectúa con pequeñas válvulas elásticas denominadas sellos elásticos. Un modelo que funciona bajo el mismo principio se compone de un rotor excéntrico y un cuerpo circular (según corte longitudinal).

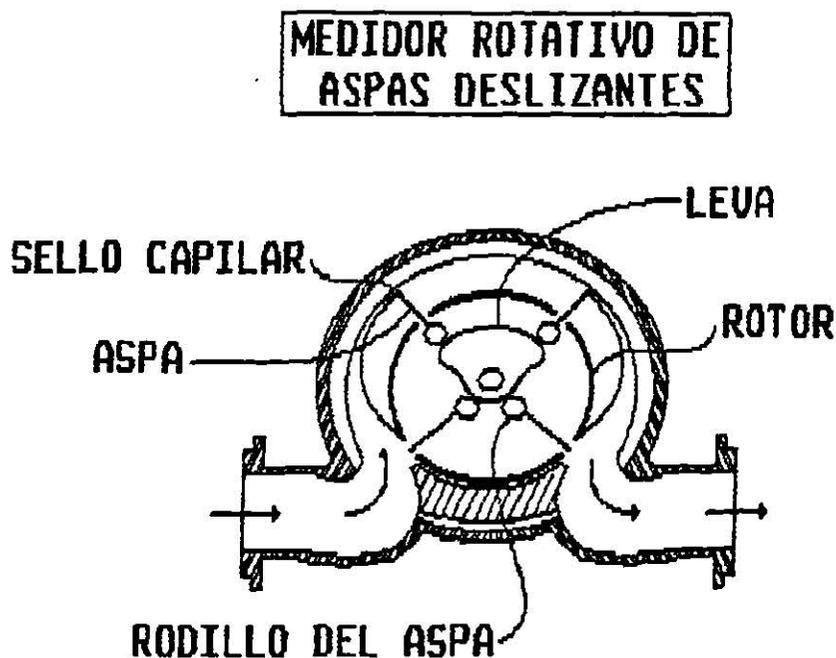
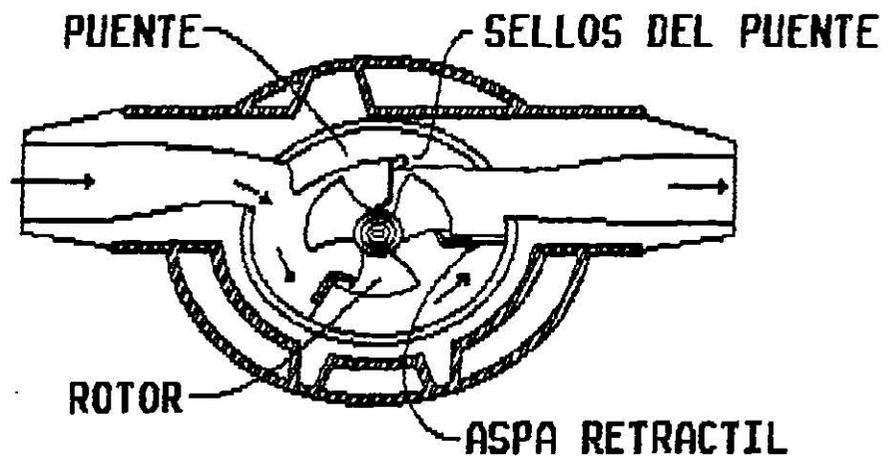


Fig. 2.3.6

Estos aparatos pueden utilizarse con líquidos altamente viscosos (10^5 segundos Saybolt Universal) y/o con fluidos que contienen sólidos suspendidos. Pueden encontrarse para tuberías de 1 a 4 pulgadas de diámetro. Se pueden emplear con fluidos que se encuentren hasta a 205° C y 600 psi. de presión.

MEDIDOR ROTATIVO DE ASPAS RETRACTILES

Fig. 2.3.7



2.3.3.4. Flujoímetros Helicoidales

Se componen de uno o dos rotores helicoidales. El modelo de un rotor es una helicoide insertada en un cilindro con guías dispuestas de tal manera que se forman varias cámaras aisladas. El modelo de dos rotores se compone de dos helicoides cuneiformes engranados entre sí. Los rotores desplazan el líquido axialmente de un extremo del medidor al otro.

2.4.MEDIDORES DE VELOCIDAD

Los medidores de velocidad son instrumentos lineales con respecto al flujo volumétrico. Una gran ventaja de la relación lineal entre lectura y flujo sobre la relación cuadrática se traduce principalmente en mayor rango de operación con un mismo instrumento.

Estos medidores tienen baja sensibilidad a los cambios de viscosidad cuando el número de Reynolds es mayor a 10^4 . De hecho se los considera de mínima sensibilidad a los cambios de viscosidad. El principio de operación de estos instrumentos se basa, como su nombre lo indica, en la medición de la velocidad de las partículas de fluido. Para ello pueden valerse de piezas sobre las que actúa el fluido (ver medidores de turbina y de vórtice). La intensidad de tal acción se traduce posteriormente a una señal mecánica, eléctrica o electrónica. En otros casos, el medidor se vale de alguna propiedad del líquido que le permite detectar o inferir la velocidad (ver medidores de ultrasonido y electromagnéticos).

2.4.1.Turbinas

Los medidores de turbina, tienen un rotor que se encuentra de frente al flujo, el fluido incide sobre las aspas del rotor causando movimiento rotacional. Cuando la rotación es constante, la velocidad es proporcional a la velocidad de flujo. El rotor gira sobre un eje paralelo a la dirección del flujo. El eje puede estar fijado por solo un extremo, a este tipo de construcción se le denomina cantilever;

también puede estar en construcción de doble terminal, donde ambos extremos se encuentran fijos a un soporte. La velocidad del rotor se detecta externamente mediante un elemento secundario. El número de revoluciones por unidad de tiempo es una medida de la razón de flujo. Un conteo de revoluciones totales determina el total de flujo volumétrico .

Las turbinas proporcionan lecturas de flujos en rangos amplios. Son particularmente efectivos en aeronavegación para medición de combustible y flujo criogénico. Los usos primarios de estos instrumentos incluyen el totalizado de flujos para control de inventarios, manejo de cantidades precisas de fluidos para mezcladoras por cargas (batch) y para el control automático de flujos, haciendo uso de controladores digitales.

Las recomendaciones de uso para este medidor se refieren a su operación con líquidos relativamente limpios de viscosidad no muy alta. Si bien la operación básica del aparato no se altera con líquidos no muy limpios, presenta corrosión en sus partes metálicas y fundamentalmente en los cojinetes. La vida útil de los cojinetes se ve altamente afectada por la calidad del fluido.

Por otro lado, se debe tomar en cuenta que la caída de presión en estos aparatos es normalmente mayor que en un medidor de orificio de borde afilado con tomas de brida. Para reducir este efecto se recomienda en algunos casos, el uso de turbinas de mayor capacidad de la requerida, pues la pérdida permanente de presión en la tubería es proporcional a la raíz cuadrada de la razón de flujo.

$$DP \propto \sqrt{Q}$$

Estos instrumentos pueden emplearse en el manejo de productos de petróleo donde son necesarias mediciones de cantidades exactas.

2.4.2. Medidores de Vórtice

Los medidores de vórtice generan remolinos en el fluido. La detección de la velocidad de flujo se cuantifica ya sea por la velocidad de los vórtices o por el número de éstos por unidad de tiempo.

Algunos diseños preparados para la medición de flujo de gases se componen de una cámara de vórtice instalada en una sección de tubería. Un corte longitudinal del medidor en la dirección del flujo, muestra la forma semicircular de la cámara. En su interior se encuentra un cilindro maquinado y balanceado que gira por la acción del fluido. El flujo del gas se divide en uno casi tangencial a la rotación y el fluido que gira con el cilindro formando el vórtice. El número de vueltas del cilindro es proporcional al flujo total del gas. Este principio compensa en rangos amplios a los cambios en la viscosidad. En la parte inferior de la cámara de este medidor, se encuentra una placa plana delgada o septum (paralelo a la dirección del flujo) que divide la sección del flujo en dos. La posición de la lámina depende de un tornillo de ajuste con el que se puede calibrar el instrumento, regulando el número de vueltas del cilindro para un determinado flujo.

Existen medidores de este tipo para tuberías de 2 a 6 pulgadas de diámetro.

El rango de operación se encuentra entre 275 a 1500 psi. y la desviación en la precisión es de $\pm 0.1\%$ de la lectura en su rango lineal.

Un diseño aplicado al flujo de líquidos, hace uso de un fenómeno natural que se presenta cuando un líquido fluye alrededor de un objeto de extremo plano, perpendicular al flujo. Corriente abajo se esparcen remolinos de forma alternada. La frecuencia de esparcido o reparto de vórtices es proporcional a la velocidad del líquido. El efecto de los remolinos es detectado por un elemento sensible a la presión, tal como un cristal de efecto piezoeléctrico (ver sensores de efecto piezoeléctrico en elementos secundarios de señal electrónica).

Este sistema no es recomendable para fluidos sucios donde existan muchas partículas suspendidas y/o para líquidos de alta viscosidad.

Estos medidores se encuentran disponibles para tuberías de 0.5 a 8 pulgadas de diámetro. La desviación en la precisión es de $\pm 1\%$ de todo el rango.

2.4.3. Medidor Electromagnético

Este sistema es muy práctico para medir flujo de líquidos conductores de electricidad.

Básicamente se compone de un tubo cuyo material sea no magnético, esta característica permite el uso de una amplia gama de materiales. Al rededor del tubo se instalan dos bobinas de alambre de cobre con capa de laca; cada bobina tiene forma de silla de montar. Un entrehierro circunda a ambas bobinas (y por supuesto al tubo) provocando un campo magnético perpendicular al flujo. Dos electrodos, que pueden ser de acero 316 o platino, detectan la energía eléctrica producida. Los electrodos se encuentran al ras del interior del tubo y en posición perpendicular al campo magnético y al flujo.

El comportamiento de este medidor de flujo se basa en la ley de Faraday de la inducción electromagnética, que dice: Cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético, se induce un voltaje.

$$E = C h d V$$

donde:

C = Constante dimensional.

h = Campo magnético.

d = Longitud del conductor (en este caso, diámetro del tubo).

V = Velocidad del conductor.

El voltaje (E) es producido en dirección perpendicular al movimiento y al campo magnético.

Este medidor es muy confiable, la desviación en la exactitud es de $\pm 5\%$ del total de la escala, dependiendo de

la calibración y el equipo secundario. Puede ser utilizado en líquidos cuya conductividad sea mayor a 1 $\mu\text{mho/cm}$. En casos especiales se han utilizado líquidos con hasta 0.1 $\mu\text{mho/cm}$. Este rango cubre desde agua destilada de alta calidad hasta metales líquidos. La temperatura máxima de operación se encuentra al rededor de 350°C. Los voltajes de señal se encuentran desde unos cuantos microvolts hasta milivolts. En general, la impedancia en el medidor es de miles de ohms para la mayor parte de los líquidos de uso comercial. El voltaje producido es proporcional a la razón de flujo.

Es de esperar que la inducción del campo magnético consuma cantidades apreciables de energía eléctrica. Se logra un ahorro en energía si la alimentación a las bobinas no es continua, sino por pulsos.

2.4.4. Medidores de Ultrasonido

Existen dos tipos de medidores que operan bajo el principio del ultrasonido, los de efecto Doppler y los de tiempo de tránsito.

2.4.4.1. Medidores de Efecto Doppler

Estos instrumentos miden los cambios de frecuencia debido al flujo de líquidos.

En principio se componen de un emisor de ultrasonido y de un detector. El cambio entre la señal emitida y la señal detectada es proporcional a la velocidad de flujo.

Para lograr un funcionamiento adecuado de estos medidores, se requiere que el fluido tenga un mínimo de 25 ppm de partículas o burbujas de gas suspendidas (ver figura 2.4.1).

MEDIDOR DE EFECTO DOPPLER

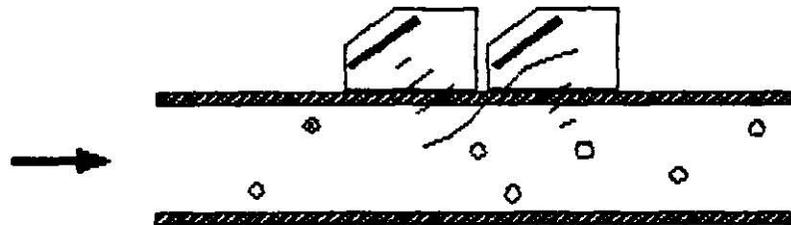


Fig. 2.4.1

2.4.4.2. Medidores de Tiempo de Viaje

Los medidores de tiempo de viaje o tiempo de tránsito tienen los transductores montados a ambos lados de la tubería. La configuración es tal que las ondas sonoras que viajan entre las unidades forman un ángulo de 45° con el flujo (ver figura 2.4.2). La velocidad de la señal que viaja entre los transductores aumenta o disminuye con la dirección de transmisión y la velocidad del líquido. Si la señal es transmitida en ambas direcciones de forma alternada se puede obtener una relación de tiempo diferencial proporcional a la razón de flujo.

Una limitante para el uso de este instrumento es la cantidad de partículas sólidas o burbujas de gas que puedan ser arrastradas por el líquido. Si el fluido contiene

demasiadas impurezas, éstas absorben al sonido, dejando una señal muy baja para el receptor.

MEDIDOR DE TIEMPO DE VIAJE

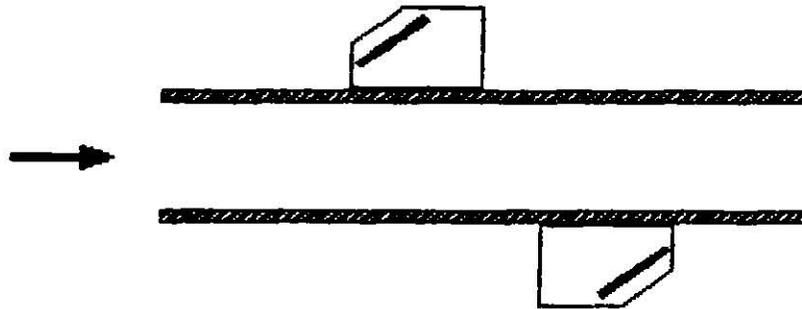


Fig. 2.4.2

2.4.5. Anemómetros

En líneas generales se puede decir que cualquier instrumento que sea capaz de medir la velocidad de un gas se denomina anemómetro. Sin embargo, este término se emplea en los siguientes instrumentos:

2.4.5.1. Anemómetro de Aletas

Este instrumento es un contador de revoluciones compuesto por cojinetes de piedras preciosas que son accionados por un molino de viento, el cual es construido con aletas.

2.4.5.2. Anemómetro Térmico

Este sistema consta de un filamento (de platino, por lo regular) eléctricamente calentado. La resistencia eléctrica

de un conductor depende de la temperatura a la que se encuentre éste. El gas pasa por la posición en la que se encuentra la resistencia, causando que esta disipe energía. Existen dos maneras de cuantificar el flujo:

- * Si se mantiene constante la corriente, un incremento en el flujo del gas provoca que el filamento disipe más energía y se enfríe, alterando su resistencia eléctrica.
- * Si se trabaja con resistencia constante, el efecto del fluido sobre el filamento se compensa con cantidad de corriente. es decir, al aumentar el flujo el filamento tiende a enfriarse y por lo tanto, a cambiar su resistencia. Un incremento en la potencia eléctrica provoca un aumento de temperatura que se traduce en un descenso en la resistencia.. Si ésta se mantiene constante, el cambio de velocidad de flujo de gas podrá cuantificarse mediante el cambio de corriente suministrada.

2.4.5.3. Anemómetro de Película Caliente

Si se desea medir flujos de líquidos, el anemómetro térmico es susceptible de llenarse de polvo o de cubrirse por burbujas de gas. Esto lo hace poco práctico y regularmente se lo utiliza solo con gases. Para trabajar con líquidos es más recomendable hacer uso del anemómetro de película caliente.

Este instrumento consta de una película de platino que se deposita en un sustrato de vidrio. Regularmente tiene forma

de cuña. El funcionamiento es muy similar al del anemómetro térmico.

Este instrumento puede ser usado en gases a bajas o altas velocidades, de hecho presenta mayor resistencia mecánica que el filamento.

2.4.5.4. Anemómetro de Termopar Calentado

El funcionamiento de este anemómetro se basa en el paso de la corriente de gas por las juntas calientes de una termopila que es alimentada por una entrada de energía eléctrica constante. La velocidad del gas se infiere del efecto de enfriamiento de las juntas calientes. Las juntas frías se mantienen a la temperatura del fluido para compensar el efecto de ésta.

2.4.5.5. Anemómetro Termistor

Este instrumento es muy útil en laboratorios y fábricas de sustancias de bajo volumen, como la industria farmacéutica.

El anemómetro termistor se compone de una perla recubierta de vidrio encerrada en una cámara tubular que forma un círculo. La entrada y salida del fluido se lleva a cabo de forma tangencial a la cámara.

Este medidor tiene capacidad para medir velocidades de flujo de hasta 0.003 pies/segundo de aire y hasta 0.0007 pies/segundo de agua (considerando que se trabaja con una

tubería de $\frac{1}{8}$ de pulgada obtendríamos un flujo de hasta 0.4 ml/min de líquido).

2.5.MEDIDORES DE MASA

2.5.1.Medidor de Coriolis

El medidor de coriolis mide la razón másica de flujo. Este tipo de medidores no requieren un ajuste según la variación de propiedades de los líquidos ni por los cambios de temperatura ni presión. El aparato brinda una señal lineal con respecto al cambio de masa. Se ha encontrado gran aplicación de este instrumento en líquidos cuya viscosidad varía al cambiar la velocidad a presiones y temperaturas dadas.

Existen varios diseños de medidores de coriolis. Un instrumento ampliamente usado consiste en un tubo en U instalado en el cuerpo. El tubo en U se pone a vibrar a su frecuencia natural, mediante fuerzas magnéticas (ver figura 2.5.1). La vibración cubre una distancia menor a 0.1 pulgada a una frecuencia de 80 Hz. El líquido entrante se opone a la vibración, al avanzar el fluido el

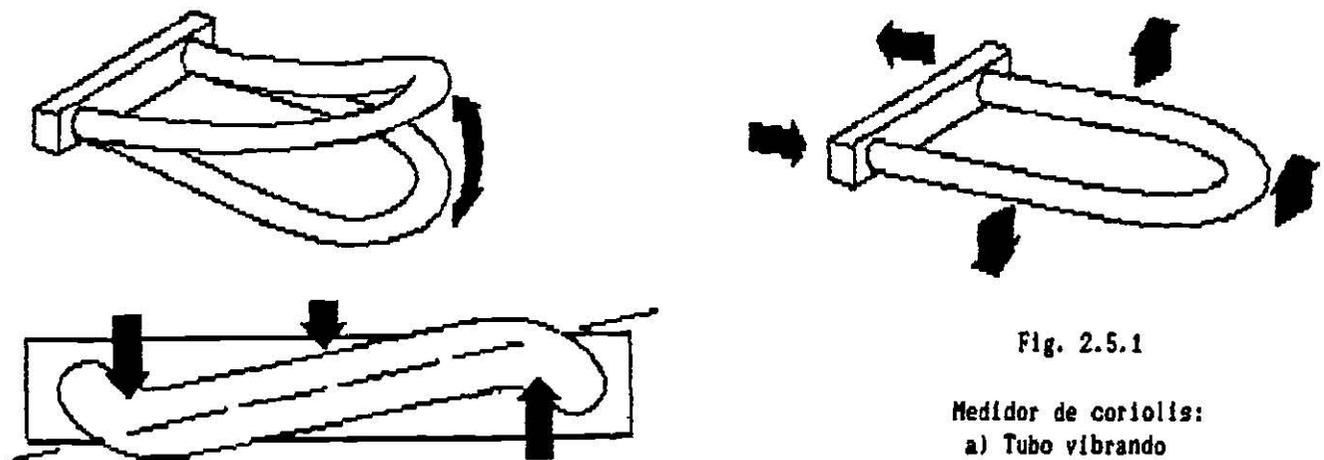


Fig. 2.5.1

Medidor de coriolis:
 a) Tubo vibrando
 b) Fuerzas del fluido
 c) Vista final del efecto

desplazamiento del tubo cambia de sentido, el líquido acelerado en el sentido anterior se opone nuevamente a este movimiento. Este estado de vibración y oposición al movimiento vertical causa que el tubo se tuerza ligeramente. La cantidad de torciones es directamente proporcional al flujo másico. Detectores de velocidad junto a ambos brazos de la U miden la variación en las torciones y emiten una señal que es convertida por un transductor a pulsos que luego son interpretados por un equipo secundario electrónico.

Este instrumento puede ser utilizado también con gases de viscosidad alta.

2.5.2. Medidor Térmico

Los medidores térmicos funcionan de forma independiente a la densidad, presión y viscosidad del fluido. Estos sistemas utilizan un sensor térmico, aislado del camino principal del flujo. Analicemos el funcionamiento de un medidor de este tipo, esquematizado en la figura 2.5.2:

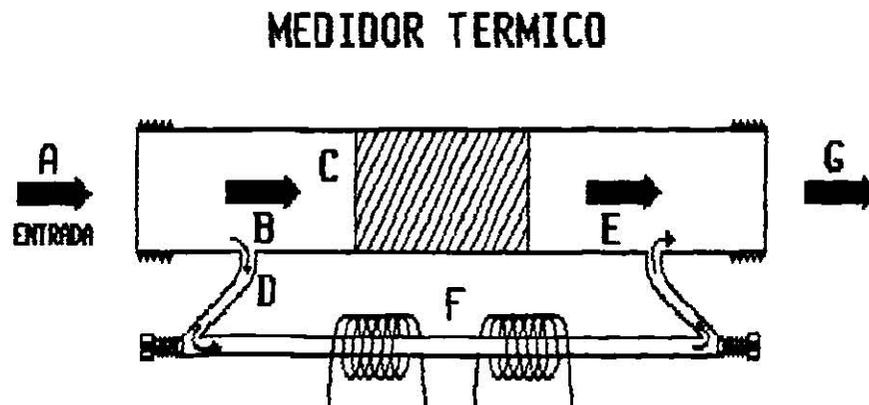


Fig. 2.5.2

El fluido entra por el extremo (A), en el punto (B) se divide en dos regiones de flujo. La primera (C), conduce a la mayor parte del fluido por una cámara que causa una caída de presión entre (C) y (E). Debido a la diferencia de presión, una porción pequeña de fluido se desvía por el tubo capilar (D). En el punto (F) se encuentran por lo menos dos resistencias. Una de ellas disipa energía que el fluido absorbe. La temperatura del fluido se detecta mediante la otra resistencia. Finalmente, las dos corrientes de fluido se juntan en la sección (E) para salir por (G).

El sistema electrónico incluye un analizador de flujo, un compensador de temperatura y un acondicionador de señal que provee una salida lineal proporcional al flujo másico.

3.ELEMENTOS SECUNDARIOS PARA MEDICION DE FLUJOS

Los elementos secundarios que se utilizan con los elementos primarios que se revisaron aquí, son menos numerosos, pues muchos de ellos pueden conectarse a unidades que trabajan con principios diferentes.

3.1.MEDIDORES DE PRESION

Muchos de los medidores primarios dan una señal de presión que debe ser interpretada externamente. La mayoría de los medidores de cabeza hacen uso de este tipo de elementos secundarios. Los medidores de escudo requieren de sistemas diferentes a los expuestos en esta sección (véase medidor de escudo). Los rotámetros ya tienen su escala integrada que puede interpretarse según la posición del flotador. Los rotámetros con tubo opaco o modificados para instrumentos externos, tampoco se tratarán en esta sección.

3.1.1.Elementos de 'Columna Líquida

Durante muchos años se han utilizado elementos de columna líquida para la medición de presiones. Estos elementos se basan en la diferencia de densidad de los diferentes fluidos. Típicamente se manejan los siguientes líquidos como base:

- a) Líquidos orgánicos. Su densidad es normalmente menor a la del agua.
- b) Agua.

- c) Grupo de compuestos de bromuro cuyas densidades están al rededor de 3 veces la del agua.
- e) Mercurio, cuya densidad es de 13.6 veces la del agua.

3.1.1.1. Medidor de Presión Absoluta

Este medidor es un tubo de vidrio en forma de U, cerrado en un extremo y abierto en el otro. En su interior se encuentra el líquido manométrico. En el extremo cerrado se tiene un vacío. El extremo abierto es el que se conecta al elemento primario. La presión absoluta se infiere por la diferencia de alturas en el nivel de líquido en ambos brazos del tubo en U.

3.1.1.2. Manómetro de Tubo en U

Es similar al instrumento anterior, pero con la diferencia que ambos extremos del tubo en U se encuentran abiertos. En este caso, en un extremo se conecta el elemento primario y el otro queda abierto a la atmósfera. En este caso es necesario considerar el efecto de la presión barométrica.

Este manómetro es muy útil para medición de presiones diferenciales, donde cada extremo es conectado a una toma de presión del elemento primario. Por ejemplo, cuando se desea obtener la diferencia de presión en un medidor de orificio, se conecta un extremo del tubo en U a la toma de presión corriente arriba y el otro extremo a la toma de presión corriente abajo. La diferencia de altura entre los

niveles de líquido en ambos brazos del tubo es una medida de la presión diferencial.

3.1.1.3. Manómetro de Pozo

El manómetro de pozo funciona bajo el mismo principio del manómetro de tubo en U. Es indudable que mientras más delgado sea el tubo que contiene al líquido, en un tubo en U, el líquido necesario para el buen funcionamiento del instrumento será menor. La diferencia de presión a medir es independiente del área transversal del tubo pero dependiente de la altura o diferencia de alturas de la columna líquida o columnas líquidas. Así, el manómetro de pozo consta de dos secciones abiertas, pero una de ellas tiene un área transversal muy grande y la otra es el clásico tubo de diámetro pequeño. El principio de funcionamiento es simple: Si la diferencia de área entre las dos secciones es grande (infinita, para efectos prácticos), el nivel en la sección de área mayor no se alterará o se alterará de forma imperceptible ante un cambio de presión, pero el nivel en el tubo de sección transversal menor se verá altamente influenciado. De esta manera, el tubo puede estar provisto de una escala que represente de forma directa el cambio de presión que se está midiendo.

3.1.1.4. Manómetro de Tubo Inclinado

Este instrumento no es más que un manómetro normal, ya sea de tubo en U o de pozo. El medidor de tubo en U tiene una inclinación de unos 45° que le permite expandir la escala en la que se vaya a leer la diferencia de alturas. El

manómetro de pozo presenta una inclinación en el tubo de menor sección transversal. Esta característica es importante si se busca emplear al medidor como sensor de pequeños cambios de presión, que difícilmente se podrían observar en los tubos verticales.

3.1.2. Medidores por Deformación

Estos instrumentos se basan en la propiedad elástica de algunos materiales, la deformación elástica del elemento sensor suele ser proporcional a la presión a medir.

3.1.2.1. Tubos de Bourdon

Los tubos de Bourdon son tubos huecos cerrados por un extremo y forman un arco. Al someter su interior a presión, el tubo tiende a desenrollarse y formar un tubo recto. El grado en que el tubo se enderese es una indicación de la presión a la que está sometido. Estos instrumentos suelen tener una aguja sujeta mediante algún mecanismo al tubo (véase medidores de carátula). La aguja gira al rededor de un eje y muestra en una escala el valor de la presión aplicada. Existen tubos de Bourdon en forma de C, espiral y helicoidal.

3.1.2.2. Diafragmas Metálicos

Los diafragmas son piezas metálicas que se suelen sujetar por los extremos o las orillas. La presión se ejerce en el centro del diafragma, con el fin de causar la mayor deformación posible. La deformación del diafragma es una medida de la presión aplicada. Es posible medir una presión

diferencial teniendo un solo diafragma como elemento sensor. Una de las caras recibe la influencia de una presión y la otra cara recibe la influencia de la presión contra la que se desea comparar la anterior. La deformación resultante en el diafragma será una medida de la presión diferencial.

3.1.2.3. Fuelles

Los fuelles operan de una forma muy similar a la de los diafragmas. La diferencia radica en que el fuelle presenta un mayor área de contacto y su movimiento puede ser considerablemente mayor que el del diafragma para una misma presión. Los fuelles presentan ventajas en la medición de presiones de diferentes magnitudes, hay fuelles capaces de medir bajas presiones y fuelles capaces de medir altas presiones. Estos últimos pueden estar provistos de un resorte que se oponga a la acción de la presión. También es posible configurar sistemas de dos fuelles para medir presiones diferenciales. (un ejemplo del uso de fuelles se ilustra en el apéndice A).

3.1.3. Celda de Presión Diferencial (D/P Cell)

Este aparato tiene dos entradas de señal, una de energía y una salida de señal para el controlador. La entrada de energía es una alimentación de aire comprimido, la presión a alimentar depende del aparato (normalmente unos 20 psig). Las entradas de señal son líneas directas del medidor primario (por ejemplo un medidor de orificio), la línea de salida conduce aire a 15 psig. máximo. La diferencia de

presión entre las tomas se traduce en movimiento en un sistema boquilla-aleta. La presión resultante en la boquilla es la señal de salida de la celda. (Para mayor información sobre el funcionamiento de la D/P Cell, véase el apéndice C).

3.2.MEDIDORES DE CARATULA

Los medidores de carátula son los sistemas clásicos de representación de presiones y flujos. En términos generales, se componen de un disco blanco con las escalas impresas y una aguja que señala con su posición el valor de la lectura. El mecanismo que mueve a dicha aguja puede estar integrado por engranes, un tacómetro mecánico o una simple espiral (como es el caso de los termómetros bimetalicos y los tubos de Bourdon). Los medidores clásicos como los de turbina y los de desplazamiento positivo hacen uso de medidores de carátula mediante un tacómetro mecánico. En los casos en los que se implemente un sistema de control neumático el tacómetro puede estar conectado a un transductor que convierta la señal mecánica a señal neumática.

3.3.ELEMENTOS SECUNDARIOS DE SEÑAL ELECTRONICA

3.3.1.Sensores Magnéticos

Los sensores magnéticos son los más ampliamente usados en sistemas de turbinas y medidores de paletas.

El sensor se compone de un magneto permanente al que se le coloca una bobina de alambre de cobre con capa de laca. Este sensor se encuentra instalado de forma perpendicular al flujo del líquido, sobre la posición de la turbina o de las paletas. El material del cuerpo del medidor debe ser no magnético. Las paletas o turbina deben ser de material ferromagnético. Al pasar una paleta o aspa frente al magneto, el campo magnético presente varía de forma tal que se induce una cantidad de energía eléctrica en la bobina. Con el continuo paso de las paletas o aspas, la bobina envía un tren de pulsos que son medida exacta del número de pasos del elemento metálico. Como la rotación de la turbina tiene una relación directa y lineal con el flujo del líquido, el número de pulsos tendrá a su vez una relación directa con el flujo. La bobina puede ir conectada a un sistema de pantalla digital que comparando la frecuencia del tren de pulsos con el tiempo dé como resultado un flujo o velocidad de flujo, o puede ir conectada a un controlador digital o inclusive a una computadora.

3.3.2.Sensores Piezoeléctricos

Los sensores piezoeléctricos se utilizan típicamente en los medidores de flujo de vórtice. Particularmente en los medidores diseñados para cuantificar velocidades de flujo de líquidos.

Estos sensores tienen, como parte fundamental, un cristal de efecto piezoeléctrico que se encuentra en el interior del medidor de vórtice muy próximo a la sección donde se produce el mayor efecto de los remolinos. Como los remolinos se presentan de forma alternada, cualquier sólido flexible, fijo en sus extremos a las paredes del medidor, presentará deformaciones, perpendicularmente al flujo. Esta vibración se presentará a una frecuencia que depende de la velocidad del flujo. El cristal piezoeléctrico se encuentra localizado en una posición tal que 'siente' el efecto de los vórtices y traduce la vibración en pulsos eléctricos. Estos son amplificados posteriormente para luego ser transmitidos a una pantalla que muestre un valor de flujo o velocidad o ser transmitidos a un controlador electrónico o una computadora.

3.3.3. Sensores de Tensión

Los sensores de tensión, mejor conocidos por su nombre en inglés como Strain Gages tienen gran aplicación como sensores de presión y por lo tanto como elementos secundarios para la medición de flujos.

Los sensores de tensión tienen la característica de cambiar su resistencia eléctrica con la deformación. La relación entre deformación y resistencia eléctrica es lineal (véase sensores de tensión en el apéndice B).

A la salida de las tomas de presión piezométricas de un elemento primario se conecta un tubo flexible que sirva como transmisor de presión. Este tubo bien puede ir conectado a un manómetro de tubo en U. En este caso, en lugar de conectarlo a un tubo en U se conecta en un elemento cuya entrada es similar a una toma piezométrica. El elemento tiene, en su interior, una membrana perpendicular al tubo de entrada. En una cara de la membrana se encuentra un sensor de tensión. La cara opuesta a la que recibe la señal del elemento primario puede estar sometida a vacío, a la presión atmosférica o a otra toma de presión (si se desea medir una presión diferencial). El medidor de tensión medirá la deformación que sufre la membrana, variando su propia resistencia eléctrica. La variación de resistencia eléctrica puede ser medida por un sistema de pantalla que la traduzca en velocidad o flujo. También en este caso es posible transmitir el dato a un controlador electrónico o a una computadora.

4. ANALISIS DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS MEDIDORES.

4.1.LOS MEDIDORES Y SUS CARACTERISTICAS

En la tabla 4.1 se presenta un resumen de las características más importantes de 22 de los medidores más conocidos. En esta tabla se toman en cuenta los tipos de señal que emiten los sensores y su adaptabilidad a equipo electrónico, si es que el elemento no emite señal electrónica. También se toma en cuenta si el medidor puede utilizarse como medidor de campo o no (un medidor muy voluminoso o difícil de instalar sería inconveniente para mediciones esporádicas, más aún si es caro).

La tabla 4.2 es igual que la anterior, con la diferencia que se utilizaron valores del 0 al 5 para una posterior evaluación. Los valores se refieren a lo ventajoso de cada característica, siendo 5 la mayor cifra alcanzable. En el caso de los costos, caída de presión, efecto de la viscosidad, número de Reynolds mínimo, distancia corriente arriba, precisión \pm y diámetro mínimo, los valores más altos en la tabla 4.1 corresponden a los más bajos a los más bajos en la tabla 4.2. La última línea de la tabla 4.2 se refiere a una ponderación relativa a cada característica. No tendrá la misma importancia hablar de la fácil instalación de un instrumento que de su costo de mantenimiento o de la facilidad de reemplazo. Al lado derecho de la tabla 4.2 se observan dos columnas nuevas, las cuales contienen:

- * La primera.- La suma de los valores de cada casilla multiplicados por la ponderación correspondiente.

- * La segunda.- El porcentaje de la puntuación acumulada en la columna anterior en relación al máximo puntaje alcanzable si un medidor hipotético tubiera 5 en todas las columnas de la tabla 4.2.

Se elaboraron tablas similares para los casos en que:

- a.) Se evalúe cada medidor de la manera tradicional, es decir, sin considerar equipo secundario electrónico. También se eliminan las restricciones de espacio (distancia corriente arriba), la relación flujo-senal, el rango y si maneja fluidos corrosivos. A esta tabla denominaremos "tabla corta" en el presente trabajo.
- b.) Se evalúe la tabla corta con un visible incremento en los costos (ponderaciones de 30, 14 y 50 para precio, costo de instalación y costo de mantenimiento, respectivamente).
- c.) Se evalúe la tabla corta con todas las ponderaciones iguales (valores = 10).
- d.) Se evalúe la tabla completa con costos elevados (igual que en el punto b.).
- e.) Se evalúe la tabla completa con ponderaciones = 10 (igual que en el punto c.).

Los resultados de los porcentajes finales en estas tablas se muestran en las gráficas 4.1 a 4.5.

TABLAS 4.1 Y 4.2

SIMBOLOS DE LA TABLA 4.1

SIMBOLOS GENERALES

S>i

N>o

A>lto

B>ajo

M>edio

C>omplejo

N/D = No disponible

SIMBOLOS PARA LA COLUMNA "Tipo de señal"

P>resión

M>ecánica (mediante engranajes y/o palancas)

V>isual

E>léctrica o electrónica

SIMBOLOS PARA LA COLUMNA "Relación flujo-señal"

R>aíz cuadrada (o cuadrática)

L>ineal

SIMBOLOS DE LA COLUMNA "Precisión % ±"

E>scala completa

R>ango de operación

*1 Se refiere a la adaptabilidad del medidor a emisor de señal electrónica. Si el medidor originalmente emite señal electrónica, se le asigna una A.

TABLA 4.1

Fácil instalación
 Fácil reemplazo
 Medidor de campo
 Diámetro mínimo
 Diámetro máximo
 Señal electrónica *1
 Tipo de señal
 Relación flujo - señal
 Rango
 Precisión % ±
 Dist. Corriente arriba.
 (en diámetros de tubería)
 Flujos bajos
 Flujos altos
 Fluidos sucios
 Fluidos corrosivos
 Caída de presión
 Efecto de viscosidad
 Número de Reynolds
 Precio
 Costo instalación
 Costo de mantenimiento

Tipo de medidor	S	S	N	1	A	A	P	R	4:1	2-4 E	10-30	M	S	B	N	M	A	> 30E3	B	M-A	M
Orificio	S	S	N	1	A	A	P	R	4:1	2-4 E	10-30	M	S	B	N	M	A	> 30E3	B	M-A	M
Venturi	M	M	N	2	A	A	P	R	4:1	1 E	5-20	N	S	A	M	B	A	>100E3	M	M	B
Pitot	S	S	S	S	A	A	P	R	3:1	3-5 E	20-30	N	S	N	M	B	B	>100E3	B	M	M
Annubar	S	S	S	0.5	72	A	P	R	16:1	1 E	7-25	M	S	M	M	B	B	> 50E3	B	B	B
Codo	S	M	N	0.2	A	A	P	R	3:1	6-10 E	25-30	N	S	A	S	N	B	N/D	B	B	B
Boquilla	M	M	N	2	A	A	P	R	4:1	1-2 E	20-30	N	S	A	M	M	A	> 75E3	M	M	B
De escudo	M	N	N	0.4	A	C	M	R	10:1	1-5 E	10-30	S	S	S	M	M	M	>100	B-M	B	M
Rotámetro	M	M	N	0.2	3	C	V	L	10:1	1-10 E	0	S	S	M	M	M	M	-----	B	B	B
Tapón cónico	M	M	N	0.2	3	M	V	L	10:1	1-10 E	0	S	S	M	M	M	M-A	-----	B	B	B
Pistón	N	M	N	1	4	M	V	L	10-04:1	0.25 E	10	M	S	N	M	M	M-A	N/D	B	B	B
Pistón oscilante	N	M	N	0.5	A	M	M	L	20-10:1	0.2 E	0	M	S	N	S	A	A	N/D	M-A	A	A
Disco nutante	M	M	N	0.5	A	M	M	L	50-20:1	0.5 R	0	S	S	N	S	M-A	A	N/D	M	M	M
Impulsor lobulado	M	M	N	1.6	24	M	M	L	20-10:1	0.2 E	0	N	S	N	S	B-M	A	N/D	M-A	A	M
Rotativos	M	M	N	1	16	M	M	L	A	0.5 E	0	S	S	M	M	B-M	A	N/D	M	M	M-A
Turbinas	M	M	N	0.2	A	A	M	L	20-10:1	0.25 R	10-20	N	S	M	M	A	B	> 15E3	M-A	M	M
Paletas	S	S	S	0.2	3	A	M	L	20-10:1	1-2 E	10-20	N	S	N	M	B-M	B	> 15E3	B-M	B	B-M
Vórtice	M	S	N	0.5	8	S	E	L	20-10:1	1 R	10-20	N	S	A	M	B-M	M	> 10E3	M-A	B-M	M
Electromagnéticos	N	M	N	0.1	A	S	E	L	40-10:1	0.5 R	5	S	S	S	S	N	N	-----	A	A	M
De efecto doppler	S	S	S	0.2	A	S	E	L	10:1	5 R	5-30	S	S	S	S	N	N	-----	M-A	B	B
De tiempo de viaje	S	S	S	0.2	A	S	E	L	20-10:1	1-5 E	5-30	S	S	M	S	N	N	-----	M-A	B	B
De coriolis	N	B	N	B	6	S	E	L	25-10:1	0.4 R	0	S	S	S	M	B-M	N	-----	A	A	B-M
Térmicos	N	B	N	0.1	0.3	S	E	L	10:1	0.4 R	0	M	S	N	N	B	N	N/D	M-A	M-A	M

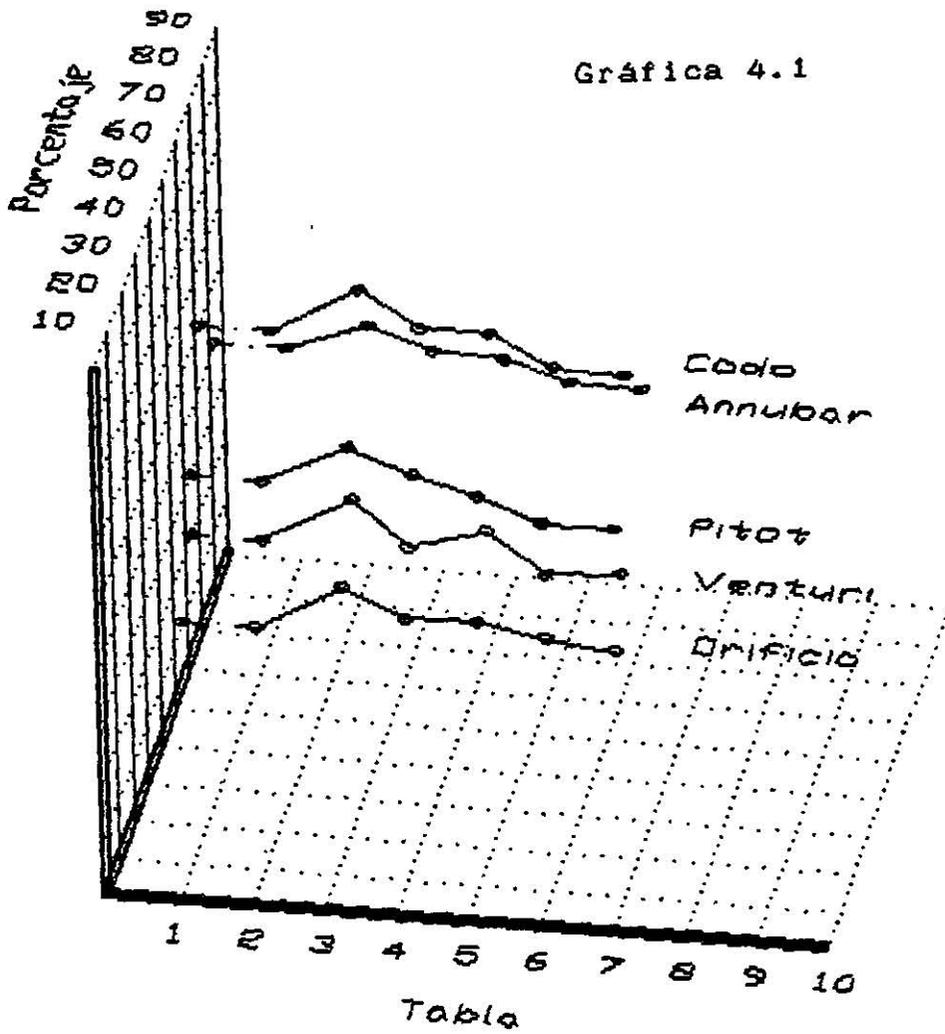
TABLA 4.2

Fácil instalación
 Fácil reemplazo
 Medidor de campo
 Diámetro mínimo
 Diámetro máximo
 Señal electrónica *1
 Tipo de señal
 Rango
 Precisión % ±
 Dist. Corriente arriba.
 (en diámetros de tubería)
 Flujos bajos
 Flujos altos
 Fluidos sucios
 Fluidos corrosivos
 Caída de presión
 Efecto de viscosidad
 Número de Reynolds mínimo
 Precio
 Costo instalación
 Costo de mantenimiento

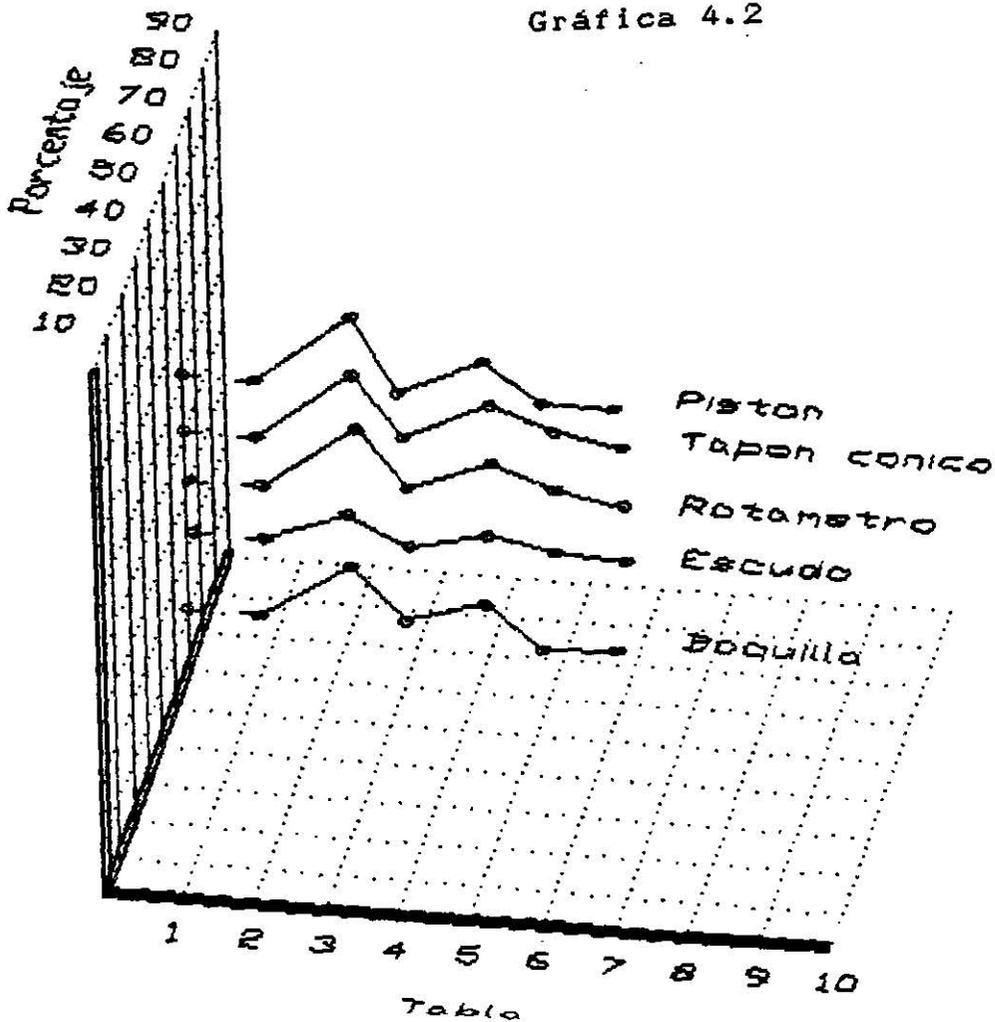
Tipo de medidor																				PUNTAJE	PORCENTAJE	
Orificio	5	5	1	3.33	5	4	2.5	0.36	2	1.67	3	5	2	1	2	0	4	5	2	4	443.72	58
Venturi	3	3	1	1.67	5	4	2.5	0.36	4	2.92	1	5	4	3	4	0	1.67	4	4	5	480.46	62.81
Pitot	5	5	5	0	5	4	2.5	0	1	0.89	1	5	1	3	4	4	1.67	5	4	4	451.84	59.06
Annubar	5	5	5	4.17	5	4	2.5	4.64	4	2.33	3	5	3	3	4	4	3.33	5	5	5	617.58	80.73
Codo	5	3	1	4.58	5	4	2.5	0	0	0.42	1	5	4	5	5	4	2.5	5	5	5	528.34	69.06
Boquilla	3	3	1	1.67	5	4	2.5	0.36	3.5	0.89	1	5	4	3	2	0	2.5	4	4	5	447.04	58.44
De escudo	3	1	1	4.33	5	2	2.5	2.5	2	1.67	5	5	5	3	2	2	5	4	5	4	508.84	66.25
Rotámetro	3	3	1	4.58	0	2	5	2.5	0	5	5	5	3	3	2	2	5	5	5	5	601.48	65.55
Tapón cónico	3	3	1	4.58	0	3	5	2.5	0	5	5	5	3	3	2	1	5	5	5	5	601.48	65.55
Pistón	1	3	1	3.33	0.24	3	5	1.43	4.75	3.33	3	5	1	3	2	1	2.5	5	5	5	482.72	60.49
Pistón oscilante	1	3	1	4.17	5	3	5	4.29	4.8	5	3	5	1	5	0	0	2.5	2	0	0	430.34	56.25
Disco nutante	3	3	1	4.17	5	3	5	5	4.75	5	5	5	1	5	1	0	2.5	4	4	4	541.52	70.79
Impulsor lobulado	3	3	1	2.5	5	3	5	4.29	4.8	5	1	5	1	5	3	0	2.5	2	0	4	486.32	63.57
Rotativos	3	3	1	3.33	3.1	3	5	5	4.5	5	5	5	1	3	3	0	2.5	4	4	2	600.88	66.47
Turbinas	3	3	1	4.58	5	4	5	4.29	4.52	2.5	1	5	1	3	0	4	4.5	2	4	4	528	69.02
Paletas	5	5	5	4.58	0	4	5	4.29	3.5	2.5	1	5	1	3	3	4	4.5	4	5	4	643.8	71.08
Vórtice	3	5	1	4.17	1.19	5	5	4.29	4.15	2.5	1	5	4	3	3	2	4.87	2	4	4	552.25	72.19
Electromagnéticos	1	3	1	4.83	5	5	5	5	4.75	4.17	5	5	5	5	5	5	5	0	0	4	651.84	85.21
De efecto doppler	5	5	5	4.58	5	5	5	2.5	1.25	2.08	5	5	5	5	5	5	5	2	5	5	663.62	86.76
De tiempo de viaje	5	5	5	4.58	5	5	5	4.29	2	2.08	5	5	1	5	5	5	5	2	5	5	649.44	84.89
De coriolis	1	2	1	5	0.71	5	5	5	4.8	5	5	5	5	3	3	5	5	0	0	4	577.39	75.48
Térmicos	1	2	1	4.79	0	5	5	2.5	3.55	5	3	5	1	1	4	5	2.5	2	2	4	486.24	63.56
PONDERACION	3	8	0	6	9	10	7	8	10	8	5	9	9	8	10	10	10	6	7	10	663.62	86.75

GRAFICAS 4.1 A 4.5

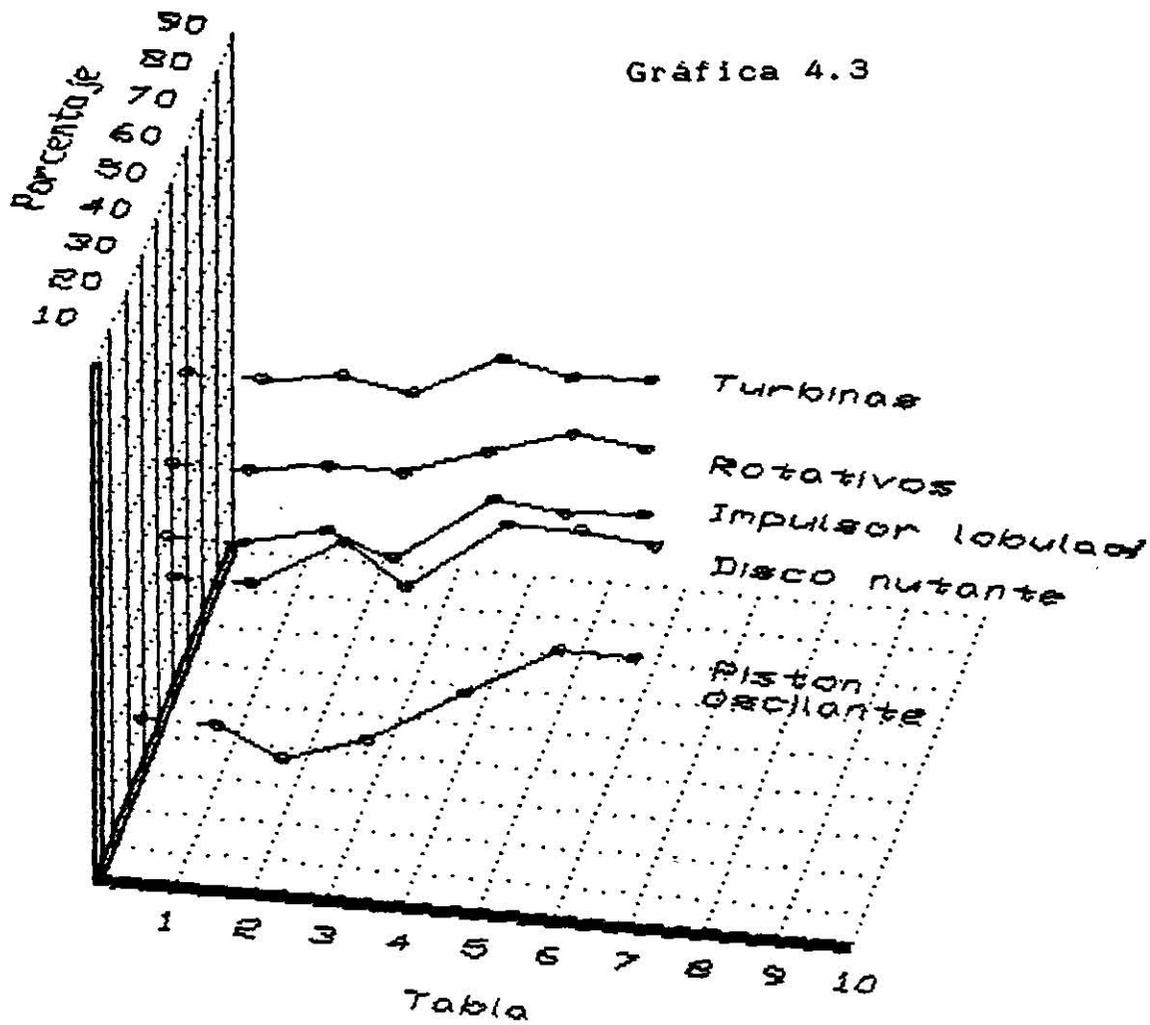
Gráfica 4.1



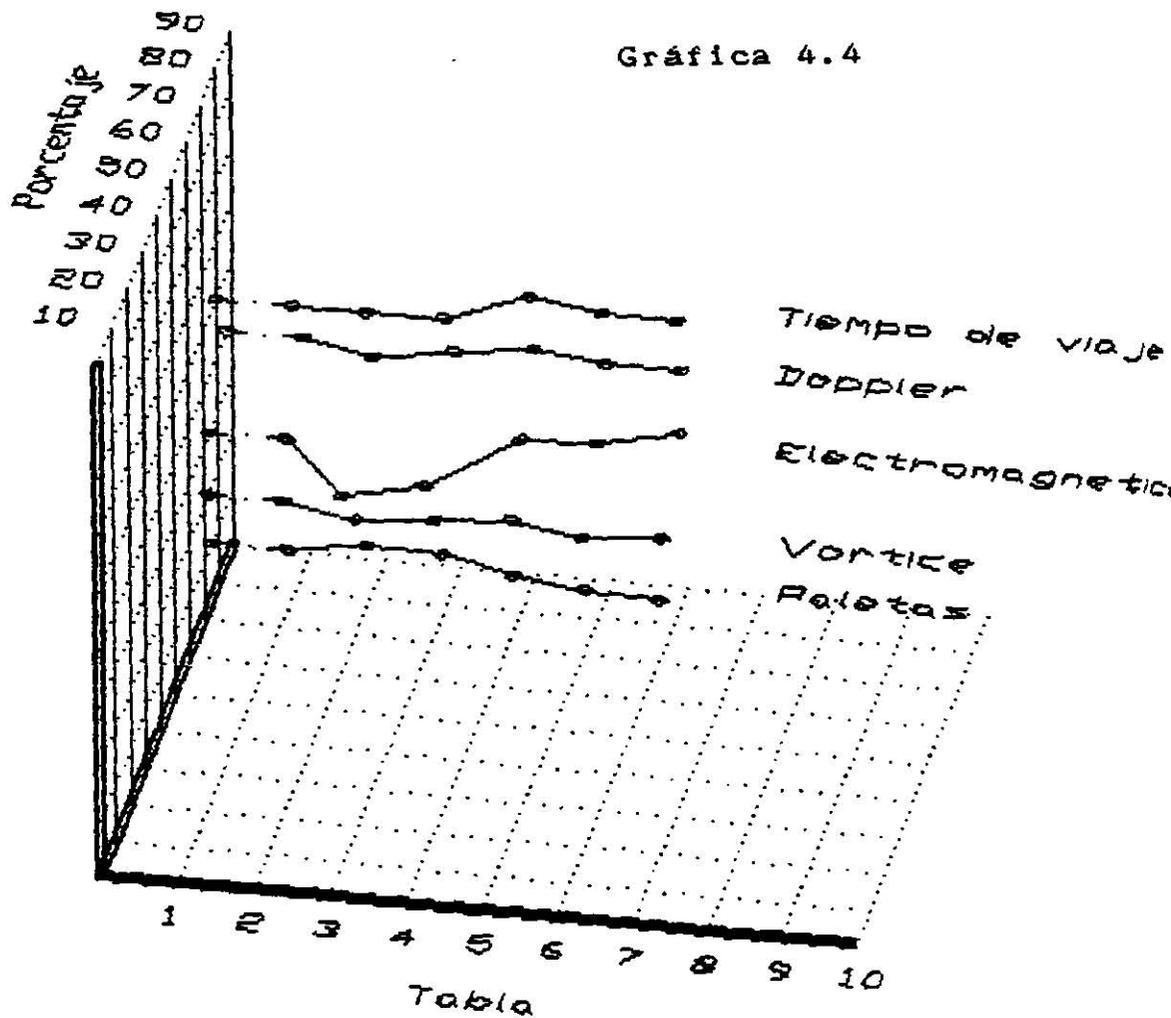
Gráfica 4.2



Gráfica 4.3



Gráfica 4.4



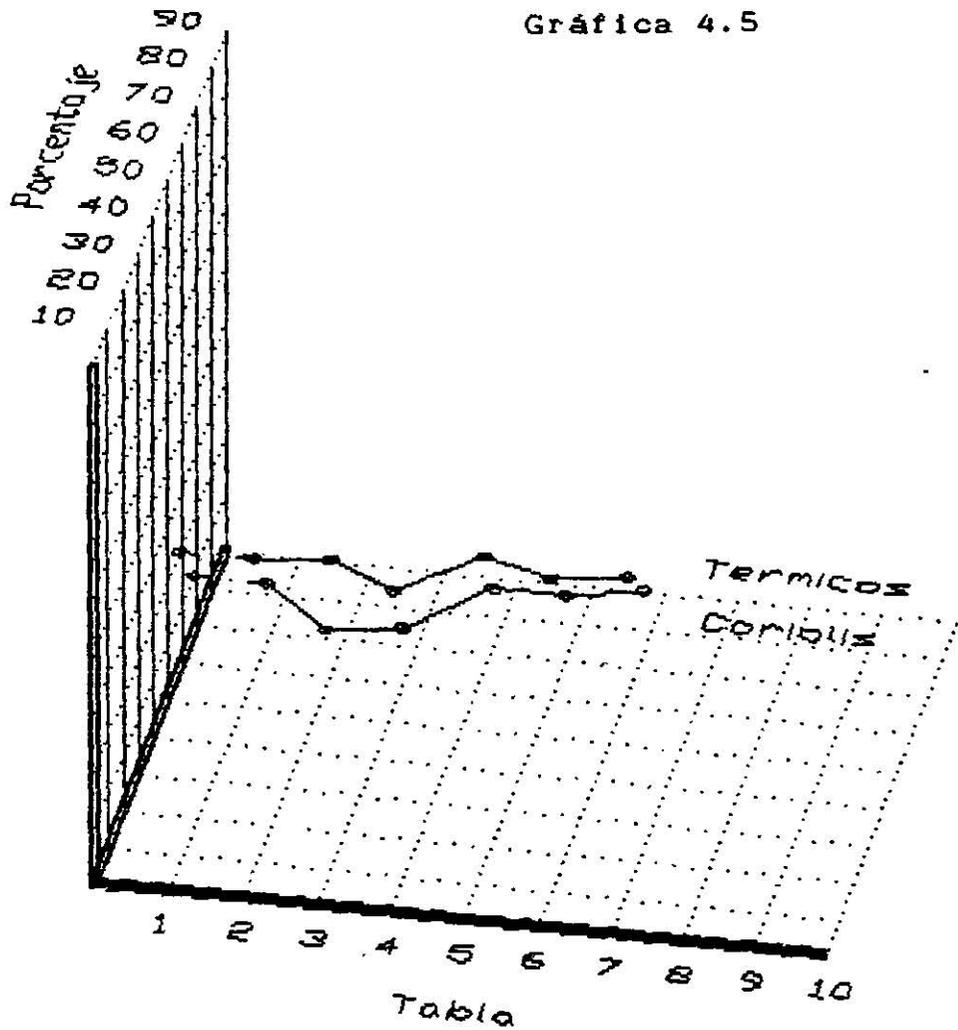


TABLA 4.3

TIPO DE MEDIDOR	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5	T 6
Orificio	57.11	68.96	62	62.52	59.85	58
Venturi	64.51	76.84	65.34	71.03	61.18	62.81
Pitot	64.75	74.9	69.34	64.69	58.95	59.06
Annubar	84.41	91.6	86.66	85.55	81.02	80.73
Codo	73.49	85.71	77	76.8	69.47	69.06
Boquilla	60.48	74.68	62	67.75	57.22	58.44
De escudo	65.3	72.99	66	70.36	67.37	66.25
Rotametro	63.86	80.52	66	74.16	68.51	65.55
Tapon cónico	61.45	79.22	64	74.16	68.51	65.55
Pistón	61.08	79.03	60.5	70.36	60.61	60.49
Pistón oscilante	29.16	21.95	28.6	42.97	56.59	56.25
Disco nutante	52.17	65	54.5	73.09	73.07	70.79
Impulsor lobulado	47.47	52.6	46.6	64.15	62.2	63.57
Rotativos	51.57	54.29	54	61.26	67.82	65.47
Turbinas	60.77	63.4	60.04	70.98	67.78	69.02
Paletas	75.42	78.44	78	74	71.97	71.08
Vortice	73.06	70.03	71.64	73.36	70.49	72.19
Electromagnéticos	74.58	60.97	65.5	79.59	80.79	85.21
De ef. Doppler	86.63	83.44	86.5	88.88	86.75	86.75
De t. de viaje	79.76	79.74	80	87.49	85.21	84.89
De coriolis	67.95	57.4	59.6	72.29	72.12	75.48
Termicos	58.92	60.58	54.1	65.51	61.41	63.56

4.2.ANALISIS DE LAS GRAFICAS

- a.) En los medidores de cabeza (exceptuando Annubar), la evaluación relativa muestra valores al rededor del 60% (58 a 66%), si se toma en cuenta una ponderación particular a cada característica. Si la ponderación de los costos aumenta, estos medidores aumentan sus porcentajes hasta el 80%, en algunos casos. Sus valores, considerando los costos como elementos principales, se ven favorablemente influenciados en mayor grado en las evaluaciones de la tabla corta. Un caso excepcional es el medidor de codo cuyos porcentajes se encuentran entre el 69 y el 86%. Aparentemente, el medidor de codo podría ser un instrumento barato y funcional. Esta aseveración es correcta si no se requiere de mucha precisión en las lecturas de flujo.

El medidor de tipo Annubar, de reciente desarrollo, presenta los porcentajes más altos entre los medidores de cabeza y está entre los cuatro mejores en todas las evaluaciones efectuadas. En dos tablas (incluyendo la corta con costos elevados) se presenta como la mejor alternativa. Este aparato presenta la peculiaridad de poderse utilizar tanto como medidor fijo, como como medidor de campo. En la tabla completa ostenta un cuarto lugar después de los ultrasónicos y el electromagnético.

- b.) El medidor de pistón oscilante resulta poco práctico, a juzgar por los porcentajes obtenidos en la tabla corta

(22 a 29%). Su fácil adaptabilidad a equipo electrónico y la versatilidad de los materiales en que se construye, hacen que este medidor repunte un poco en la tabla completa, pero aún así, con un 56% solo se aproxima a los valores obtenidos por los medidores de cabeza en sus puntos más bajos.

- c.) Los medidores de desplazamiento positivo (incluyendo turbinas) se ven favorablemente influenciados por los costos, aunque en menor medida que los de cabeza. Los porcentajes de estos medidores en la tabla completa son mayores, lo cual significa que si bien algunos son voluminosos, son fácilmente adaptables a equipo electrónico. Los más recomendables de este grupo son (a juzgar por sus valores) el disco nutante (medidor voluminoso) y el medidor de turbina.
- d.) Los medidores que presentan menor variación en sus porcentajes pese a los cambios de ponderación, son los medidores de velocidad. Exceptuando a los medidores electromagnéticos que se ven altamente influenciados por los costos (especialmente de operación), los demás medidores de velocidad presentan un comportamiento casi lineal a los cambios de ponderaciones y características. De hecho, los medidores ultrasónicos obtienen los mejores porcentajes en las tablas corta y completa. Solo en el caso de mayor valoración de los costos se ven superados por el medidor Annubar.
- e.) Entre los medidores de masa, el medidor térmico es influenciado positivamente por los costos, pero su diseño exclusivo para tuberías de diámetro pequeño

tiene muy limitado su uso (resulta práctico para laboratorios).

El contraste es el moderno medidor de coriolis que se vé negativamente influenciado por los costos, pero su versatilidad lo coloca en un quinto lugar en la tabla completa.

5.DISEÑO ESQUEMATIZADO DE MEDIDORES DE FLUJO DE LIQUIDOS

En la presente sección se propone la construcción de algunos medidores de flujo de líquidos que emitan una señal electrónica la cual pueda ser posteriormente interpretada por un elemento secundario electrónico.

La señal que emiten los medidores aquí propuestos es de algunos milivolts, por lo que puede ser necesario un amplificador intermedio. Algunos controladores electrónicos pueden interpretar directamente una señal de esas características.

Los medidores que se analizan a continuación son:

- * Medidores de presión para tomas piezométricas.
- * Medidor de vórtice para líquidos.
- * Medidor de turbina.
- * Medidor ultrasónico de tiempo de viaje.

5.1.MEDIDORES DE PRESION

Los medidores de flujo de mayor uso en nuestros días son los de cabeza, fundamentalmente por requerir poco equipo secundario (el cual es relativamente versátil), por ser de los más baratos y por cumplir en gran parte con las exigencias de los ingenieros de diseño.

Existen muchas compañías que fabrican medidores de orificio. Los medidores de codo sólo requieren de un taladro, un transportador y equipo para soldar. Sin embargo, los equipos secundarios regularmente son neumáticos y de importación en los países latinoamericanos. En la actualidad es posible encontrar sensores de presión que emiten señal electrónica.

En la presente sección sugiero un diseño de un sensor de presión diferencial que puede ser conectado a diversos medidores de cabeza de presión variable.

El sensor se compone de un cuerpo con forma de paralelepípedo rectangular, provisto de dos conexiones huecas con forma externa cónica y forma interna cilíndrica, fijas a dos caras paralelas opuestas. A un diafragma que tenga las medidas exactas de la cavidad interna del cuerpo del medidor, se le pega con resina elástica un elemento sensor de tensión. Posteriormente debe colocarse el diafragma en un horno por seis horas a 50°C para lograr el curado del adhesivo. Posteriormente, resulta conveniente poner un recubrimiento sobre el sensor de tensión. La resina que brinda protección puede requerir de un curado

entre 1 y 24 horas (regularmente son 24 horas a 24°C y/o 1 hr entre 50 y 95°C).

El siguiente paso consiste en soldar los cables a las terminales del sensor de tensión. Este diseño resulta mas versátil si se incluyen las resistencias que completan el puente de Wheatstone dentro del cuerpo. Finalmente se coloca el diafragma en posición en el interior del cuerpo del medidor de presión diferencial y se sella éste asegurándose que solo salgan los cables y que no existan fugas de gas (ver figura 5.1.1).

Para conocer la relación flujo-senñal, será necesario calibrar el medidor de flujo con todo y sensor de presión diferencial. Si se prefiere, se puede calibrar el sensor de presión diferencial a parte (de esta forma se puede conectar a cualquier otro medidor de cabeza ya calibrado o incluso puede ser utilizado como manómetro en otros equipos).

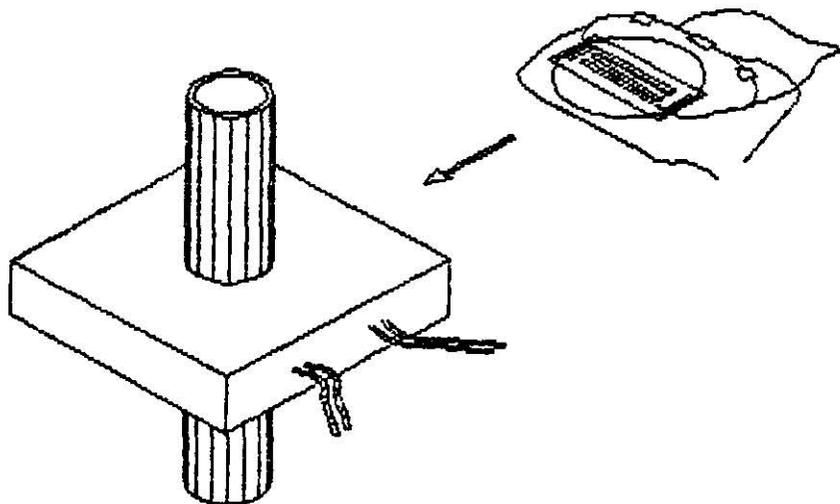


Fig. 5.1.1

Medidor de presión

5.2.MEDIDOR DE VORTICE

El medidor de vórtice es un instrumento de velocidad, cuya relación flujo-señal es lineal. La principal característica que pone en ventaja a este medidor es la baja desviación con la precisión en sus lecturas de flujo.

El diseño de un medidor de vórtice no parece presentar complicaciones. a continuación se plantea un modelo capaz de emitir pulsos que puedan ser interpretados por un elemento electrónico secundario.

Si se coloca verticalmente un mástil en cuya parte superior se fija un trozo rectangular de tela y se deja pasar una corriente de aire en sentido horizontal, la tela se colocará en el sentido del flujo de aire y comenzará a ondear (tómese como ejemplo el flamear de una bandera). Análogamente, si dentro de una tubería se fija por sus extremos superior e inferior un objeto cuya cara frontal (tomando como referencia un punto corriente arriba) tenga forma de un paralelogramo rectangular y el resto del cuerpo se extienda corriente abajo en forma de cuña o triángulo truncado, la sección más delgada recibirá el mayor efecto de los vórtices formados por el líquido. En tal posición se inserta un cristal de efecto piezoeléctrico que al ser comprimido y liberado repetidamente genera entre sus extremos una diferencia de potencial pulsátil que se transfiere mediante cables a la parte externa del medidor. Estos cables pueden conectarse a un elemento secundario capaz de amplificar e interpretar la señal.

5.3.MEDIDOR DE TURBINA

Un instrumento versátil para medir flujos y no más voluminoso que una T de tubería es el medidor de turbina. Los medidores de turbina son ampliamente usados en condiciones en las que los medidores de cabeza presentarían problemas. Las turbinas pueden trabajar con fluidos de viscosidad alta o de viscosidad variable sin verse sensiblemente afectadas. Además, la desviación de la precisión en las lecturas de flujo es menor en una turbina que en un medidor de cabeza clásico, lo cual hace a este medidor ideal para trabajar con fluidos caros. Sin embargo, su popularidad es bastante menor que la de un medidor de orificio, pues el medidor de turbina es bastante más caro y produce una caída de presión mayor.

A continuación se sugiere un diseño de un medidor de turbina para tubería de una pulgada.

5.3.0.1.Cuerpo del Medidor de Turbina

El cuerpo del medidor tiene forma de una T de tubería comercial, munida de seis estabilizadores de líneas de corriente que a su vez ofrecen soporte al portaeje. Este se encuentra dividido en dos partes, ambas provistas de un extremo roscado de menor diámetro que permite su sujeción al cuerpo por medio de tuercas. El eje (de menor diámetro) es la continuación de una de las partes del portaeje. El eje se inserta en una perforación que se encuentra en la segunda sección. Entre ambas secciones, fijas al eje, se encuentran los cojinetes que permiten la libre rotación de la turbina (ver figura 5.3.1).

DISEÑO DEL MEDIDOR DE TURBINA

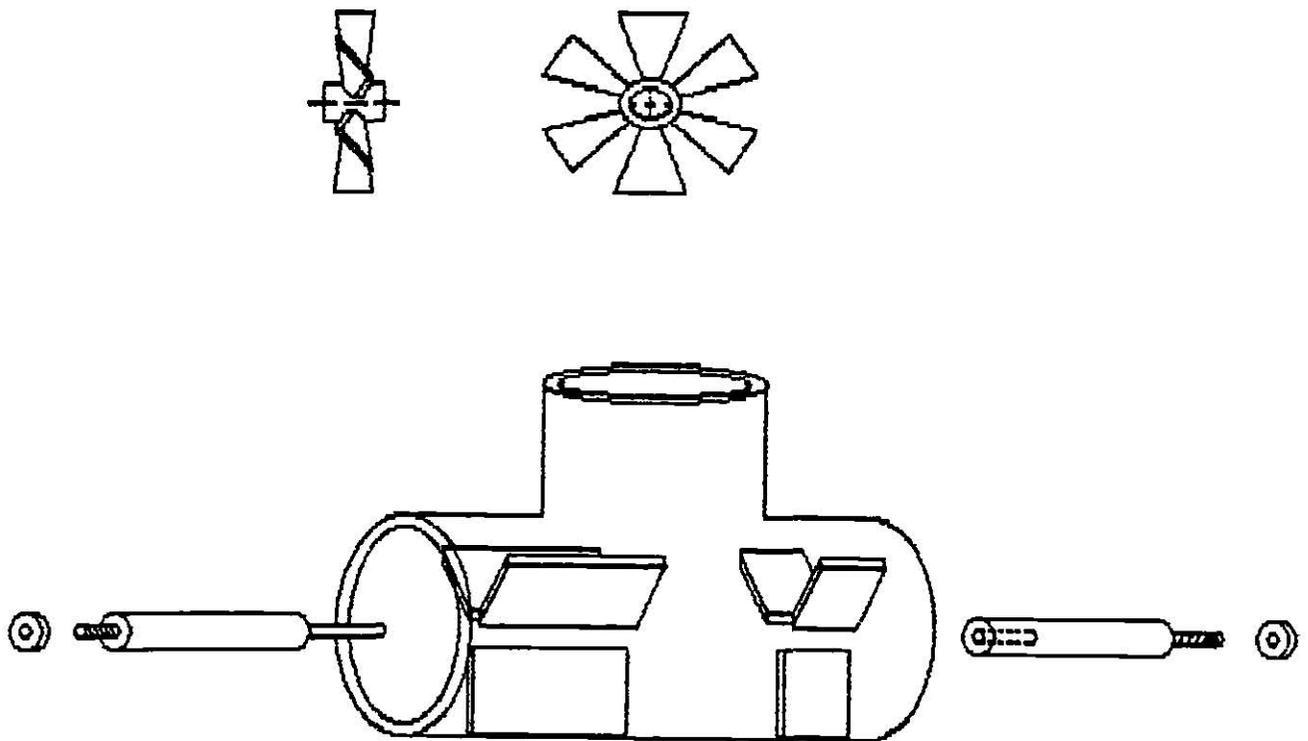


Fig. 5.3.1

5.3.0.2. La Turbina

La turbina se diseñó buscando la menor caída de presión posible en el fluido y la menor complejidad posible en su construcción. Así, se propone una obstrucción al paso de líquido debida a los álabes (en la región comprendida entre el portaeje y el cuerpo), de una tercera parte del área como máximo. Por razones de construcción y balanceo, cada álabe debe tener la mayor amplitud posible. Para lograr que las condiciones arriba mencionadas se cumplan, se propone un ángulo externo² de 40° y un ángulo interno de 60° con la perpendicular del eje para cada álabe. Un número adecuado de álabes es el de 6, de esta manera se mantiene un equilibrio de dos triángulos y se cumple con la condición de la amplitud.

A continuación se detallan los cálculos realizados para obtener las dimensiones de un álabe (ver figura 5.3.2).

Parte externa:

$$n = 6$$

$$\alpha = 40^\circ$$

$$r = 1.22 \text{ cm}$$

$$\text{Arc} = 2\pi r = 7.665$$

$$l = \text{Arc}/n = 1.278$$

$$d = l/3 = 0.64$$

$$a = d * \text{tg}(\alpha) = 0.536$$

$$t = \sqrt{a^2 + d^2} = 0.83$$

² Las denominaciones "ángulo interno" y "ángulo externo" se refieren a la posición de la cara anterior del álabe, relativa al eje en sentido radial.

Parte interna:

$$\begin{aligned}
 n &= 6 \\
 \alpha &= 60^\circ \\
 r &= 0.25 \text{ cm} \\
 \text{Arc} &= 2\pi r = 1.57 \\
 l &= \text{Arc}/n = 0.26 \\
 d &= l/3 = 0.013 \\
 a &= d * \text{tg}(\alpha) = 0.2267 \\
 t &= \sqrt{a^2 + d^2} = 0.26
 \end{aligned}$$

Las equivalencias a los símbolos arriba mencionados son:

- n = número de álabes.
- α = ángulo entre la perpendicular al eje y la sección del álabe en el plano externo o interno.
- r = radio interno o externo.
- Arc = perímetro de la circunferencia concéntrica al eje y de radio r.
- l = porción máxima de perímetro por álabe, suponiendo obstrucción completa al paso del fluido.
- d = porción efectiva de perímetro por álabe.
- a = proyección de la amplitud de un álabe sobre la dirección del eje.
- t = amplitud de un álabe.

DISEÑO DE UN ASPA

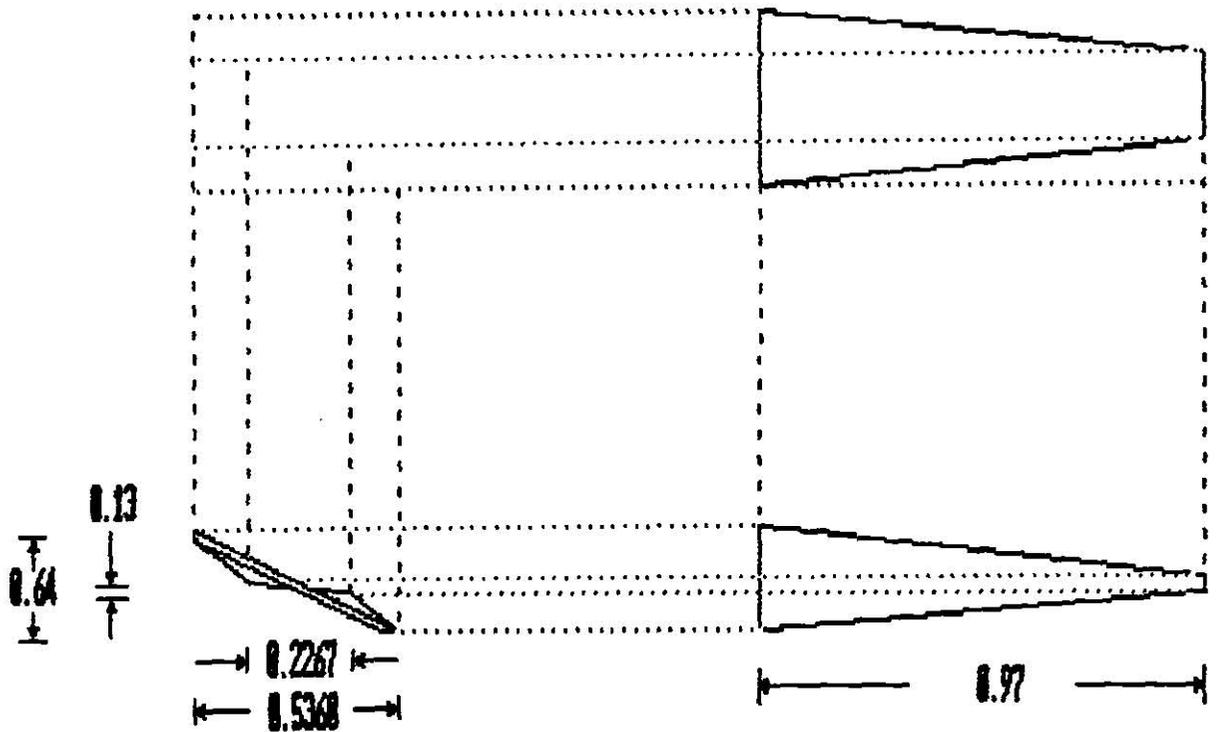


Fig. 5.3.2

DISEÑO DE LA TURBINA

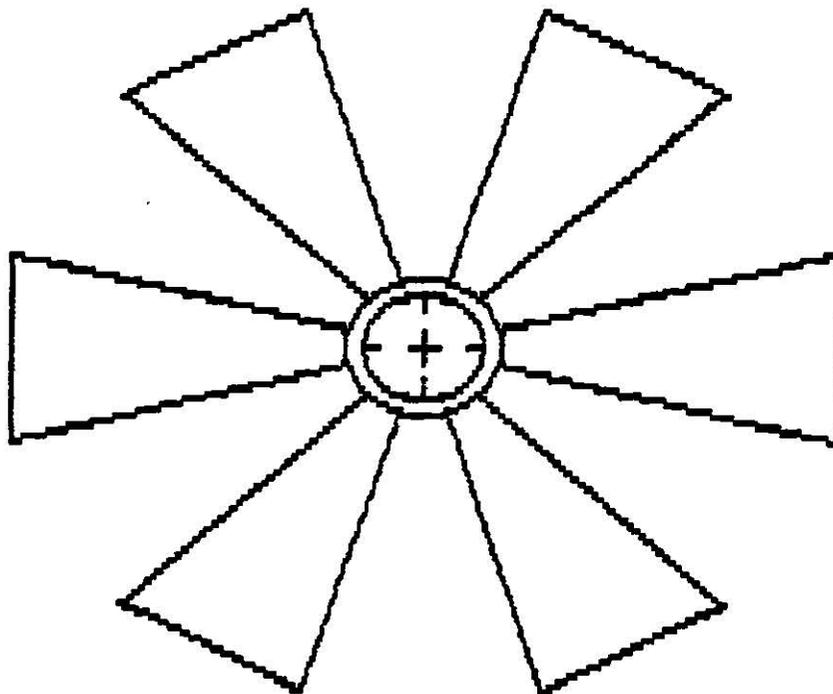
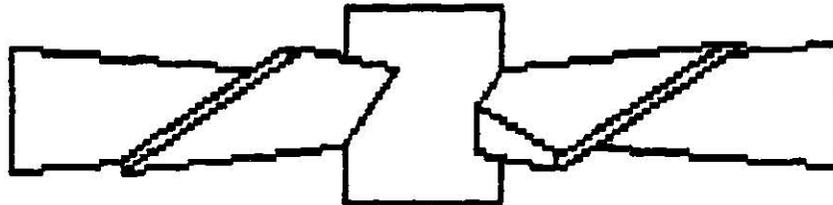


Fig. 5.3.3

Las dimensiones del cojinete de bolas que puede operar con esta turbina son las siguientes:

diámetro interno = 1.5 mm

diámetro externo = 4.0 mm

espesor (distancia entre caras) = 1.2 mm

Se recomienda el uso de dos cojinetes de este tipo.

5.3.0.3.El Emisor de Pulsos

Por la parte superior del cuerpo del medidor, se puede insertar un sensor de proximidad que emita un pulso cada vez que un álabe pase frente a él. Tal sensor de proximidad puede ser un dispositivo de efecto Hall, si el material de la turbina permite que ésta se magnetice y funcione como un imán permanente.

Un segundo tipo de sensor se compone de un imán permanente al rededor del cual se formó una bobina con alambre de cobre con capa de laca. Cuando un álabe (de material ferromagnético de baja fuerza coercitiva) pasa frente al sensor, el campo magnético externo sufre una alteración, cuando el álabe se aleja del campo magnético, este se restituye al rededor del sensor. Estos cambios en el campo magnético provocan se induzca una corriente eléctrica alterna cuya variación de frecuencia indicará la velocidad de flujo en el interior del medidor.

5.4.MEDIDORES ULTRASONICOS

La mayoría de los medidores que se revisaron en el presente trabajo causan interferencia al fluido. La respuesta de éste a tal perturbación permite al instrumento determinar las características del flujo. Sin embargo, existen algunos medidores que no interrumpen el paso del líquido. En algunos casos llegan a tocarlo (medidores electromagnéticos, térmicos) y en otros casos basta con aplicar los transductores a la superficie de la tubería. Hasta el momento de la elaboración del presente trabajo, sólo se conocen dos tipos de medidor de flujo capaces de detectar la velocidad de un líquido desde el exterior de la tubería. Estos sensores se denominan Medidor de Efecto Doppler y Medidor de Tiempo de Viaje. El principio de funcionamiento de ambos es muy similar. precisan de un emisor y de un receptor de ultrasonido, un circuito generador de pulsos y un seguidor de señal.

En términos generales, se denomina ultrasonido a aquel cuya frecuencia se encuentra entre $20 \cdot 10^3$ y $1 \cdot 10^9$. Si se coloca un emisor de sonido frente a un receptor, la calidad del sonido captado dependerá del medio que separe a emisor y receptor. En el caso de los medidores de ultrasonido, se busca emitir una señal tal que atravesase las paredes de la tubería y al fluido.

5.4.0.1. Medidor de tiempo de viaje

Aplicando las características del ultrasonido, se coloca un emisor en la parte superior de la tubería (llena de líquido sin fluir) y un receptor en la parte inferior, de esta

manera se obtiene la lectura de la distorsión de la señal por efecto del material de la tubería y del fluido. La diferencia entre la distorsión que se obtenga al efectuar una medición en la tubería por cuyo interior fluye el líquido y la que se obtuvo en la calibración, determina la velocidad de flujo.

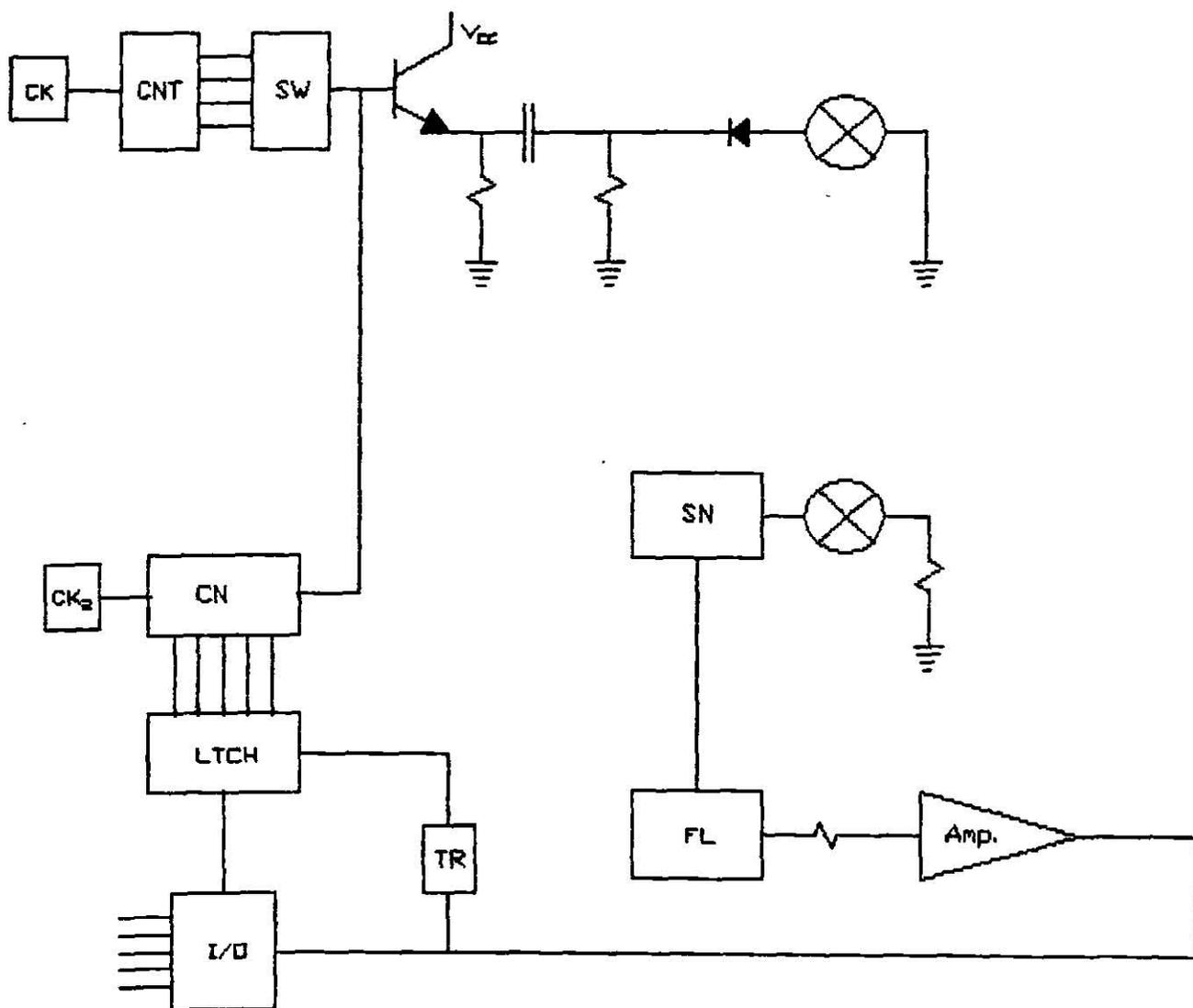


Fig. 5.4.1

El esquema de un medidor de tiempo de viaje (ver figura 5.4.1) incluye un generador de pulsos (CK), un divisor de señal (CNT), un selector (SW), un amplificador de voltaje y capacitores y resistencias. La salida de este circuito se conecta al transductor que convierte la energía eléctrica en sonido. El receptor se compone del transductor que convierte el sonido en señal electrónica, la cual se transfiere a un ajuste de sensibilidad (SN), un seguidor (FL) y un amplificador de señal (Amp.) para finalmente dirigirlo a una salida para equipo secundario (I/O). Para un mayor seguimiento de la señal de ultrasonido se plantea la instalación de un segundo generador de pulsos (CK₂), un contador (CN) y un acumulador de señal (LTCH) que reportará el tiempo de viaje del pulso.

6.CONCLUSIONES

La información aquí expuesta da una idea de la amplia gama de medidores de flujo que existe en el mercado.

La mayoría de los medidores clásicos pueden ser adaptados de manera que generen una señal electrónica. Tal adaptación es normalmente sencilla, debido a la versatilidad de los componentes electrónicos. Los medidores de reciente desarrollo ya se fabrican con emisores de pulsos u ondas eléctricas. Muchos sistemas que trabajan con señal electrónica pueden utilizarse como medidores de campo gracias a su tamaño pequeño, poco peso y precisión media a alta.

Comparativamente hablando, no es posible determinar qué medidor es mejor o peor que cual. En todo caso, las condiciones específicas de cada aplicación serán las determinantes para que un usuario pueda elegir de entre los distintos tipos de medidores. Aún así, entre los medidores de flujo de una misma clasificación existen diferencias que el ingeniero instrumentista o el ingeniero de diseño deberá tomar en cuenta. con la intención de guiar al lector a visualizar la información recopilada, fué necesario elaborar la tabla 4.1. Como aún así se aprecia que la información contenida es amplia, se vió la necesidad de generar la tabla 4.2 que contiene evaluaciones porcentuales generales. Para ampliar aún más el análisis, se elaboraron cinco variantes de la tabla 4.2, cuyos resultados, y los de la propia tabla 4.2, se graficaron en las figuras 4.1 a 4.5.

Finalmente, se propuso el diseño de cuatro medidores de flujo de líquidos que pueden ser desarrollados según las necesidades particulares de un usuario.

7.COMENTARIOS

Al iniciar el presente trabajo, la intención era investigar qué medidores de flujo de líquidos se pueden utilizar en diseños de equipos de proceso que puedan ser controlados por computadoras o controladores electrónicos. Uno de los mayores problemas para obtener información concreta sobre medidores modernos radica en que la mayor parte de los proveedores solo tienen oficinas en México D.F. y casi todos son representantes de compañías extranjeras (E.E.U.U. y Japón principalmente). Más aún, al hacer los diagramas de los medidores que podrían construirse, se puede apreciar que algunas piezas imprescindibles deben ser importadas. El ejemplo más claro se presenta en los cojinetes del medidor de turbina. Es casi imposible conseguir cojinetes diferentes a los automotrices o de maquinaria muy conocida (como lo son los tornos y taladros). Las piezas de precisión solo se pueden conseguir de importación y por lo regular las debe importar uno mismo. Se hizo una prueba construyendo un medidor de turbina similar al diseño propuesto en la sección 5.3. Los problemas que se tuvieron fueron, principalmente, conseguir los cojinetes y fabricar la turbina. Ningún taller de los visitados tenía equipo capaz de maquinar una turbina de una pulgada de diámetro exterior. Para buscar los diferentes talleres donde se podría encargar la manufactura de la pieza, se recurrió al directorio telefónico, la Cámara de la Industria de la Transformación y todas las referencias personales posibles. Solo en las industrias en las que se fabrican equipos que requieren de piezas de precisión, tienen equipo con la capacidad de producirlo. De esta manera, la fabricación de un prototipo representa un costo monetario elevado, pues ninguna empresa detendría su producción por una pieza de

muestra. La única posibilidad viable para quien deseara construir el medidor, sería encargar a un artesano la fabricación de un prototipo en madera o la elaboración del molde de la turbina, con la intención de vaciarla en acero posteriormente. Salvado este primer problema se tendría que buscar los cojinetes. En la sección 5.3. se recomienda un cojinete de bolas miniatura. Estos son relativamente baratos pero poco durables. En su lugar se pueden utilizar chumaceras, ya sea de carburo de tungsteno, materiales laminares (como el grafito y aleaciones que lo contienen), materiales autolubricantes (bronces y otras aleaciones).

Analizando la construcción de un medidor de vórtice, el mayor problema radica en conseguir el sensor de vórtices. Si deseamos hacer uso de un cristal de efecto piezoeléctrico, debe acudirse nuevamente a proveedores en el exterior. Ninguno de los proveedores locales consultados tenía conocimiento de lo que es un cristal de efecto piezoeléctrico. Inclusive en tiendas de material electrónico, donde se anuncian con carteles "Tweeters piezosensitivos", "micrófonos con cristales piezoeléctricos", solo se hace uso de los nombres como publicidad.

Si se buscan sensores de tensión (inclusive si se los pide por su nombre en inglés), tampoco se tiene mejor suerte. No hay necesidad de preguntar por disparadores de efecto Hall.

Esto nos lleva a una conclusión importante: No existen fabricantes locales de piezas especializadas que sirvan como materia prima para la construcción de equipo como el analizado en este trabajo. Por otra parte, si alguien

quisiera fabricar estas piezas, se encontraría con el grave problema de conseguir materias primas. Los países latinoamericanos dependen de la tecnología extranjera por falta de investigación científica.

En el presente trabajo no se hace un análisis del costo de fabricación de un medidor. El desarrollo completo de un proyecto de esa magnitud implicaría un reporte completo por sí solo, pues tendría que pensarse en la infraestructura necesaria para fabricar las piezas en serie. Además deben analizarse los conductos, condiciones y costos de importación de los elementos cuya tecnología aún no es asequible (por lo menos no fácilmente), como para fabricarlos.

APENDICE A

A.1.SISTEMA BOQUILLA-ALETA

Un sistema boquilla aleta típico opera a presiones de cerca de 20 psig. El flujo de aire pasa por la tubería de entrada a través de una resistencia hidráulica (capilar) hacia la boquilla. Una aleta de posición variable ofrece una determinada resistencia a la salida del aire, causando un incremento de presión en el interior de la boquilla. Si la aleta obstruye completamente a la boquilla, la presión en su interior será igual a la presión del aire alimentado al sistema completo (20 psig.). Si la aleta se aleja unas cuantas milésimas de pulgada de la boquilla, la presión tiende a un mínimo. En un rango de distancias de la aleta (aproximadamente de 0 a 2 milésimas), la reducción de presión es lineal. Es fácilmente observable que este sistema es muy sensible, para efectos prácticos. Para aprovechar de mejor manera este sistema, se lo utiliza en conjunción con uno o más fuelles, los cuales suelen estar provistos de resortes que tienden a mantenerlos en una posición estable determinada.

A.2.CONTROLADOR NEUMATICO PROPORCIONAL

El controlador neumático proporcional funciona con el principio del sistema boquilla-aleta.

Veamos la acción del sistema representado en la figura A.1:

La varilla (A) se encuentra conectada a una fuente de señal. La aguja (S) es la marca de referencia o Set Point para el controlador. El Set Point es colocado a un valor que se considere adecuado para el control de un sistema. Regularmente la escala del Set Point se encuentra graduada entre 0 y 100, siendo 0 el valor correspondiente a 0 psig. de presión de salida en la señal de control y 100 a la máxima presión posible a la salida (digamos 20 psig.). La señal en (A) debe mantener una posición de aleta en relación a la boquilla tal que se cumpla la presión establecida por el Set Point. Si la varilla se mueve, digamos a la derecha, desplaza a la aleta (B) hacia la derecha causando mayor flujo de aire por la boquilla (C). La caída de presión hace que el fuelle (D) se contraiga obligando por lo tanto a la aleta a acercarse a la boquilla nuevamente para compensar la pérdida de presión. Este cambio de presión en los tubos posteriores a la resistencia (R) se transmite por la salida de aire (E) la cual se traduce en señal de respuesta para el sistema que se está controlando.

Si el sistema controlado reacciona favorablemente, emitirá una señal de forma que la aleta regrese lentamente a su

posición original (establecida por el set Point) y la presión de salida en (E) regresará al valor inicial.

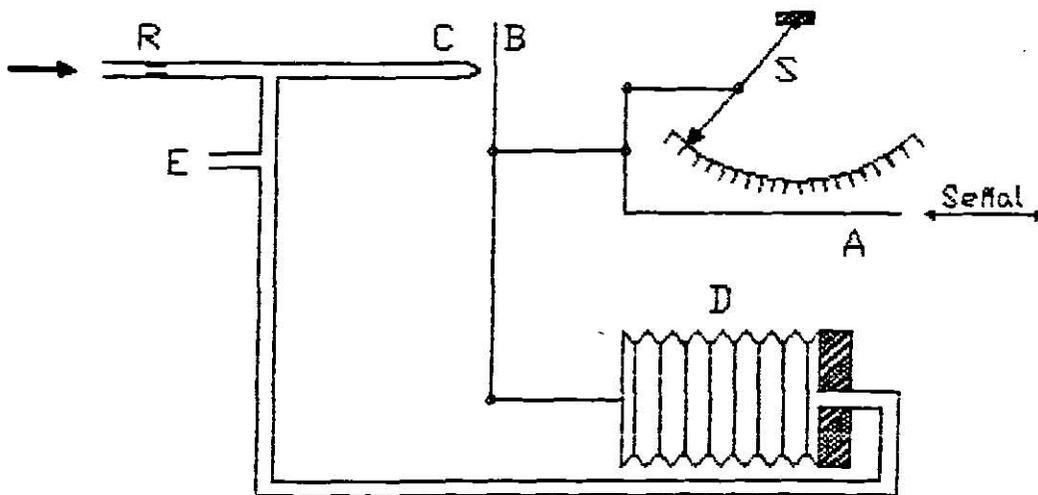


Fig. A.1

Controlador neumático proporcional

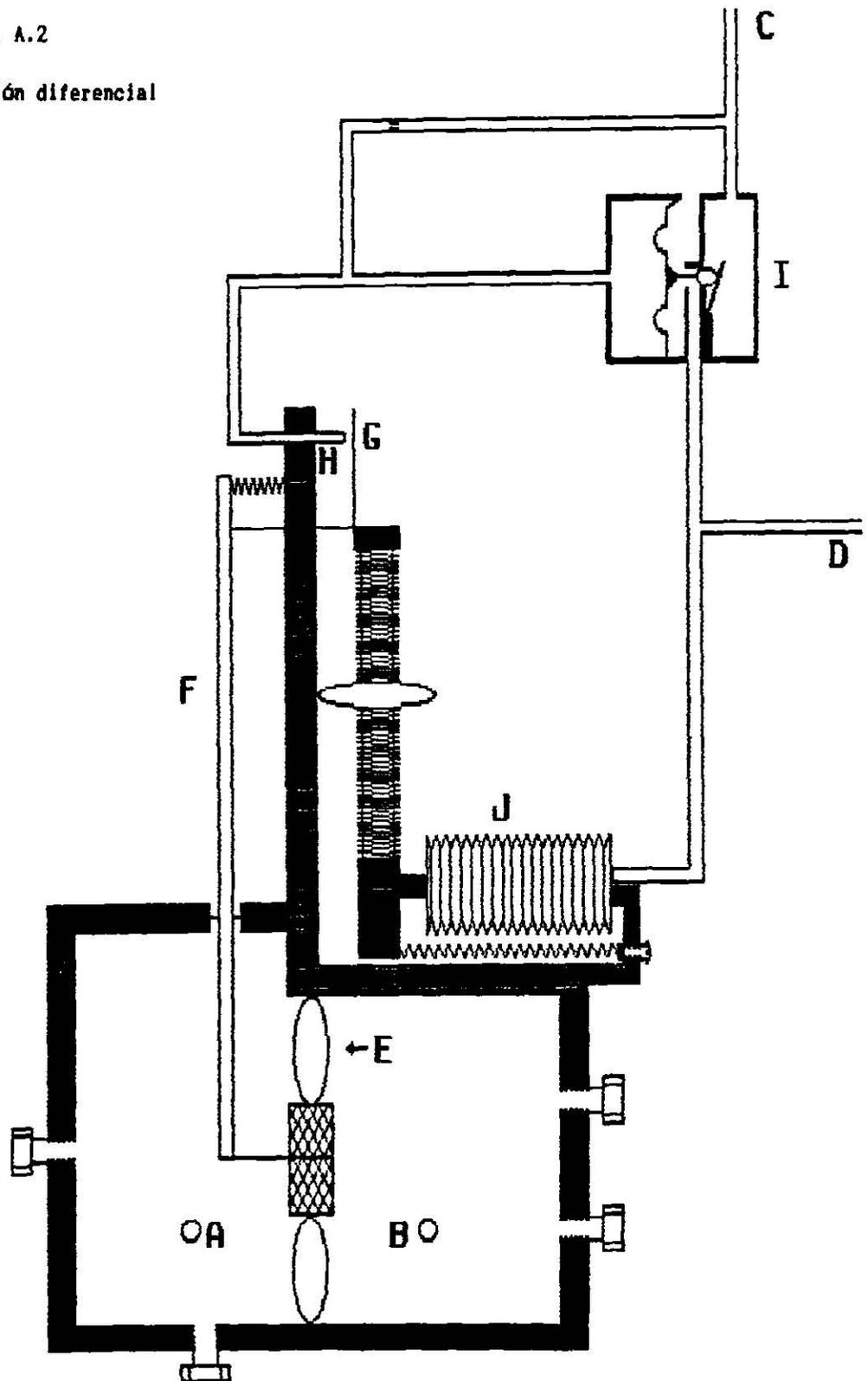
A.3.LA CELDA DE PRESION DIFERENCIAL (D/P Cell)

La celda de presión diferencial o d/p cell es un instrumento que mide la diferencia de presión entre dos líneas y emite una señal neumática en función a la resultante. En la figura A.2 puede verse el diagrama de un modelo.

Las entradas de presión (A) y (B) se encuentran separadas por un diafragma. La señal de presión en (A) debe ser siempre mayor que la señal de presión en (B). El diafragma (E) transmite la diferencia de presión a la varilla (F), la cual a su vez, la transmite a la aleta (G) que limita el paso de aire a través de la boquilla (H). En este sistema, si la presión en (A) aumenta, la aleta (G) se acerca a la boquilla (H) provocando un aumento de presión en su interior. Este aumento de presión se transmite a través del relevador (I) hacia el fuelle (J), el cual compensa la posición de la aleta en relación a la boquilla. Este proceso hace que aumente la presión en la salida (D), siendo ésta la señal para el controlador neumático (como el descrito anteriormente), o para algún sistema indicador.

En el caso del controlador proporcional descrito anteriormente, la señal de presión que se emite por la salida (D) de la celda acciona la palanca (A) que iniciará el proceso de control.

Fig. A.2
Celda de presión diferencial



APENDICE B

B.1.SENSORES DE TENSION

Los sensores de tensión, conocidos también por su nombre en inglés: Strain Gages, se componen de una base polimérica y un enrejado metálico. La base polimérica es una lámina de aproximadamente 0.05 mm de espesor sobre la que se coloca el enrejado metálico. La longitud y amplitud del enrejado son siempre menores a las de la base (ver figura B.1).

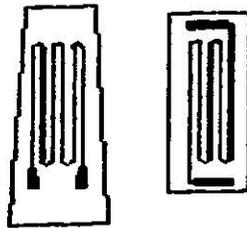


Fig. B.1
Sensores de tensión

El funcionamiento de un sensor de tensión se basa en el cambio de resistencia eléctrica que experimentan los metales al ser deformados. Así, al estirar un sensor, el cambio de longitud se traduce en un cambio en su resistencia a la energía eléctrica. Un aparato electrónico se encarga de interpretar tal cambio. La relación resistencia a cambio de longitud es lineal.

Estos sensores son ampliamente utilizados para la medición de esfuerzos mecánicos en diferentes materiales y equipos. Con ayuda de un cemento en base a resina polimérica se pega el sensor sobre la superficie del cuerpo que será sometido a tensión. Luego de conectar las terminales al lector de

señal se aplica una carga mecánica al cuerpo. El lector de señal reporta un valor de la deformación que está sufriendo el cuerpo.

El enrejado metálico puede ser fabricado en distintos materiales, su elección depende de las aplicaciones, siendo el Constantán el más empleado. Los materiales más usuales son:

- Constantán (Aleación de Cobre-Niquel).- Este material tiene un bajo coeficiente de temperatura, lo cual permite utilizar el sensor en lugares de temperatura variable sin necesidad de compensar el efecto en la expansión y/o resistencia eléctrica del material. Para cambios grandes de temperatura, la variación de las características del metal es fácilmente compensable. Su rango de operación puede estar entre -100° y 460°F .
- Nicromo V (Aleación de Niquel-Cromo).- Es un material que puede utilizarse a temperaturas de hasta 1800°F . Su uso es seguro hasta los 700°F .
- Aleación isoelástica (Aleación de Niquel-Hierro).- Es una aleación que puede ser utilizada a temperaturas altas. Tiene un alto factor de medición, característica que le permite cuantificar esfuerzos de baja magnitud. Tiene una alta resistencia a la fatiga.
- Stabiloy (Aleación de Niquel-Cromo).- El Stabiloy es un material que permite un amplio rango de compensación de temperatura. Una aleación de características similares es el denominado Karma.
- Aleación de Platino.- Este material es excelente para usos a temperaturas de hasta 1500°F . Tiene la

desventaja que no puede autocompensar el efecto de la temperatura. Es necesario conectar un compensador externo. (El compensador externo puede ser un sensor del mismo tipo sometido a la misma temperatura pero no a esfuerzo).

En los sensores cuyo material metálico permite trabajar a altas temperaturas, el factor limitante será el límite de temperatura al que puede someterse el cemento con el que se fija el sensor al cuerpo a prueba. Existen varios tipos de cementos según las condiciones de temperatura, medio en el que se harán las pruebas (existen cementos que resisten el ataque de determinados solventes y/o sustancias químicas) y tipo de superficie sobre la que se colocará el sensor.

Los sensores pueden ser de lámina metálica, alambre metálico o de un semiconductor.

- Láminas metálicas.- Las láminas metálicas se utilizan cuando se requiere de buena precisión, bajo costo, disipación de calor y flexibilidad, además existen muchas configuraciones disponibles que pueden elegirse según la aplicación.

- Sensores de alambre metálico.- Los sensores de alambre metálico son menos precisos, pero pueden trabajar a altas temperaturas. Estos sensores tienen buenas características frente a la fatiga y son de fácil instalación. El precio puede ser del doble o aún mayor que el sensor de lámina.

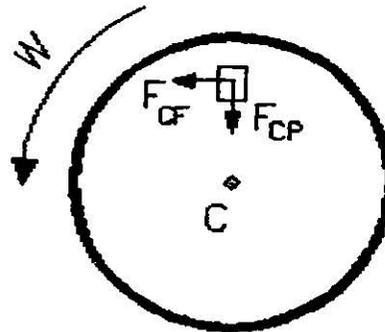
- Semiconductores.- Los sensores semiconductores son, básicamente, filamentos elásticos. Tienen buena resistencia a la fatiga, trabajan a temperaturas abajo de los 700°F, presentan un alto factor de medición (Lo cual les permite detectar cambios pequeños en la deformación) y son de tamaño pequeño. Estos sensores se encuentran disponibles en contadas formas diferentes, son relativamente caros pero requieren de equipo no muy caro para interpretar la señal.

APENDICE C

C.1.LA FUERZA DE CORIOLIS

Consideremos un objeto circular en rotación (digamos un disco). En un punto del disco, se encuentra un objeto que está rotando junto con la superficie. Las fuerzas que actúan sobre tal objeto en reposo son: la fuerza centrífuga (F_{CF}) (tangente a la rotación en todo momento) y la fuerza centrípeta (F_{CP}) (perpendicular a la fuerza centrífuga) (ver figura C.1).

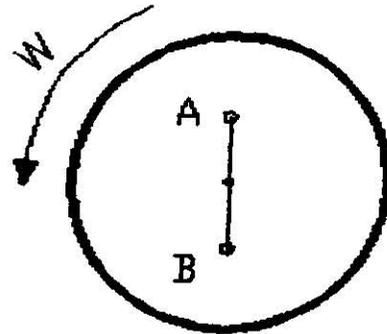
Fig. C.1



Si en un momento dado, una fuerza con origen en el centro (C) trata de mover al objeto radialmente sobre el disco, el desplazamiento sería curvo en relación al propio disco. Dicho de otra manera, si el lector se coloca en el lugar del objeto y trata de caminar sobre una línea recta pintada en sentido radial sobre la superficie del disco, tendría que ejercer una fuerza tangencial en el sentido de la rotación para lograrlo (además de la fuerza en el sentido radial, por supuesto). Si un observador se encuentra en tierra firme fuera del disco, verá que la trayectoria que el lector siguió y que pensó fue en línea recta (pues se movió por la raya pintada sobre el disco), es curva en

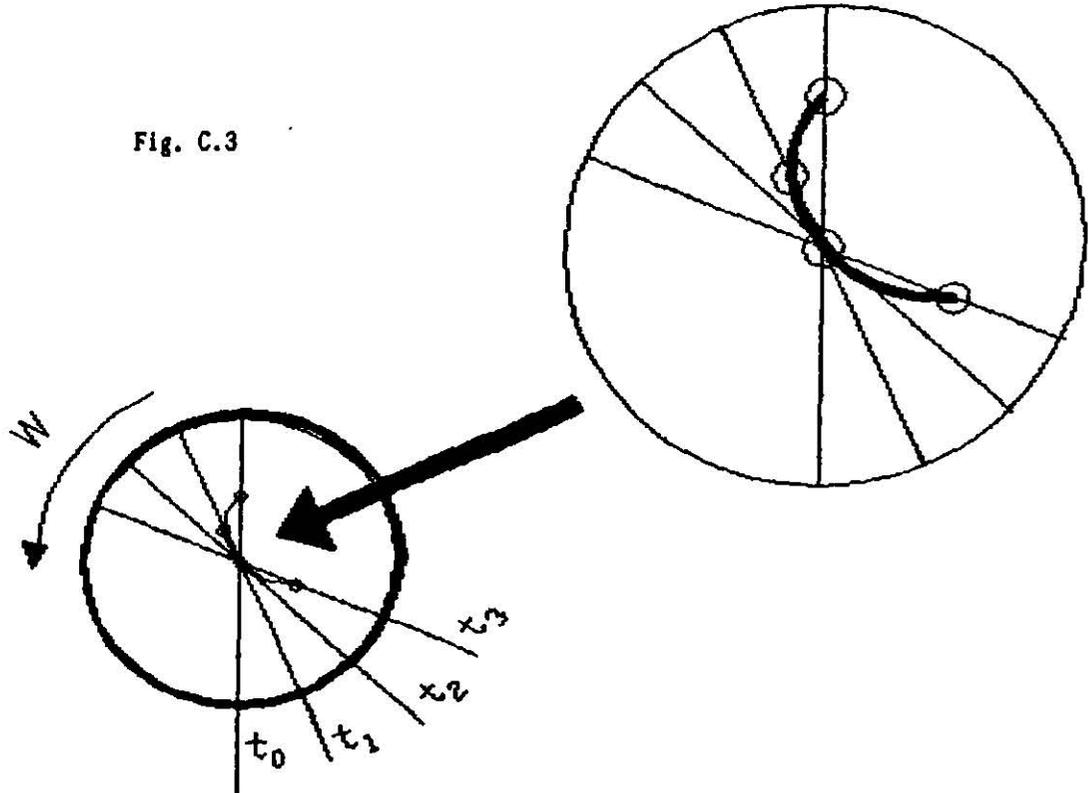
realidad. Veamos qué significa esta aseveración. Tomemos en cuenta el desplazamiento desde el punto (A) hasta el punto (B) sobre el disco de la figura C.2.

Fig. C.2



Ahora tomemos en cuenta la posición del lector a los tiempos t_0 , t_1 , t_2 y t_3 en la gráfica C.3. Cada línea representa la posición a t_i de la línea recta trazada sobre el disco.

Fig. C.3



Obsérvese que la trayectoria descrita por el lector fue curva (visto desde un sistema de ejes coordenados fijo en el espacio). Es evidente que para describir la trayectoria curva observada desde un sistema inercial (y recta desde el punto de vista del observador que está sobre el disco) es necesario aplicar una fuerza en el sentido tangencial a la rotación. Esta fuerza aplicada se opone a la acción de una fuerza, diferente de la centrífuga o centrípeta, que actúa sobre el objeto en movimiento (en relación al disco). Tal fuerza radial es la denominada fuerza de coriolis (F_{CR}) (ver figura C.4).

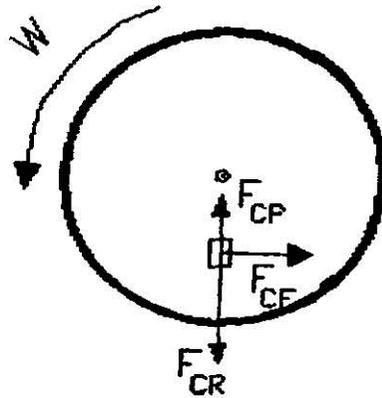


Fig. C.4

BIBLIOGRAFIA

- 1) Bird, R. B. y otros; Fenómenos de Transporte; Reverté; Barcelona 1980.
- 2) Boucher, Donald F.; George E. Alves; Mecánica de Fluidos y de Partículas; Perry & Chilton; Manual del Ingeniero Químico; quinta edición; McGraw Hill; México 1982.
- 3) Considine, Douglas Maxwell; Manual de Instrumentación Aplicada; Compañía Editorial Continental; México 1971.
- 4) Considine, Douglas Maxwell; Process Instruments and Controls Handbook; McGraw Hill; New York 1957.
- 5) DeVries, Eric A.; Experience with Ultrasonic Flowmeters; Hydrocarbon Processing; Junio 1986.
- 6) Feynman, Richard P. y otros; Física; Fondo Educativo Interamericano; México 1971.
- 7) Flow and Level Measurement Handbook and Encyclopedia; Omega Engineering Inc.; Stamford U.S.A. 1987.
- 8) Flow Sensor Features High Accuracy and Low Pressure Loss; New products & Services; Chemical Engineering; Julio 21, 1986.
- 9) Genereaux, Raymond P. y otros; Transporte y Almacenamiento de Fluidos; Perry & Chilton; Manual del

- Ingeniero Químico; quinta edición; McGraw Hill; México 1982.
- 10) Ginesi, Donald; Grebe Gary; Flowmeters, a Performance Review; Chemical Engineering; Junio 22, 1987; Vol 94, Nº 9.
 - 11) Katsuhiko Ogata; Ingeniería de Control Moderna; Prentice Hall; México 1985.
 - 12) Pressure, Strain and Force Handbook and Encyclopedia; Omega Engineering Inc.; Stamford U.S.A. 1987.
 - 13) Seely, Fred B.; Smith, James O.; Resistencia de Materiales; Uteha; México 1979.
 - 14) Spink, L. K.; Principles and Practice of Flow Meter Engineering; . ninth edition; The Foxboro Company; Foxboro 1972.

Catálogos Técnico-Comerciales

- 1) Barco Venturi Flow Measurement System; Aeroquip Corporation; Michigan U.S.A. 1977
- 2) Berg Precision Mechanical Components; Winfred M. Berg, Inc.; New York U.S.A.
- 3) Catalog 94; McMaster Carr Supply Company; Illinois U.S.A. 1988.
- 4) Diamond II Annubar Flow Sensors; Dietrich Standard; Colorado U.S.A. 1987.
- 5) Engineering Components for Demanding Applications; Pure Industries, Inc.; Pensilvania U.S.A.
- 6) Fafnir Bearing Service Catalog; Fafnir Bearing Division of Torrington Company; U.S.A. 1986.
- 7) Flow Products Catalog, EMCO Engineering Measurements Company; Colorado U.S.A. 1985.
- 8) Full Line Stock Products Catalog; Boston Gear Incom International Inc.; Massachusetts U.S.A. 1985.
- 9) Garlock Bearings Inc.; Colt Industries; U.S.A. 1988.
- 10) Graphalloy Mechanical Products; Graphite Metallizing Corporation; New York U.S.A., 1985.

- 11) Industrial Ultrasonics User's Guide; Wesmar Industrial Systems; Washington U.S.A.
- 12) Proximity Switches Photoelectric Controls catalog; Efeotor; Pensilvania U.S.A., 1987.
- 13) Strain Gage Catalog; Micro-Measurements Division, Measurements Group; North Carolina U.S.A., 1985.
- 14) Strain Gages; BLH Electronics, a Bofors Electronics Company; Massachusetts U.S.A. 1985.
- 15) Simplifying Flow Measurement and Control with Variable-Area Meters; Ametek, Shutte and Koerting Division, Pensilvania U.S.A. 1976.
- 16) Turbine Flowmeters; Product Data from Flow Technology, Inc.; Arizona, U.S.A.

