



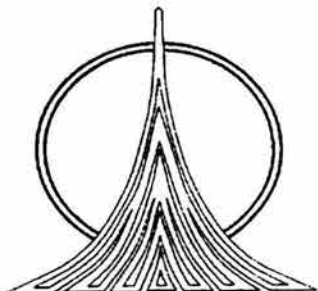
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ZARAGOZA"**

**ELABORACIÓN DE UN PLAN DE CALIBRACIÓN, PRINCIPIOS
DE MEDICIÓN Y CALCULO DE INCERTIDUMBRE PARA
MEDIDORES DE FLUJO DE LÍQUIDOS, DE PRESIÓN
DIFERENCIAL Y ÁREA VARIABLE.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R O Q U Í M I C O
P R E S E N T A:
CYNTHIA IVETTE MARTÍNEZ BLANCO.

DIRECTOR DE TESIS: I.Q. PRAXEDIS ISRAEL SANTAMARÍA MATA.





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/040/04

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNA: MARTÍNEZ BLANCO CYNTHIA IVETTE

P r e s e n t e .

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

Presidente:	M. en C. María José Marques Dos Santos
Vocal:	I.Q. Praxedis Israel Santamaría Mata
Secretario:	M. en A. Teresa Guerra Dávila
Suplente:	I.Q. Hugo Héctor Martínez Rojas
Suplente:	I.Q. Dominga Ortiz Bautista

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

México, D. F., 28 de Junio de 2004

EL JEFE DE LA CARRERA

INGENIERIA QUIMICA
SECRETARIA TECNICA

M. en C. ANDRÉS AQUINO CANCHOLA

♣

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios.

A Escuela de Pastoral por brindarme la oportunidad de conocerte.

A la Sra. Juanita Blanco, por todo su sacrificio, enseñanza y exigencia que me han motivado para culminar este ciclo de mi vida y que me hacen sentirme orgullosa de ser tu hija. A ti MAMÁ te dedico todos mis logros y te doy gracias.

Al Sr. Carlos Martínez, que por su herencia que llevo en mi y por su apoyo incondicional, que me han permitido cumplir mis mas grandes sueños y anhelos. Gracias PAPÁ.

A Rocio Martínez Blanco, por hacerme sentir la hermana mayor más orgullosa de este planeta, por la niñez, los juegos y las aventuras compartidas. Gracias HERMANA.

A mis ABUELITOS por darme unos papas tan maravillosos. Gracias por los consejos y el cariño que me han brindado.

A la Familia BLANCO, por la vida compartida y la unión que existe.

A Ricardo Cortes, por tu cariño, motivación y apoyo para poder realizar este trabajo . Por el tiempo y los sueños compartidos en la parte más importante de mi vida. Gracias.

A América Luna, Elizabeth Corona, Paola Mendoza y Carlos Baeza por demostrarme siempre que la amistad es incondicional y VERDADERA. Gracias AMIGOS.

A I.Q. Israel Santamaría, por la confianza y la asesoría que recibí para la elaboración de este trabajo que representa el inicio de mi carrera profesional. Gracias.

Gracias a la I.Q. Lucila Méndez por todas las facilidades brindadas para el uso de las instalaciones y por su disposición e interés hacia este trabajo.

Gracias a la I.Q. Dominga Ortiz por su paciencia y disponibilidad para resolver mis dudas, que me permitieron enriquecer este trabajo.

Agradezco al Jefe de Mantenimiento del Laboratorio de Ingeniería Química el Sr. Herminio López y a su equipo, por su trabajo de acondicionamiento del sistema, que permitió cumplir con el objetivo principal de este trabajo.

Agradezco al Sr. Javier Jiménez Torres, por proporcionarme el material requerido y por su atención que fueron fundamentales para este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Por mostrarme un camino y enriquecer mi espíritu.

A La Facultad de Estudios Superiores "Zaragoza" .

Por la formación recibida, por permitirme ser un mejor individuo y por albergarme durante el periodo más importante de mi vida.

A todas aquellas personas que de alguna u otra manera han contribuido a mi desarrollo personal, profesional y espiritual a ellas Gracias.

	Página
Resumen	vi
Objetivos	vi
Introducción	vii
CAPITULO I. FLUJO DE FLUIDOS – PRINCIPIOS BÁSICOS.	
1.1 Definición de fluido.	1
1.2 Mecánica de fluidos.	1
1.3 Clasificación general de los fluidos.	1
1.4 Unidades de medida.	1
1.4.1 Unidades SI derivadas.	2
1.4.2 Unidades SI derivadas con nombre especial.	3
1.4.3 Unidades SI derivadas de las de nombre especial.	4
1.4.4 Sistema Ingles de unidades.	4
1.5 Propiedades de los fluidos.	4
1.5.1 Masa y Peso.	5
1.5.2 Temperatura.	5
1.5.3 Presión.	5
1.5.4 Densidad.	6
1.5.4.1 Densidad de líquidos.	6
1.5.4.2 Peso Especifico.	7
1.5.4.3 Gravedad Especifica.	7
1.5.4.4 Volumen Especifico.	7
1.5.5 Compresibilidad.	7
1.5.6 Viscosidad.	8
1.5.6.1 Viscosidad Dinámica	9
1.5.6.2 Viscosidad Cinemática.	9
1.5.7 Presión de vapor y Punto de ebullición.	9
1.5.8 Tensión superficial y capilaridad.	10
1.6 Tipos de fluidos.	11
1.7 Definiciones y características del flujo en tuberías.	12
1.7.1 Número de Reynolds.	12
1.7.2 Flujo laminar y turbulento.	13
1.7.3 Otros tipos de flujo.	14
1.7.4 Definición de caudal volumétrico.	15
1.7.5 Velocidad de flujo.	15
1.7.6 Caudal másico.	15
1.8 Ecuaciones básicas.	15
1.8.1 Ecuación de Continuidad – Conservación de masa	15
1.8.2 Ecuación de Bernoulli – Conservación de la energía.	17
1.8.2.1 Restricciones a la ecuación de Bernoulli.	20
1.8.2.2 Aplicaciones de la ecuación de Bernoulli.	20
1.8.3 Aplicación del factor de fricción y coeficientes de pérdida.	20
1.9 Tipos de cálculos de flujo en tuberías.	22
1.9.1 Accesorios, válvulas y pérdidas locales.	23
1.9.2 Métodos para el cálculo de pérdidas por fricción total.	23
1.9.2.1 Método de longitudes equivalentes.	24
1.9.2.2 Método de las K's.	25
1.9.2.3 Método simplificado.	25

CAPITULO II. MEDICIÓN DE FLUJO.

2.1	Definición de Medidores de flujo.	26
2.2	Clasificación de Medidores de Flujo.	26
2.3	Selección de Medidor de Flujo.	27
2.3.1	Factores de selección.	27
2.4	Clasificación de los medidores de flujo por factores del proceso Dominantes.	28
2.4.1	Medición de masa ó volumen.	29
2.4.2	Medición de caudal de flujo total o parcial.	29
2.4.3	Estado del fluido.	29
2.4.4	Limpeza del fluido.	30
2.4.5	Dependencia del perfil de flujo.	30
2.4.6	Instalación de medidores de flujo.	31
2.4.7	Tipo de señal requerida.	31
2.4.8	Exactitud.	31
2.5	Descripción de tecnologías de medición de flujo.	32
2.6	Medición por presión diferencial o cabeza variable.	32
2.6.1	Medida de la presión estática.	34
2.6.2	Placa de orificio.	35
2.6.2.1	Tomas de presión.	38
2.6.2.2	Tipos de placa de orificio.	39
2.6.3	Medidor Venturi.	42
2.6.3.1	Funcionamiento del tubo venturi.	43
2.6.3.2	Rango de funcionamiento.	45
2.6.3.3	Comparación con otros medidores de flujo.	46
2.6.4	Tubo Pitot.	46
2.6.5	Tubo Annubar.	48
2.6.6	Medidor de codo.	49
2.6.7	Boquilla de flujo (Nozzle).	50
2.7	Medidores de área variable.	51
2.7.1	Medidor de orificio o cubierto.	51
2.7.2	Medidor tipo pistón.	51
2.7.3	Rotámetro.	51
2.7.4	Diseño de componentes del Rotámetro.	53
2.7.4.1	Tubos de vidrio.	54
2.7.4.2	Tubos metálicos.	54
2.7.4.3	Tubos de plástico.	55
2.7.4.4	Flotadores.	55
2.8	Medidores de velocidad.	56
2.8.1	Medidores tipo turbina.	57
2.8.2	Medidores Vortex (vórtice).	58
2.8.3	Medidores de flujo magnético.	59
2.8.4	Medidor Ultrasónico.	60
2.9	Medidor de fuerza (Blanco o Target).	61
2.10	Medidores de desplazamiento positivo.	62
2.10.1	Medidores directos.	62
2.10.1.1	Medidor Rotativo.	62
2.10.1.2	Medidor de Disco Oscilante.	63
2.10.1.3	Medidor de Pistón Oscilante.	64

CONTENIDO

2.10.1.4 Medidor de Pistón Reciprocante.	65
2.11 Medidores másicos.	66
2.11.1 Medidor másico térmico.	66
2.11.2 Medidor de Coriolis.	66
CAPITULO III. PLAN DE CALIBRACIÓN.	
3.0 Calibración de medidores de flujo de líquidos tipo Placa de Orificio, Tubo Venturi y Rotámetro.	68
3.1 Alcance.	68
3.2 Terminología.	68
3.3 Método.	68
3.4 Aparatos.	68
3.5 Operaciones previas.	68
3.6 Plan de calibración.	69
3.7 Aplicación del Plan de Calibración.	72
3.7.1 Operaciones previas.	72
3.7.2 Plan de calibración.	77
CAPITULO IV. CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE.	
4.1 Determinación de la incertidumbre en medidores de flujo.	80
4.2 Incertidumbre de la Placa de Orificio.	80
4.2.1 Incertidumbre para el coeficiente de descarga C_D .	83
4.2.2 Incertidumbre para el área del orificio A_0 .	90
4.2.3 Incertidumbre del valor local de la gravedad (g).	91
4.2.4 Incertidumbre asociada a la diferencia de presión (ΔP) del medidor de flujo.	91
4.2.5 Incertidumbre para el área A_2 .	94
4.2.6 Incertidumbre para el área A_1 (tubería).	94
4.2.7 Incertidumbre combinada para el caudal de la placa de orificio.	95
4.2.8 Incertidumbre para el caudal másico en la placa de orificio.	95
4.3 Incertidumbre asociada al caudal másico de los medidores de flujo Placa de Orificio y Venturi obtenido por método gravimétrico.	97
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.	101
APÉNDICE.	
APÉNDICE A. PRINCIPIOS DE MEDICIÓN.	111
APÉNDICE B. SELECCIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO.	132
APÉNDICE C. PROPIEDADES DEL AGUA Y DENSIDAD DEL MERCURIO.	137
APÉNDICE D. INFORMACIÓN TÉCNICA.	138
BIBLIOGRAFÍA.	146

Resumen.

En el presente trabajo hemos abordado uno de los diferentes métodos existentes de calibración directa de equipos o instrumentos de medida, la calibración por el método gravimétrico, para la obtención de la magnitud masa y hemos desarrollado un ejemplo de este tipo de calibración de medidores de flujo tipo presión diferencial y área variable. Una de las particularidades de este método de calibración es la ausencia de un patrón de referencia de la misma magnitud que se desea calibrar (paso que suele ser crucial en la mayoría de calibraciones de equipos o instrumentos de medida físicos), ya que en este ejemplo en concreto el valor de referencia se obtiene calculando el valor de la magnitud deseada (volumen) a partir del valor de otra magnitud (masa) y de una relación entre ellas (densidad). Sin embargo, para el correcto establecimiento de la magnitud de masa, generalmente se deberán utilizar patrones en el proceso de calibración de la balanza utilizada para la medida de masa. Para completar el proceso de calibración, se realizó el cálculo de la incertidumbre asociada al medidor de flujo.

En particular se muestra la importancia de la calibración de medidores de flujo y la utilidad del método gravimétrico para efectuar un análisis de las condiciones reales de los medidores de flujo de tipo presión diferencial y área variable, así como la aplicabilidad del método gravimétrico para la calibración de un elemento primario de flujo para líquidos.

Objetivos:

- Elaborar un plan de calibración para los medidores de flujo de líquidos de Área Variable (Rotámetro) y de Presión diferencial (Placa de Orificio y Tubo Venturi) del laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la U.N.A.M.
- Generar un procedimiento para la calibración de medidor de flujo de Área Variable (Rotámetro) y de Presión diferencial (Placa de Orificio y Tubo Venturi).
- Elaborar el plan de calibración de acuerdo a normas y estándares nacionales e internacionales de medición de flujo de fluidos líquidos en conductos cerrados.
- Realizar experimentalmente la calibración de los medidores de flujo tipo Placa de Orificio, Tubo Venturi y Rotámetro en el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química.
- Realizar el cálculo de incertidumbre de las mediciones del plan de calibración.

Introducción.

El flujo es una de las variables de mayor interés en los procesos industriales. Para ejemplificar lo anterior, basta con hacer un conteo de los medidores de flujo que se encuentran instalados en las industrias que incluyen dentro de sus actividades el control y desarrollo de operaciones unitarias. Por lo tanto, es de vital importancia cuantificar de forma confiable y eficiente las cantidades de un líquido que se transfieren en cierto intervalo de tiempo, así como evaluar el funcionamiento de los equipos que sirven a tal propósito, para lograr un desarrollo adecuado en la investigación y el control de los procesos en la industria, así como en las áreas de su distribución y comercialización con la mayor exactitud y precisión posible.

Por esto, no es de sorprender que existan distintas tecnologías para la medición de flujo en conductos cerrados. Sin embargo, la creciente variedad y capacidades de estos instrumentos de medición incrementa la dificultad para su selección.

La medición comercial de flujo de fluidos, tiene su origen a principios del siglo XX, con los medidores de presión diferencial, como la mayoría de los medidores que todavía se emplean hoy en día (venturi, toberas, desplazamiento positivo, mamparas y tubos pitot).

A través de los años la medición de flujo de fluidos, ha sufrido cambios que hubieran sido difíciles de predecir hace un siglo; con la aplicación de la electrónica y los microprocesadores en los últimos 25 años se ha incluido el uso de modelos por computadora en el desarrollo de medidores de flujo lo cual ha permitido aplicar con mayor facilidad los fundamentos científicos de la mecánica de fluidos.

La medición y cálculo de incertidumbre del flujo de fluidos ofrece oportunidades para el control y aseguramiento de la calidad, control y mejora del proceso, y también proporciona una ventaja en la utilización total de las plantas industriales. Otros de los beneficios potenciales son la reducción de costos, y la mejora y optimización de procesos.

Por otra parte, la normalización es una necesidad que se ha acentuado con la apertura de los mercados comerciales, y ya que la medición de flujos no ha escapado a esta tendencia, existen actualmente diversas instituciones, comités técnicos, etc. que se dedican a la elaboración de documentos normativos referentes a la metrología de flujo de fluidos. Algunas de estas instituciones son: ISO, AGA, API, ASME, OIML.

Estas instituciones han desarrollado normas que sugieren metodologías para la medición de flujo de fluidos y el cálculo de su incertidumbre asociada, que son de gran importancia en la práctica de la Ingeniería para conocer la duda que se tiene respecto al resultado de una medición de flujo y las desviaciones a considerar en un proceso que involucre el transporte de fluidos líquidos.

Durante la operación de un medidor de flujo, sus materiales de construcción se ven sometidos a un proceso continuo de fatiga, desgaste, ensuciamiento y eventualmente a condiciones extremas momentáneas que ocasionan que el instrumento se degrade en sus niveles de exactitud y precisión.

La calibración periódica de estos instrumentos de medición pone en evidencia los efectos antes descritos y permite restituir la exactitud del sistema de medición a sus condiciones

preestablecidas mediante el ajuste con base en el comportamiento de los patrones de calibración.

Todo lo anterior es necesario para elaborar un plan de calibración para los medidores de flujo de líquidos y cálculo de incertidumbre correspondiente, ya que por lo general usuarios de estos instrumentos no cuentan con un patrón de referencia ni un procedimiento en los cuales puedan apoyarse para calibrar y saber si los resultados obtenidos son los adecuados para cumplir sus objetivos.

Con miras a lograr lo anterior, en este trabajo se propone un plan de calibración para los medidores de flujo de líquidos, tipo Área Variable, Tubo Venturi y Placa de orificio, que consta de una serie de operaciones que permiten obtener resultados confiables de medición. Este plan de calibración es elaborado de acuerdo a normas y estándares nacionales e internacionales de medición de flujo de fluidos líquidos en conductos cerrados. El plan de calibración propuesto no solo puede ser aplicado a los medidores de flujo del sistema que se utiliza en este trabajo, sino que realizando las consideraciones pertinentes se puede aplicar para todos los medidores de tipo Área Variable, Tubo Venturi y Placa de orificio en general, independiente del sistema de flujo de fluidos en que se utilice.

Un método que se puede aplicar para cumplir estos objetivos es el método gravimétrico que permite conocer el caudal másico real mediante un muestreo del fluido de proceso. Conociendo la masa de la muestra obtenida, se puede calcular el caudal másico y compararlo con el obtenido mediante el modelo matemático correspondiente a cada medidor de flujo. Al realizar experimentalmente la calibración de un medidor de flujo de Área Variable, del Tubo Venturi y la Placa de Orificio se puede realizar el cálculo de incertidumbre de las mediciones obtenidas del plan de calibración.

Debido a la disponibilidad del equipo necesario para realizar este trabajo, en particular se enfoca a tres tipos de medidores de flujo los cuales son: tipo Área Variable (Rotámetro), de presión diferencial (Tubo Venturi y Placa de orificio) del Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la U.N.A.M.

CAPITULO I

1.1 Definición de fluido.

Un fluido se puede definir como:

- Una sustancia que se deforma continuamente bajo la aplicación de un *esfuerzo cortante* tangencial (fuerza requerida para obligar al cambio de forma y volumen de una sustancia), sin importar la magnitud de éste⁽¹⁾.
- Una sustancia que, debido a su poca cohesión intermolecular carece de forma propia y adopta la forma del recipiente que la contiene⁽³⁾.

1.2 Mecánica de fluidos.

Es la parte de la mecánica que estudia el comportamiento de los fluidos en movimiento o en reposo (fluidos dinámicos y fluidos estáticos), es decir la acción de fuerzas sobre un fluido ya sea en equilibrio *hidrostático* o en movimiento *hidrodinámico*⁽¹⁾.

1.3 Clasificación general de los fluidos.

Los fluidos generalmente se clasifican en líquidos y gases.

Un **líquido** está sometido a fuerzas intermoleculares que lo mantienen unido de tal manera que su volumen es definido, pero su forma no. Los líquidos a una presión y temperatura determinadas ocupan un volumen determinado, adoptando la forma del recipiente contenedor. Si sobre el líquido se aplica una presión uniforme, por ejemplo, la atmosférica, el líquido adopta una superficie libre plana, como la superficie de un lago o en un cubo de agua.

El **gas** llenará el recipiente que lo contiene ejerciendo una presión uniforme sobre todas las paredes del recipiente, pero puesto en libertad se expande.

1.4 Unidades de medida.

Con objeto de garantizar la uniformidad y equivalencia en las mediciones, así como facilitar todas las actividades tecnológicas industriales y comerciales, diversas naciones del mundo suscribieron el Tratado del Metro, en el que se adoptó el Sistema Métrico Decimal. Este Tratado fue firmado por 17 países en París, Francia, en 1875. México se adhirió al Tratado el 30 de diciembre de 1890. 51 naciones participan como miembros actualmente en el Tratado. El Tratado del Metro otorga autoridad a la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM - Conferencia General de Pesas y Medidas), al Comité International des Poids et Mesures (CIPM - Comité Internacional de Pesas y Medidas) y al Bureau International des Poids et Mesures (BIPM - Oficina Internacional de Pesas y Medidas), para actuar a nivel internacional en materia de metrología.

La última reunión de la CGPM, la vigésima segunda realizada desde su creación, se llevó a cabo del 13 al 17 de octubre de 2003 en París, con la participación del Centro Nacional de Metrología (CENAM) en representación de México⁽²⁹⁾.

La Nueva Ley Federal sobre Metrología y Normalización publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de julio 1992, establece que el Sistema Internacional (SI) es el sistema de unidades oficial en México (Última reforma aplicada 19/05/1999).

El **Sistema Internacional de Unidades (SI)** se fundamenta en siete unidades base correspondientes a las magnitudes de longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura, cantidad de materia, e intensidad luminosa y sus derivadas.

Las definiciones de las unidades de base adoptadas por la CGPM, son las siguientes^(28,29):

El **metro (m)** se define como la longitud de la trayectoria recorrida por la luz en el vacío en un lapso de $1 / 299\,792\,458$ de segundo.

El **kilogramo (kg)** se define como la masa igual a la del prototipo internacional del kilogramo.

El **segundo (s)** se define como la duración de $9\,192\,631\,770$ períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado base del átomo de cesio 133.

El **ampere (A)** se define como la intensidad de una corriente constante, que mantenida en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable, colocados a un metro de distancia entre sí en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} Newton por metro de longitud.

El **kelvin (K)** se define como la fracción $1/273,16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua (13ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1967).

El **mol (mol)** se define como la cantidad de materia que contiene tantas unidades elementales como átomos existen en $0,012$ kilogramos de carbono 12 (^{12}C) (14ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1971).

La **candela (cd)** se define como la intensidad luminosa, en una dirección dada de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz y cuya intensidad energética en esa dirección es de $1/683$ watt por esterradián (16ª Conferencia General de Pesas y Medidas, 1979).

1.4.1 Unidades SI derivadas expresadas a partir de unidades básicas y suplementarias.

Las unidades SI derivadas se definen de forma que sean coherentes con las unidades básicas y suplementarias, es decir, se definen por expresiones algebraicas bajo la forma de productos de potencias de las unidades SI básicas y/o suplementarias con un factor numérico igual 1.

Varias de estas unidades SI derivadas se expresan simplemente a partir de las unidades SI básicas y suplementarias. Otras han recibido un nombre especial y un símbolo particular.

Las unidades de medida utilizadas en flujo de fluidos son las unidades derivadas, las cuales permiten el cálculo adecuado del sistema de flujo que sé este trabajando ó investigando. Las unidades de medida usadas para describir las propiedades de un fluido son:

Unidad de velocidad	Un metro por segundo (m/s o $m \cdot s^{-1}$) es la velocidad de un cuerpo que, con movimiento uniforme, recorre, una longitud de un metro en 1 segundo.
Unidad de aceleración	Un metro por segundo cuadrado (m/s^2 o $m \cdot s^{-2}$) es la aceleración de un cuerpo, animado de movimiento uniformemente variado, cuya velocidad varía cada segundo, 1 m/s.
Unidad de número de ondas	Un metro a la potencia menos uno (m^{-1}) es el número de ondas de una radiación monocromática cuya longitud de onda es igual a 1 metro.
Unidad de velocidad angular	Un radián por segundo (rad/s o $rad \cdot s^{-1}$) es la velocidad de un cuerpo que, con una rotación uniforme alrededor de un eje fijo, gira en 1 segundo, 1 radián.
Unidad de aceleración angular	Un radián por segundo cuadrado (rad/s^2 o $rad \cdot s^{-2}$) es la aceleración angular de un cuerpo animado de una rotación uniformemente variada alrededor de un eje fijo, cuya velocidad angular, varía 1 radián por segundo, en 1 segundo.

1.4.2 Unidades SI derivadas con nombres y símbolos especiales.

Unidad de frecuencia	Un hertz (Hz) es la frecuencia de un fenómeno periódico cuyo periodo es 1 segundo.
Unidad de fuerza	Un newton (N) es la fuerza que, aplicada a un cuerpo que tiene una masa de 1 kilogramo, le comunica una aceleración de 1 metro por segundo cuadrado.
Unidad de presión	Un pascal (Pa) es la presión uniforme que, actuando sobre una superficie plana de 1 metro cuadrado, ejerce perpendicularmente a esta superficie una fuerza total de 1 newton.
Unidad de energía, trabajo, cantidad de calor	Un joule (J) es el trabajo producido por una fuerza de 1 newton, cuyo punto de aplicación se desplaza 1 metro en la dirección de la fuerza.
Unidad de potencia, flujo radiante	Un watt (W) es la potencia que da lugar a una producción de energía igual a 1 joule por segundo.
Unidad de cantidad de electricidad, carga eléctrica	Un coulomb (C) es la cantidad de electricidad transportada en 1 segundo por una corriente de intensidad 1 ampere.
Unidad de potencial eléctrico, fuerza electromotriz	Un volt (V) es la diferencia de potencial eléctrico que existe entre dos puntos de un hilo conductor que transporta una corriente de intensidad constante de 1 ampere cuando la potencia disipada entre estos puntos es igual a 1 watt.
Unidad de resistencia eléctrica	Un ohm (Ω) es la resistencia eléctrica que existe entre dos puntos de un conductor cuando una diferencia de potencial constante de 1 volt aplicada entre estos dos puntos produce, en dicho conductor, una corriente de intensidad 1 ampere, cuando no haya fuerza electromotriz en el conductor.
Unidad de capacidad eléctrica	Un farad (F) es la capacidad de un condensador eléctrico para que entre sus armaduras aparezca una diferencia de potencial eléctrico de 1 volt, cuando está cargado con una cantidad de electricidad igual a 1 coulomb.
Unidad de flujo magnético	Un weber (Wb) es el flujo magnético que, al atravesar un circuito de una sola espira produce en la misma una fuerza electromotriz de 1 volt si se anula dicho flujo en un segundo por decaimiento uniforme.
Unidad de inducción magnética	Una tesla (T) es la inducción magnética uniforme que, repartida normalmente sobre una superficie de 1 metro cuadrado, produce a través de esta superficie un flujo magnético total de 1 weber.
Unidad de inductancia	Un henry (H) es la inductancia eléctrica de un circuito cerrado en el que se produce una fuerza electromotriz de 1 volt, cuando la corriente eléctrica que recorre el circuito varía uniformemente a razón de un ampere por segundo.

1.4.3 Unidades SI derivadas expresadas a partir de las que tienen nombres especiales.

Unidad de viscosidad dinámica	Un pascal segundo (Pa·s) es la viscosidad dinámica de un fluido homogéneo, en el cual, el movimiento rectilíneo y uniforme de una superficie plana de 1 metro cuadrado, da lugar a una fuerza retardatriz de 1 newton, cuando hay una diferencia de velocidad de 1 metro por segundo entre dos planos paralelos separados por 1 metro de distancia.
Unidad de entropía	Un joule por kelvin (J/K) es el aumento de entropía de un sistema que recibe una cantidad de calor de 1 joule, a la temperatura termodinámica constante de 1 kelvin, siempre que en el sistema no tenga lugar ninguna transformación irreversible.
Unidad de capacidad térmica másica	Un joule por kilogramo kelvin (J/kg·K) es la capacidad térmica másica de un cuerpo homogéneo de una masa de 1 kilogramo, en el que el aporte de una cantidad de calor de un joule, produce una elevación de temperatura termodinámica de 1 kelvin.
Unidad de conductividad térmica	Un watt por metro kelvin (W·m/K) es la conductividad térmica de un cuerpo homogéneo isótropo, en la que una diferencia de temperatura de 1 kelvin entre dos planos paralelos, de área 1 metro cuadrado y distantes 1 metro, produce entre estos planos un flujo térmico de 1 watt.
Unidad de intensidad del campo eléctrico	Un volt por metro (V/m) es la intensidad de un campo eléctrico, que ejerce una fuerza de 1 newton sobre un cuerpo cargado con una cantidad de electricidad de 1 coulomb.

1.4.4 Sistema Inglés de Unidades.

El sistema inglés de unidades o sistema imperial, es aún usado ampliamente en los Estados Unidos de América y, cada vez en menor medida, en algunos países con tradición británica. Debido a la intensa relación comercial que tiene nuestro país con los EUA, existen aún en México muchos productos fabricados con especificaciones en este sistema.

El CENAM promueve el empleo del Sistema Internacional en todas las mediciones en el país. No obstante, reconociendo la presencia del sistema inglés en nuestro medio es conveniente ofrecer referencias sobre los factores de conversión de estas unidades al Sistema Internacional. A diferencia de este último, no existe una autoridad única en el mundo que tome decisiones sobre los valores de las unidades en el sistema inglés. De hecho, algunas unidades tienen valores diferentes en diversos países.

1.5 Propiedades de los fluidos.

Dependiendo del tipo de medidor de flujo, las propiedades fisicoquímicas pueden tener mayor efecto en los resultados, así como contribución a la incertidumbre de la medición en el sistema de diseño y desarrollo, estos conceptos se definirán más adelante, por ahora solo se describen las propiedades de los fluidos líquidos, sus posibles efectos en la medición de flujo y sus unidades de medida.

1.5.1 Masa y Peso.

La comprensión de las propiedades de los fluidos requiere una cuidadosa diferenciación entre "masa y peso", por lo que se aplican las siguientes definiciones:

Masa es la propiedad de un fluido que se mide por su inercia o resistencia a un cambio de movimiento, también es una medida de la cantidad de fluido. Se utiliza el símbolo "**m**" para la masa.

Peso es la cantidad que pesa un cuerpo, es decir, la fuerza con que el cuerpo es atraído hacia la tierra por la acción de la gravedad. Se utiliza el símbolo "**W**" para peso.

El peso está relacionado con la masa y la aceleración debida a la gravedad, "**g**", por la ley de gravitación de Newton.

$$W = m * g$$

En este trabajo se utilizará como valor de la **aceleración gravitacional** de **$g = 9,81 \text{ m/s}^2$** y como valor de la **constante gravitacional** **$g_c = 9.81 \text{ kg}\cdot\text{m} / \text{kgf}\cdot\text{s}^2$** en el sistema SI.

1.5.2 Temperatura.

La temperatura depende del movimiento las moléculas que componen a la sustancia. El efecto de los cambios de temperatura puede notarse en los valores de *viscosidad*, *densidad* y *compresibilidad*. Pocas mediciones de flujo se pueden realizar sin que las variaciones de temperatura las afecten. Para aplicaciones de conteo de flujo de fluidos o en otros servicios, las temperaturas son medidas por separado.

1.5.3 Presión.

La presión es definida como fuerza (**F**) por unidad de superficie (área **A**), su unidad en el SI es el Pascal (Pa).

$$P = \frac{F}{A}$$

El concepto de presión resulta especialmente útil cuando el cuerpo o sistema sobre el que se ejercen las fuerzas es deformable. Los fluidos no tienen forma propia y constituyen el principal ejemplo de aquellos casos en los que es más adecuado utilizar el concepto de presión que el de fuerza. Los fluidos experimentan una presión en sus contenedores.

Cuando se realizan cálculos que implican la presión de un fluido, se debe hacer la medición en relación con alguna presión de referencia. Normalmente, la presión de referencia es la atmosférica.

Tipos de presión:

- 1) **Presión atmosférica:** Presión que ejerce la atmósfera que rodea la tierra (barométrica) sobre todos los objetos que se hallan en contacto con ella.
- 2) **Presión absoluta** del fluido se mide con respecto al perfecto vacío. La mayoría de los manómetros, están contruidos de manera que miden presiones relativas con la relación a la atmósfera local. Para hallar la presión absoluta con exactitud habrá que

sumar a la presión leída en el manómetro la presión atmosférica local medida exactamente con un barómetro.

$$P \text{ absoluta} = P \text{ manométrica} + P \text{ atmosférica}$$

- 3) **Presión manométrica** es la presión del fluido con respecto a la presión atmosférica fuera de su contenedor.

$$P \text{ manométrica} = P \text{ absoluta} - P \text{ atmosférica}$$

- 4) **Presión diferencial** es la diferencia entre las dos presiones. (Notar que la presión manométrica es actualmente una presión diferencial entre la presión del fluido y la presión atmosférica).

En el sistema inglés de unidades, se usa las abreviaciones "psig", "psia", y "psi" claramente describe la presión de tipo indicada. Las unidades comúnmente usadas para la presión diferencial son "pulgadas de agua", "milímetros de mercurio", etc. A nivel del mar la presión atmosférica puede variar con las condiciones ambientales. Esto es aproximadamente 14.7 ± 0.5 psia (101 ± 3 kPa abs). Si la presión manométrica es menor que la presión atmosférica, algunas veces es reportada como vacío (ver Figura 1.1).

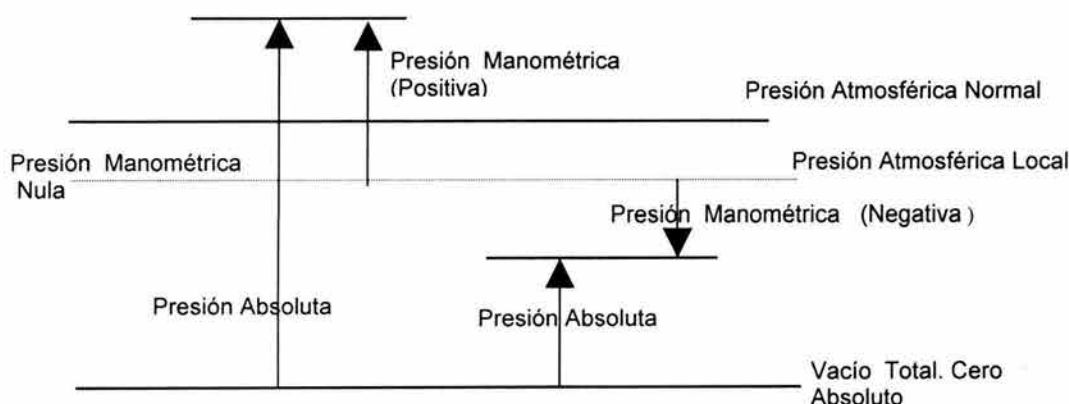


Figura 1.1 Ejemplos de la presión absoluta y manométrica

1.5.4 Densidad.

La densidad de un fluido es la cantidad de masa (m) por unidad de volumen (V), representada por la letra griega ρ (rho), las unidades de la densidad son kg/m^3 en SI.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

1.5.4.1 Densidad de líquidos.

La densidad de un líquido puede variar con la temperatura y la presión. La densidad del agua y el mercurio en función de la temperatura puede verse en el Apéndice C, Tabla C.1 y C.2 respectivamente. La densidad de un fluido afecta su flujo de dos maneras distintas.

En primera instancia la densidad determina la inercia de un volumen unitario del fluido y, por lo tanto, su aceleración cuando dicho volumen se somete a una fuerza dada.

La densidad de un líquido es función de su temperatura y presión, en los líquidos su densidad disminuye en virtud de que una masa es constante, pero al aumentar la presión sobre el, éste se comprime y su densidad aumenta.

1.5.4.2 Peso Específico.

El peso específico, es la cantidad de peso (**W**) por unidad de volumen (**V**) de una sustancia. Utiliza la letra griega γ (gamma) para denotar el peso específico. Las unidades del peso específico son newton por metro cúbico (Nm^{-3}) en el SI.

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

A menudo resulta conveniente indicar peso específico o densidad de fluido en términos de su relación con el peso específico o densidad de un fluido común. El peso específico está relacionado con la densidad por:

$$\gamma = \rho g$$

1.5.4.3 Gravedad Específica.

El término gravedad específica es la relación entre la masa del cuerpo a la masa de un mismo volumen de agua destilada a 4°C y presión atmosférica.

Estas definiciones de gravedad específica se pueden expresar de la siguiente manera matemática como sigue:

$$S_g = \frac{\rho_s}{\rho_w @ 4^\circ\text{C}} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w @ 4^\circ\text{C}}$$

en donde los subíndices se refieren a la sustancia cuya gravedad específica se está determinando y el subíndice w se refiere al agua a 4°C son constantes y tiene los valores que se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} \gamma_w @ 4^\circ\text{C} &= 9.81 \text{ kN/m}^3 \\ \rho_w @ 4^\circ\text{C} &= 1000 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma_w @ 4^\circ\text{C} &= 62.4 \text{ lb/ft}^3 \\ \rho_w @ 4^\circ\text{C} &= 1.94 \text{ slugs/ft}^3 \end{aligned}$$

1.5.4.4 Volumen Específico.

El volumen específico de cualquier sustancia es el espacio ocupado por un gramo de la misma. Se puede establecer que la masa de un cuerpo muy denso es mayor que la de uno de igual volumen pero de menor densidad, por lo que se puede enunciar, que la masa de toda sustancia (en cualquier estado físico) ocupa un volumen inversamente proporcional a su densidad.

1.5.5 Compresibilidad.

La compresibilidad de un fluido, es la medida de cambio de volumen cuando el fluido está sometido a presiones o tensiones normales (o cambio de densidad del fluido causado por una variación de presión).

Sobre los líquidos el efecto de la presión es muy pequeño, se desprecia y se puede considerar *incompresible* para facilitar los cálculos en la medición de fluido líquido –por ejemplo, en el caso del agua sería necesario un esfuerzo de $1,000 \text{ kg/cm}^2$ para obtener una reducción en volumen de 5% aproximadamente- sin embargo la compresibilidad de los líquidos es muy importante ya que ocasiona fenómenos como golpes en tuberías.

1.5.6 Viscosidad.

La viscosidad, η , de un fluido es la medida de la resistencia que opone éste a la deformación por corte (fluir).

$$\eta = \tau \frac{dy}{du}$$

Donde τ (tao) es la *tensión de corte*, y se define como la fuerza requerida para obligar a una capa del fluido a deslizarse sobre otra capa de la misma sustancia. Así pues, τ es una fuerza dividida entre un área y puede medirse en unidades de newtons por metro cuadrado (Nm^{-2}), du es la velocidad (m/s) y dy es la separación entre los elementos del fluido. En la Figura 1.2 se ilustra el concepto de cambio de velocidad en un fluido mediante la exhibición de una capa delgada del fluido situada entre dos superficies, una de las cuales está estacionaria, mientras que la otra se está moviendo.

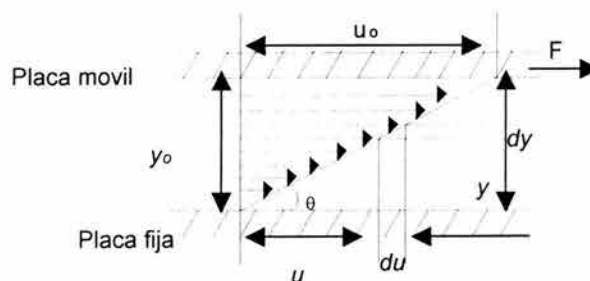


Figura 1.2. Definición de viscosidad.

Según la Ley de Newton de la viscosidad dinámica, el esfuerzo tangencial que se produce entre dos láminas separadas una distancia dy , y que se desplazan con velocidades respectivamente (v) y $[v + (\partial v / \partial y) dy]$, su valor es:

$$Z = \eta \frac{\partial v}{\partial y}$$

De acuerdo con dicha ley, el esfuerzo tangencial es proporcional al gradiente transversal de velocidades $\partial v / \partial y$. La resistencia que ofrece un líquido a fluir se conoce como viscosidad. En general, se describen dos tipos de viscosidad: dinámica y cinemática.

1.5.6.1 Viscosidad Dinámica.

Cuando un fluido se mueve, se desarrolla en él una tensión de corte, cuya magnitud depende de la viscosidad del fluido. En un fluido como el agua, el aceite, el alcohol, o cualquier otro líquido común, encontramos que la magnitud de la tensión de corte es directamente proporcional al cambio de velocidad entre diferentes posiciones del fluido. El hecho de que la tensión de corte del fluido es directamente proporcional al gradiente de velocidad puede establecerse matemáticamente como:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

En la que la constante de proporcionalidad μ (letra griega mu) se conoce como viscosidad dinámica del fluido. La viscosidad dinámica es función principalmente de la temperatura y presión. La presión es prácticamente despreciable, en tanto que con la temperatura la viscosidad de los líquidos disminuye. Se puede ejemplificar físicamente cuando nos damos cuenta que se requiere una mayor fuerza para revolver un aceite frío, que tiene una viscosidad mayor (un alto valor de μ), que la requerida para revolver agua, cuya viscosidad es menor. Esto es una indicación de la mayor tensión de corte en el aceite frío. Las unidades de la viscosidad dinámica en el SI son el Pascal segundo (Pa s), pero usualmente se expresa en centipoise (cP), 1 cP es 10^{-3} Pa s.

1.5.6.2 Viscosidad Cinemática.

Para cálculos en mecánica de fluidos es más conveniente relacionar a la viscosidad dinámica del fluido con su densidad. Como una convención, la viscosidad cinemática, ν (letra griega nu), se define como:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Las unidades de la viscosidad cinemática en el SI son (m^2/s), aunque en la práctica se utiliza el *centistoke* (cSt), 1cSt es 10^{-6} m^2/s .

1.5.7 Presión de vapor y Punto de ebullición.

En la superficie libre de un líquido a cualquier temperatura hay un constante movimiento de las moléculas que escapan de dicha superficie, es decir, el líquido se *evapora*. Si el líquido se encuentra en un recipiente cerrado, y sobre su superficie queda un espacio libre, este espacio se llega a saturar y ya no se evapora más líquido. Esta presión se denomina presión de vapor saturado o simplemente presión de vapor P_v , la actividad molecular depende de la temperatura, la presión de vapor a su vez es una función de la temperatura del líquido, por lo tanto puede llegarse a la ebullición ya sea por un incremento de la temperatura o por una reducción en la presión ⁽²⁵⁾. Es decir, cuando la presión arriba del líquido es igual a la presión de vapor del líquido ocurre la ebullición. La ebullición del agua por ejemplo, puede ocurrir a temperatura ambiente si se reduce la presión. Si la presión es reducida por debajo de la presión de vapor a una temperatura dada, habrá un cambio del estado líquido a la fase vapor. Este fenómeno puede ocurrir en los medidores que involucran una pérdida de presión en la medición de flujo, particularmente para líquidos con presión de vapor alta.

1.5.8 Tensión superficial y capilaridad.

La tensión superficial es una fuerza que produce efectos de tensión en la superficie de los líquidos, allí donde el fluido entra en contacto con otro fluido no miscible, particularmente un cuerpo sólido ó un gas.

Si consideramos la superficie S entre un líquido y un gas, Figura 1.3, una molécula A de líquido cuya esfera de acción esté sumergida, es atraída por igual por todas las que le rodean, es decir en todos los sentidos. Por otro lado, si consideramos una molécula B , cuya esfera de acción es secante a la superficie S , no estará sometida a la acción de fuerzas simétricas al no estar rodeada por moléculas de la misma naturaleza. Por lo que, B es atraída hacia la masa líquida por una fuerza normal a la superficie de separación y esta acción repercute en las moléculas vecinas, provocando reacciones tangenciales a la superficie S , que constituyen la tensión superficial. La dirección de dichas reacciones dependerá de que la superficie deformada sea cóncava o convexa.

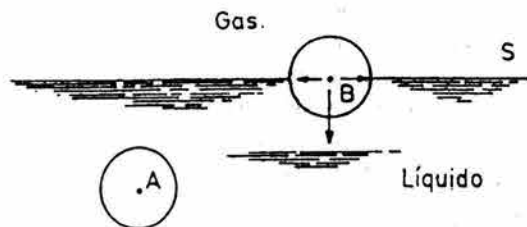


Figura 1.3. Tensión superficial.

La tensión superficial también explica los fenómenos de formación de menisco y el de la elevación del líquido en tubos capilares. La existencia de un contorno sólido modifica el equilibrio superficial en el caso de un líquido limitado por una pared, ya que además de las acciones entre las moléculas líquidas, ya mencionadas (cohesión), existen las que se ejercen entre las moléculas sólidas y líquidas (adherencia).

Si un tubo capilar (de diámetro pequeño), abierto por su parte inferior se sumerge en un líquido que moja el vidrio del tubo, el líquido subirá hasta una altura h por encima de la superficie libre.

Cuando el líquido no moja al vidrio, el menisco se encuentra por debajo de la superficie libre ver Figura 1.4, como es difícil determinar el ángulo, se considera más cómodo medir con una escala graduada en el vidrio.

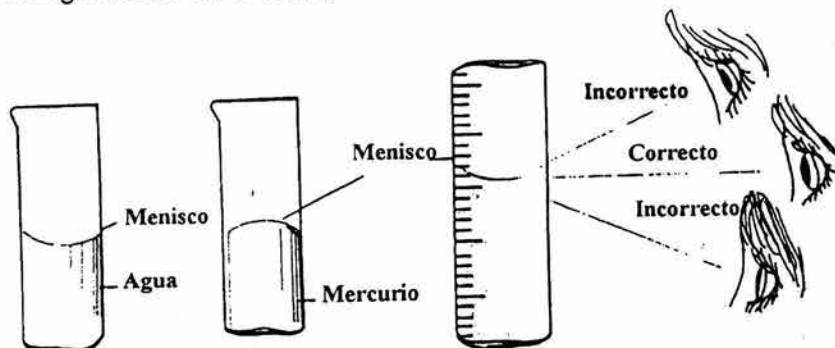


Figura 1.4. Lectura de manómetros con menisco.

1.6 Tipos de fluidos.

1. Newtonianos.

La relación que existe entre *esfuerzo cortante* y *gradiente de velocidad* se conoce como relación newtoniana (ver Figura 1.5). En general, los fluidos que obedecen tal relación se llaman fluidos newtonianos. En este tipo de fluidos la viscosidad es independiente de la velocidad de deformación.

2. No Newtonianos.

Se tienen dos principales clasificaciones de los fluidos no newtonianos: *independientes del tiempo* y *dependientes del tiempo*. Los fluidos independientes del tiempo tienen una viscosidad, a cualquier tensión de corte, que no varía con el tiempo. La viscosidad de los fluidos dependientes del tiempo, sí varía con él (ver Figura 1.5).

Se pueden definir varios tipos de fluidos independientes del tiempo:

- **Plásticos.** La viscosidad varía con la velocidad de deformación y se requiere un esfuerzo inicial para que empiece a fluir. Ejemplo: la salsa catsup.
- **Pseudoplásticos.** La viscosidad decrece con el incremento de la velocidad de deformación. Algunos ejemplos de este tipo de fluidos son el plasma sanguíneo, el polietileno fundido y las suspensiones acuosas de arcilla.
- **Dilatante.** La viscosidad se incrementa con el incremento de la velocidad de deformación. Algunos ejemplos de fluidos dilatadores son la fécula de maíz en etilenglicol, el almidón en agua.
- **Fluidos de Bingham.** En ocasiones conocidos como *fluidos de tapón de flujo*, éstos requieren el desarrollo de un nivel significativo de tensión de corte antes de que empiece el flujo. Algunos ejemplos de fluidos de Bingham son el chocolate, la mostaza, la mayonesa, la pasta dental, la pintura, el asfalto, algunas grasas y las suspensiones acuosas de ceniza de carbón o de sedimentos de aguas residuales.

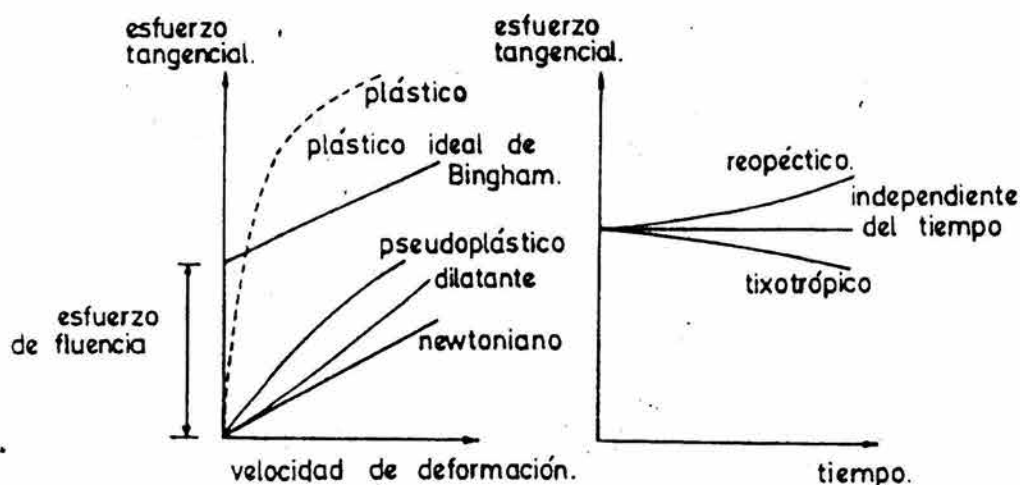


Figura. 1.5. Tipo de fluidos.

Los fluidos dependientes del tiempo son muy difíciles de analizar, debido a que su viscosidad varía con el tiempo, así como con el gradiente de velocidad y la temperatura. Los fluidos dependientes del tiempo se definen como:

- **Tixotrópicos.** Los fluidos tixotrópicos se hacen más fluidos si son agitados o deformados. La mayoría de ellos recupera su viscosidad original si se dejan en reposo. Cuando son deformados a una velocidad constante, su viscosidad se reduce con el tiempo. Ejemplos de fluidos dependientes del tiempo son algunos aceites de petróleo crudo a bajas temperaturas, la tinta de impresión, el nylon, algunas jaleas, la masa de harina y varias soluciones poliméricas.
- **Reopéxico.** Este tipo de fluido depende del tiempo y muestran propiedades opuestas a los fluidos tixotrópicos. A una velocidad de deformación constante, el esfuerzo de corte se incrementa con el tiempo. Ejemplo, Poliéster con un peso molecular de 2000.

1.7 Definiciones y características del flujo en tuberías.

Para analizar el tipo de flujo, es necesario entender claramente la terminología utilizada. En esta sección se definen y se ilustran varios de los términos técnicos más importantes. La clasificación de un fluido está vinculada con la manera que la velocidad varía en el campo del flujo. El movimiento de los fluidos se puede clasificar de muchas maneras, atendiendo a alguna de sus diversas características; por ejemplo, se pueden tener flujo turbulento o laminar, reales o ideales, reversibles o irreversibles, permanentes o no permanentes, uniformes o no uniformes, rotacionales, etc.

1.7.1 Número de Reynolds.

El comportamiento de los fluidos que fluyen a través de una tubería, se identifica a temperatura constante de forma experimental a cierto caudal y en cierto tiempo, por el número de Reynolds (**Re**). Éste se define como la relación entre las fuerzas de inercia (proporcionales a $vD\rho$) y las fuerzas viscosas (proporcionales a η). Es un número adimensional.

$$Re = \frac{v\rho D}{\eta}$$

Donde D es el diámetro de la tubería, ρ la densidad, v la velocidad del fluido del proceso y η es la viscosidad del fluido. Esto significa que el número de Reynolds indica que clases de fuerzas predominan en el flujo de un fluido. Cuando $vD\rho$ es relativamente grande el número de Re es grande y las fuerzas de inercia prevalecerán, pero cuando η es relativamente grande el número Re será pequeño y las fuerzas viscosas prevalecerán. La siguiente es una guía aproximada de los valores del número de Re para determinar el tipo de flujo⁽¹⁴⁾:

$Re < 2 \times 10^3$	Flujo laminar
$2 \times 10^3 < Re < 10^4$	Región de transición
$Re > 10^4$	Flujo turbulento

Lo que determina si un flujo es laminar o turbulento es en un fluido dado la velocidad y la configuración o tamaño del conducto. A medida que la velocidad aumenta el flujo

cambiará de laminar a turbulento, pasando por un régimen de transición. Los dos tipos de flujo ocurren en la naturaleza, pero el turbulento parece ser el más usual. Estos tipos de flujo se describen a continuación.

1.7.2 Flujo laminar y turbulento.

El **flujo laminar**, viscoso o de trayectorias paralelas, está regido por la ley de Newton de la viscosidad, la cual establece la relación entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación angular. En un flujo laminar, la acción de la viscosidad puede amortiguar cualquier tendencia turbulenta. El flujo laminar se muestra para un tubo circular en la Figura 1.6 (a). Aquí, las partículas se desplazan de forma altamente ordenada, conservando las mismas posiciones relativas en secciones transversales sucesivas, es decir que el fluido fluye en láminas o en capas. Así el flujo laminar en un tubo circular puede considerarse como un número de capas anulares: la velocidad de estas capas aumenta desde cero en la pared del tubo a un máximo en el centro de éste con esfuerzos viscosos de corte importantes entre las capas. La Figura 1.6 (b) muestra el perfil de velocidad resultante; éste gráfico de la velocidad v de las capas versus la distancia r de la capa al centro, y su forma es parabólica.

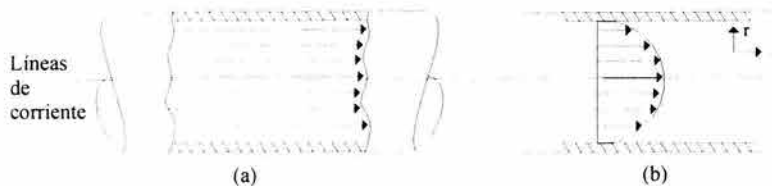


Figura 1.6. Flujo laminar. Las líneas indican la trayectoria de la partículas.

Si bien un flujo laminar resulta inestable en aquellas situaciones en que combinen baja viscosidad, alta velocidad o conductos de grandes dimensiones, transformándose en un flujo turbulento.

El **flujo turbulento**, da como resultado de la velocidad y la presión en un punto en particular del tubo las partículas están sujetas a pequeñas fluctuaciones aleatorias con el tiempo respecto de sus valores medios, como se ilustra en la Figura 1.7 (a). Es decir, el flujo turbulento es muy desordenado; cada partícula se mueve de forma aleatoria en tres dimensiones y ocupan diferentes posiciones relativas en secciones transversales sucesivas.

Las fuerzas de fricción viscosas que producen el movimiento ordenado en el flujo laminar, son mucho menores que en el flujo turbulento. La Figura 1.7 (b) muestra el típico perfil de velocidad del flujo turbulento en un tubo circular, el cual se obtiene tomando un punto r en el tubo y midiendo el promedio de tiempo del componente de la velocidad v a lo largo de la dirección de flujo en ese punto.



Figura 1.7. Flujo turbulento. Las líneas indican la trayectoria de las partículas.

1.7.3 Otros tipos de flujo.

- **Flujo ideal.** Es un fluido incompresible, no existe conversión de energía mecánica en energía térmica. Si un fluido ideal se encuentra inicialmente en reposo se puede demostrar que, subsecuentemente, todas las partículas continúan con la misma energía mecánica total. Un fluido sin fricción resulta no viscoso y los procesos en que se tenga escurrimiento son reversibles.
- **Flujo real.** En este flujo la viscosidad es inevitable en un fluido real está implícita la conversión de energía mecánica en energía térmica.
- **Flujo permanente.** Se caracteriza por una velocidad del flujo de masa y por el hecho de que a través de cualquier sección transversal al flujo todas las propiedades son constantes con respecto al tiempo. El flujo permanente real se encuentra únicamente en el flujo laminar. Se dice que el flujo permanente turbulento existe cuando la *velocidad media* del flujo en una sección permanece constante con el tiempo.
- **Flujo no permanente.** Ocurre cuando las condiciones en cualquier punto varían con el tiempo $\partial v / \partial t \neq 0$. Un ejemplo es el flujo de un líquido que se bombea a velocidad creciente a través de un sistema fijo, con un gasto constante.
- **Flujo uniforme.** Ocurre cuando, en todos los puntos, el vector velocidad es idéntico en magnitud y dirección, en cualquier instante. Esto es $\partial v / \partial s = 0$, en donde el tiempo se mantiene constante y s es el desplazamiento en cualquier dirección. Esta ecuación establece que no existe variación de vector velocidad en ninguna dirección a través del fluido, en cualquier instante. No se establece nada acerca de la variación, con el tiempo, de la velocidad en un punto.
- **Flujo no uniforme** ocurre cuando el vector velocidad varía de posición a posición en cualquier instante, es decir, $\partial v / \partial t \neq 0$. Un ejemplo es el flujo de un líquido por una tubería cónica o curva.
- **Flujo permanente uniforme.** Es el flujo de un líquido por una tubería recta horizontal, a velocidad constante.
- **Flujo no permanente uniforme.** Es el flujo de un líquido por una tubería recta horizontal, a velocidad variable.
- **Flujo permanente no uniforme.** Es el flujo de un líquido por una tubería cónica, a velocidad constante.
- **Flujo no permanente no uniforme.** Es el flujo de un líquido por una tubería cónica, a velocidad variable.

1.7.4 Definición de caudal volumétrico.

El caudal, gasto ó flujo volumétrico se denota por Q , el caudal es el volumen de fluido (V) que pasa a través de un área de sección transversal en un intervalo de tiempo definido (t). Así, por ejemplo, en una tubería de agua los litros por hora que circulan a través de un plano transversal a la tubería. Las unidades del caudal son m^3/s , en el SI.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1.1)$$

1.7.5 Velocidad de flujo.

Rara vez la velocidad del fluido es precisamente uniforme en la sección transversal de una tubería o canal. Por lo que se recomienda el uso de velocidades promedio. La velocidad promedio se define como

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1.2)$$

Donde Q es el caudal volumétrico en m^3/s y A el área de la sección transversal de la tubería por donde circula el fluido en m^2 .

1.7.6 Caudal Másico.

Con frecuencia se utiliza el término de gasto ó flujo másico se denota por w , este caudal es la cantidad de masa que pasa por un punto dado. El caudal másico se calcula multiplicando el caudal volumétrico (Q) por la densidad del fluido de proceso (ρ) que se esté utilizando.

$$w = Q\rho \quad (1.3)$$

1.8 ECUACIONES BÁSICAS.

Comenzaremos el estudio de los fluidos en movimiento con ecuaciones básicas que son aplicables a los volúmenes de control. Es más conveniente utilizar el concepto de un volumen arbitrario en el espacio, conocido como **volumen de control**. Debido a que los fluidos son capaces de deformarse y distorsionarse de manera continua, generalmente resulta muy difícil identificar y seguir el movimiento para todo instante de la misma masa del fluido. Además de que realmente estamos interesados no en movimiento sino en el efecto que causa algún dispositivo o estructura en movimiento global del fluido^(2,4).

1.8.1 Ecuación de continuidad – Conservación de masa.

Ambos energía y masa pueden entrar y salir de un volumen de control y cruzar la superficie de control de un sistema. Desde que nosotros estamos considerando un sistema de flujo estable, podemos expresar el principio de la conservación de masa, para este sistema se requiere que la masa del fluido en un volumen de control a cualquier tiempo sea constante⁽⁴⁾. El método para calcular la velocidad de flujo de un fluido en un sistema de conductos cerrados, depende del principio de continuidad.

Considere el tubo de la Figura 1.8, un fluido fluye de la sección 1 a la sección 2 con una rapidez constante. Esto es, la cantidad de fluido que pasa por cualquier sección en un cierto tiempo dado que es constante. En este caso se dice que tenemos un flujo constante. Ahora bien, si no se agrega fluido, se almacena o se retira entre la sección 1 y la sección 2, entonces la masa del fluido que pasa por la sección 2 en un tiempo dado, debe ser la misma que la que fluye por la sección 1, en el mismo tiempo. Lo anterior se puede expresar en términos de la rapidez del flujo de masa como:

$$M_1 = M_2$$

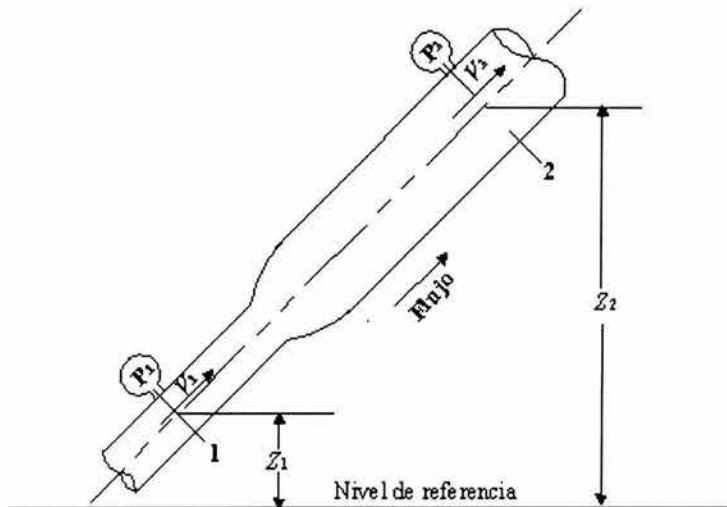


Figura. 1.8 Parte de un sistema de distribución de fluido.

O puesto que $M = \rho A v$, tenemos:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (1.4)$$

donde:

v = Velocidad de Flujo en [m/s]

A = Área de flujo en [m²]

ρ = Densidad del fluido de proceso en [kg/m³]

La ecuación 1.4 es un planteamiento matemático del principio de continuidad y se le conoce como **ecuación de continuidad**. Se utiliza para relacionar la densidad del fluido, el área de flujo y la velocidad de flujo en dos secciones de un sistema en el que existe un flujo estable. Es válida para todos los fluidos, ya sean gases o líquidos.

Si el fluido que se encuentra en el tubo de la Figura 1.8, es un líquido que puede ser considerado incompresible, entonces los términos ρ_1 y ρ_2 de la ecuación (1.4) son iguales. La ecuación, entonces, queda:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1.5)$$

O puesto que tenemos $Q = A v$, tenemos:

$$Q_1 = Q_2$$

La ecuación (1.5) es la ecuación de la continuidad aplicada a líquidos; establece que para un flujo estable, la rapidez de flujo de volumen es la misma en cualquier sección.

1.8.2 Ecuación de Bernoulli – Conservación de la energía.

Cuando se analizan problemas de flujo en conductos, existen tres formas de energía que siempre hay que tomar en consideración. Si se toma un elemento de fluido, como el que se muestra en la Figura 1.9, que puede estar dentro de un conducto de un sistema de flujo.

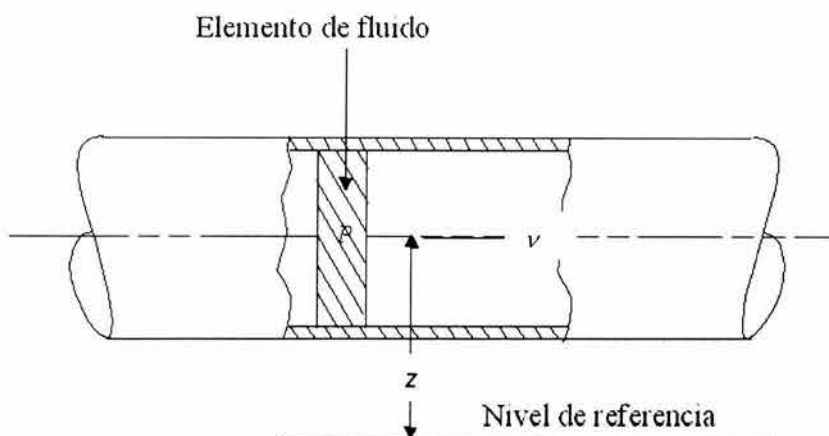


Figura 1.9. Elemento de fluido en un conducto.

Puede estar localizado a una cierta elevación z , tener una cierta velocidad v y una presión P . El elemento de fluido puede presentar las siguientes contribuciones de energía:

1. **Energía potencial (PE Potencial Energy).** Debido a su elevación, la energía potencial del elemento con respecto de algún nivel de referencia es:

$$PE = z \frac{g}{g_c} \quad (1.6)$$

Donde z es la energía de posición (m), g el valor de la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$) y g_c la constante gravitacional ($9,81 \text{ kg}\cdot\text{m/ kgf}\cdot\text{s}^2$).

2. **Energía cinética (KE Kinetic Energy).** Debido a su velocidad, la energía cinética del elemento es:

$$KE = \frac{v^2}{2g_c} \quad (1.7)$$

Debido a que la distribución de velocidades en una tubería tiene efecto sobre la energía cinética promedio, es preciso incluir un factor de corrección α que es función del número de Reynolds. Esta relación para un flujo completamente turbulento $\alpha=1.0$. Así, el incremento de energía cinética queda dado por la ecuación:

$$\Delta KE = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2\alpha g_c} \tag{1.8}$$

3. Energía de flujo. En ocasiones es conocida como energía de presión o trabajo de flujo, ésta representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una cierta sección en contra de la presión P . La energía de flujo se abrevia FE (Flow Energy) y se calcula a partir de la ecuación:

$$FE = \frac{P}{\rho} \tag{1.9}$$

La cantidad total de energía de estas tres formas que posee el elemento de fluido al nivel de referencia será la suma, representada con E :

$$\begin{aligned} E &= EP + PE + KE \\ &= z \frac{g}{g_c} + \frac{v^2}{2\alpha g_c} + \frac{P}{\rho} \end{aligned} \tag{1.10}$$

Cada uno de estos términos se expresa en unidades de energía, newton-metro (N•m) en el SI.

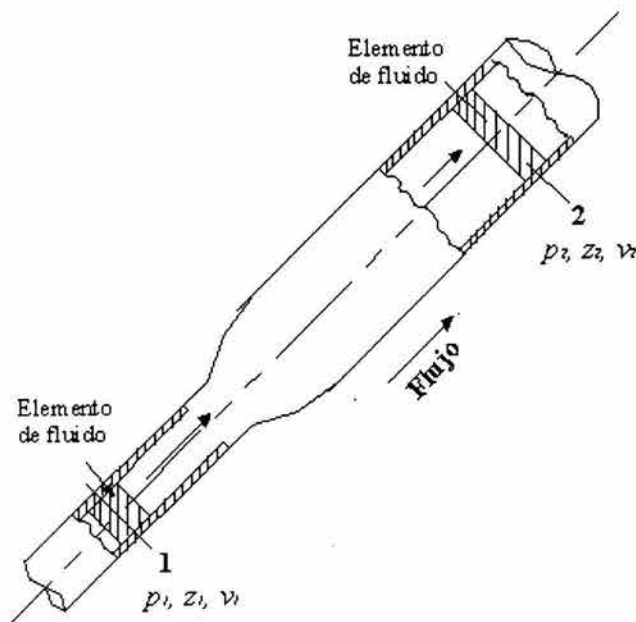


Figura. 1.10. Elementos utilizados en la ecuación de Bernoulli.

Considere ahora el elemento de fluido de la Figura 1.10, que se mueve de la sección 1 a la sección 2. Los valores de P , z y v son diferentes en las dos secciones. En la sección 1, la energía total es:

$$E_1 = z_1 \frac{g}{g_c} + \frac{v_1^2}{2\alpha g_c} + \frac{P_1}{\rho} \quad (1.11)$$

En la sección 2, la energía total es:

$$E_2 = z_2 \frac{g}{g_c} + \frac{v_2^2}{2\alpha g_c} + \frac{P_2}{\rho} \quad (1.12)$$

Si no se agrega energía al fluido o se pierde entre las secciones 1 y 2, entonces el principio de conservación de la energía requiere que se igualen las ecuaciones (1.11) y (1.12):

$$E_1 = E_2$$

$$z_1 \frac{g}{g_c} + \frac{v_1^2}{2\alpha g_c} + \frac{P_1}{\rho} = z_2 \frac{g}{g_c} + \frac{v_2^2}{2\alpha g_c} + \frac{P_2}{\rho} \quad (1.13)$$

A ésta se le conoce como **ecuación de Bernoulli (1.13)**.

Otro factor que se debe tomar en consideración es la resistencia que presenta el sistema (tubería, accesorios, etc.) al flujo del líquido. Esta resistencia se denomina factor de fricción total (**Hfs**) y también debe vencer la bomba.

Expresando las consideraciones anteriores matemáticamente se obtiene la siguiente expresión:

$$Wf = \Delta PE + \Delta KE + \Delta FE + Hfs_T \quad (1.14)$$

Esta expresión es aplicable a cualquier sistema de flujo de líquidos y se conoce como teorema de Bernoulli para líquidos. El término **Wf** representa el trabajo que debe efectuar la bomba para desplazar el fluido de un punto a otro venciendo las variaciones o factores de fricción que estén presentes en el sistema de flujo de líquidos.

Como esta ecuación es de tipo general, sus términos no son necesariamente positivos (exceptuando el término **Hfs** que siempre es positivo). Así el término ΔPE será positivo siempre que la altura final sea mayor que la altura inicial y viceversa. En general, puede considerarse que los incrementos son positivos si representan trabajo que debe realizar la bomba, y negativos si ayuda a efectuar este trabajo. Por consiguiente siempre que **Wf** sea mayor que 0, será necesario usar una bomba, y siempre que $Wf \leq 0$, el sistema podrá fluir sin necesidad de ella. Es decir, si el término **Wf** es negativo, éste representa el trabajo útil que puede efectuar el fluido sobre algún dispositivo mecánico.

1.8.2.1 Restricciones a la ecuación de Bernoulli.

Aunque la ecuación de Bernoulli es aplicable a una gran cantidad de problemas prácticos, existen algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta con el fin de aplicar la ecuación de manera correcta.

1. Es válida solamente para fluidos incompresibles, puesto que el peso específico del fluido se tomó como el mismo en las dos secciones de interés.
2. No puede haber dispositivos mecánicos entre las dos secciones de interés que, pudieran agregar o eliminar energía del sistema, ya que la ecuación establece que la energía total del fluido es constante.
3. No puede haber transferencias de calor hacia dentro o fuera del fluido.
4. No puede haber pérdidas de energía debido a la fricción.

En realidad, ningún sistema satisface todas estas restricciones. Sin embargo, existen muchos sistemas para los cuales solamente se tendrá un error despreciable cuando se aplica la ecuación de Bernoulli. Por otro lado, el uso de tal ecuación puede permitir una rápida estimación de un resultado, cuando eso es todo lo que se necesita.

1.8.2.2 Aplicaciones de la ecuación de Bernoulli.

Presentaremos varios ejemplos ilustrativos programados para mostrar el uso de la ecuación de Bernoulli. A pesar de que no es posible cubrir todos los tipos de problemas con un cierto método de solución, el planteamiento general de los problemas de flujo de fluido se describe a continuación.

Procedimiento para la aplicación de la ecuación de Bernoulli.

1. Determinar, qué variables de la ecuación conocemos y cuál es la que se va a determinar.
2. Decidir, cuál de las dos secciones del sistema se utilizará cuando se escriba la ecuación de Bernoulli. Se escoge una sección de la cual se conocen muchos datos. La segunda, es, por lo general, la sección en la cual se debe calcular algo.
3. Escribir, la ecuación de Bernoulli para las dos secciones elegidas en el sistema; Es importante que la ecuación se escriba en la dirección del flujo. Es decir, el flujo debe ir de la sección de la parte izquierda de la ecuación a la de la parte derecha.
4. Simplificar la ecuación, si es posible. Mediante la cancelación de los términos cuyo valor es cero o de aquellos que son los mismos en ambos lados de la ecuación.
5. Resolver la ecuación algebraicamente para el término deseado.
6. Sustituir las cantidades conocidas y calcular el resultado, tomar la precaución y asegurarse que las unidades sean consistentes a lo largo del cálculo.

1.8.3 Aplicación del factor de fricción y coeficientes de pérdida.

Para la resolución de sistemas de fluidos incompresibles (líquidos) en movimiento, se emplea la ecuación del Teorema de Bernoulli en su forma general.

La forma de aplicar esta ecuación, así como la evaluación de cada uno de sus términos, ya ha sido discutida, con excepción del término correspondiente a la pérdida de energía por concepto de fricción (H_{fs}), el cuál se discutirá a continuación.

Factor de fricción (f), por análisis dimensional se demuestra que este factor es función del número de Reynolds (Re) y de la rugosidad relativa de la pared de la tubería (ε/D).

La rugosidad relativa (ε/D), está dada por el coeficiente de la rugosidad absoluta (ε) (que es la altura efectiva de las irregularidades de pared del tubo) y el diámetro interno de la tubería (o equivalente) de tubería, y puede considerarse como una función del diámetro y tipo de material del tubo.

A un número de Reynolds dado, las tuberías rugosas tienen una pérdida de energía mayor que las lisas. Esta condición se explica fácilmente por el hecho de que la rugosidad perturba el flujo y genera una mayor turbulencia.

El conocimiento adquirido de experimentos cuidadosos, tales como los de J. Nikuradse resolvió el problema de cuantificar la rugosidad empleando tuberías con rugosidades creadas artificialmente en 1933, que han contribuido en el desarrollo de teorías semiempíricas y diagramas prácticos para los factores de fricción en tuberías. En 1935, L. Prandtl dedujo la siguiente ecuación para el factor de fricción (f) en flujo turbulento para tubería lisa:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log(Re \sqrt{f}) - 0.8 \quad (1.15)$$

Casi al mismo tiempo, T. Von Karman desarrolló la siguiente relación para el factor de fricción para un flujo completamente turbulento (tuberías muy rugosas):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7}\right) \quad (1.16)$$

Las ecuaciones (1.15) y (1.16) son las formas límite del factor de fricción en función del número de Reynolds o de la rugosidad relativa.

En 1939, C.F. Colebrook desarrolló una ecuación que combina los límites entre liso y rugoso, ecuaciones (1.15) y (1.16), y que cubre también la zona de transición. La ecuación de Colebrook es:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}}\right) \quad (1.17)$$

ó más convenientemente:

$$f = \frac{0.25}{\left\{ \log\left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \right\}^2} \quad (1.18)$$

La dificultad de la ecuación de Colebrook radica en que es implícita en f . Para subsanar la dificultad, L.F. Moody publicó en 1944 un diagrama de f en función de Re y (ε / D) basado en la ecuación de Colebrook. Este diagrama se muestra en el Apéndice D.4, se denomina diagrama de Moody. Este diagrama proporciona la rugosidad relativa equivalente (ε / D)

de diversos tipos de tuberías comerciales y se basa en la información que Colebrook publicó. Sin embargo, con el avance tecnológico de calculadoras y computadoras se recomienda utilizar esta ecuación, para evitar errores de lectura en el diagrama.

Las rugosidades absolutas (ϵ) dadas en el Apéndice D.1, son los valores que hacen que la ecuación de Colebrook funcione; Se obtuvieron "determinando" los valores de ϵ/D a partir de datos de caídas de presión en tuberías comerciales. Los valores de ϵ/D se aplican solamente en tuberías nuevas y limpias. Las tuberías que han estado en servicio durante periodos largos experimentan corrosión o formación de depósitos, y pueden llegar a tener una rugosidad equivalente que es de varios ordenes de magnitud mayor al valor señalado en el Apéndice D.1 y D.3. En virtud de la *incertidumbre* para evaluar la rugosidad equivalente, los valores de f de los diagramas de Moody tienen una precisión de alrededor del 10%. En consecuencia no se justifica emplear varias cifras significativas en los cálculos de flujo en tuberías.

El llamado Coeficiente de pérdida (K) esta en función de la relación longitud diámetro, el número de Reynolds y la rugosidad relativa. El problema de determinar K se simplifica tomando en cuenta que la pérdida de energía en una tubería es directamente proporcional a la relación longitud diámetro. La razón es que para un flujo totalmente desarrollado, el esfuerzo cortante en la pared es constante. El factor de fricción de Darcy se relaciona con el coeficiente de pérdida mediante

$$K = f \frac{L}{D} \quad (1.19)$$

Las pérdidas de energía, carga y presión se calculan en términos del factor de fricción de Darcy como

$$H_{fs} = f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{v^2}{2} \quad (1.20)$$

1.9 Tipos de cálculos de flujo en tuberías.

El análisis de ingeniería de flujos y sistemas de tuberías, normalmente tiene uno de los siguientes objetivos:

- Evaluar la pérdida de energía o la caída de presión para una tubería o sistema dado a un caudal volumétrico conocido;
- Calcular el caudal volumétrico o la velocidad del fluido para una tubería o sistema dado, a una pérdida de energía o caída de presión pre-establecida, o
- Determinar el tamaño adecuado de la tubería (diámetro para transportar un caudal volumétrico dado, con una pérdida de energía o caída de presión pre-establecida).

En un sistema completo, los cálculos deben incluir los efectos de los accesorios y válvulas y las pérdidas por fricción en la tubería.

En esta sección, se considerará sólo la pérdida de energía por fricción en la tubería. Si solamente se consideran las pérdidas por fricción en la tubería, los tres tipos de cálculos

se basan en la ecuación de Darcy-Weisbach, ecuación (1.19), donde los factores de fricción (f) se calculan con la ecuación de Colebrook (1.18), para el flujo turbulento. También se puede emplear la forma grafica equivalente de las fórmulas de factor de fricción: el diagrama de Moody. Para el flujo laminar usando la fórmula de Hagen-Poiseuille se pueden evitar los cálculos del factor de fricción.

$$H_{fs} = \frac{64}{\text{Re}} \left(\frac{L}{D} \right) \frac{v^2}{2} = \frac{32\mu vL}{\rho D^2} \quad \text{Flujo laminar (1.21)}$$

Sí el flujo es turbulento, los cálculos son más difíciles ya que las ecuaciones del factor de fricción y en el diagrama de Moody velocidad (v) y diámetro de la tubería (D) aparecen explícitamente. Ambos están en el número de Reynolds. El término D también aparece en la rugosidad relativa ε/D . Además de estas complicaciones la ecuación de Colebrook está implícita en f , lo que condujo a la popularidad al diagrama de Moody, mientras que la ecuación de Colebrook requiere iteraciones. Sin embargo, en la actualidad las iteraciones ya no son un serio problema como lo era antes, ya que las calculadoras y las computadoras realizan cálculos iterativos rápidamente.

1.9.1 Accesorios, válvulas y pérdidas locales.

Algunos componentes auxiliares que se emplean en un sistema de tuberías o conductos, son:

- Adaptadores para cambios en el tamaño de la tubería;
- Codos y curvas para cambiar la dirección del flujo (o tubería);
- Tes y accesorios laterales para dividir o mezclar corrientes;
- Válvulas para controlar el flujo, y
- Entradas y salidas, que son casos especiales de adaptadores donde se considera que las regiones corriente arriba (entrada) o corriente abajo (salida) son infinitas en extensión.

Todos estos componentes introducen perturbaciones que producen turbulencia y pérdida de energía mecánica adicionales a las que ocurren en el flujo de la tubería principal. Para calcular la pérdida de energía total en el sistema (H_{fs}), las pérdidas locales (ocasionadas por los accesorios corriente abajo) se suman a las pérdidas por fricción en la tubería.

1.9.2 Métodos para el cálculo de pérdidas por fricción total (H_{fs}).

Una alternativa al método del coeficiente de pérdida para calcular las pérdidas locales son:

- Método de longitudes equivalentes,
- Método de las K y
- Método simplificado

1.9.2.1 Método de longitudes equivalentes.

En este método, se "reemplaza" el componente por un tramo recto de tubería (o conducto) que produjera la misma caída de presión debida a fricción que producen los accesorios antes mencionados. A esta longitud de tubería se le llama longitud equivalente (L_e) de los accesorios.

Por lo tanto, la longitud equivalente total (L_T) será:

$$L_T = L_{eT} + L_{TRT} \quad (1.22)$$

Donde, L_{eT} es la longitud equivalente total que resulta de la suma de las longitudes equivalentes de cada accesorio presente en el sistema que se está estudiando, y L_{TRT} es la longitud de tramos rectos totales que componen el sistema de flujo que se está estudiando. Se recomienda registrar estos datos de acuerdo a la siguiente Tabla:

Tramo No.		D_N in	D_{EXT} mm	D_{INT} mm	D_{INT} m
Accesorio	Cantidad (#)	L/D	$L/D * D_{INT} = L_{EI}$	$L_{EI} * \# = L_{ET} (m)$	$L_{TR} (m)$
				$\Sigma L_{EIT} = (m)$	$\Sigma L_{TR} = (m)$

Puesto que la longitud equivalente de los accesorios o componentes es función del diámetro, normalmente se presentan los datos como (L/D), es decir, longitud equivalente dada en diámetros de tubería. Por lo tanto, para obtener la longitud equivalente se multiplica la (L/D) por el diámetro interno (D_{INT}) o bien se usa el nomograma del Apéndice D.5, uniendo (L/D) con D y leyendo la intersección correspondiente.

Los datos de (L/D) para los accesorios más comunes se encuentran en la referencia (Apéndice D.6).

Al igualar la pérdida equivalente por fricción en la tubería con la pérdida local real, se tiene que

$$f \frac{L_e}{D} \left(\frac{v^2}{2} \right) = K \left(\frac{v^2}{2} \right), \quad (1.23)$$

por lo que la longitud equivalente se calcula mediante

$$L_e = \frac{K}{f} D \quad (1.24)$$

Donde f es el factor de fricción en la tubería en la cual está instalado el accesorio (o componente).

Quedando así que las pérdidas de energía por fricción se calculan con la ecuación:

$$H_{fs} = f \frac{L_T}{D} \left(\frac{v^2}{2g_c} \right) \quad (1.25)$$

En la práctica los coeficientes de pérdida local o las longitudes equivalentes se obtienen de manuales o, para una mayor precisión, de las especificaciones del fabricante. Estos se obtienen generalmente por medio de la experimentación. Los coeficientes de pérdida (K) para algunos accesorios, tales como entradas y salidas, expansiones y contracciones, etc., pueden determinarse directamente pero la mayoría, si se desea usar la ecuación (1.23), es necesario transformar la L/D en K , usando el nomograma del Apéndice D.5, con el diámetro interno de la tubería.

1.9.2.2 Método de las K 's.

El flujo que atraviesa una válvula o accesorio en una línea de tubería causa una reducción de la altura, esta puede expresarse a la altura de velocidad. El coeficiente de pérdida K se define como la pérdida de la altura de velocidad.

Este método consiste en evaluar el coeficiente de pérdida de cada accesorio y la cantidad de cada uno de ellos presente en el sistema de flujo, para obtener un coeficiente de pérdida total K_T . Tomando en cuenta que en la mayor parte de las válvulas o accesorios las pérdidas por fricción a lo largo de la longitud real de flujo son mínimas por ello el coeficiente de pérdida K se considera independiente del factor de fricción y del número de Reynolds.

Por lo que, las pérdidas por fricción se calculan con la siguiente ecuación:

$$H_{fs} = \frac{K_T v^2}{2g_c} \quad (1.26)$$

1.9.2.3 Método simplificado.

Como la fricción representa una pérdida de energía, puede considerarse equivalente a una caída de presión del fluido (ΔP), obtenida experimentalmente, por lo que, dividiendo ésta entre la densidad (ρ), para dimensionar correctamente la ecuación, obtenemos:

$$H_{fs} = \frac{\Delta P}{\rho} \quad (1.27)$$

CAPITULO II

2.1 Definición de medidor de flujo.

Un medidor de flujo se define como un grupo de componentes vinculados que dará una señal relacionada con el caudal o cantidad de fluido en movimiento en un conducto, a pesar de la influencia de la instalación y el entorno de operación.

El objetivo de instalar un medidor de flujo es obtener una medida del caudal, en forma de una señal eléctrica y con una **incertidumbre** específica (ver Apéndice A).

2.2 Clasificación de Medidores de Flujo.

Existen varios métodos para medir el caudal según sea el tipo de caudal volumétrico o másico deseado. Entre los medidores más importantes Figuran los siguientes:

Sistema	Elemento	Transmisor	
Presión Diferencial	* Placa de orificio	Equilibrio de fuerzas Silicio difundido	
	* Tubo Venturi		Conectados a un tubo U o a elemento de fuelle
	* Tubo Pitot		
	* Tubo Annubar		
	* Codo		
	* Tobera		
* Boquilla de flujo (nozzle)			
Área Variable	* Rotámetro	Equilibrio de movimientos Potenciométrico Puente de impedancias	
Velocidad	* Turbina	Potenciométrico Piezoeléctrico	
	* Vortex		
	* Magnéticos		
	* Ultrasónicos <ul style="list-style-type: none"> ➤ Tiempo transitivo ➤ Efecto Doppler 		
Fuerza	* Medidor de blanco	Equilibrio de fuerzas Galgas extensométricas	
Desplazamiento Positivo	* Disco giratorio	Generador tacométrico o transductor de impulsos	
	* Pistón oscilante		
	* Pistón alternativo		
	* Medidor rotativo <ul style="list-style-type: none"> ➤ Ovalado ➤ Lobulado 		
Masa	* Térmico; Diferencia temperaturas en dos sondas de resistencia	Puente de Wheatstone	
	* Coriolis; Tubo en vibración		

Estos métodos de medición serán descritos más adelante.

2.3 SELECCIÓN DE MEDIDOR DE FLUJO.

La selección de un medidor de flujo comienza con el entendimiento total del porque la *medición* (ver Apéndice A) debe ser realizada. Las razones para la medición de flujo generalmente se dividen en cuatro categorías; control, custodia de la transferencia de flujo, indicación y monitoreo.

Relacionadas cercanamente con una aplicación específica están las propiedades del fluido las cuales deben ser medidas para los requerimientos y desarrollo del proceso, la naturaleza de la instalación del medidor de flujo, factores de costos, consideraciones de tipo ambiental y seguridad.

También hay otras propiedades que influyen la selección de un medidor de flujo como son la composición química, el lubricante, abrasivos y contenidos de sólidos en el fluido.

Sin embargo, hay diversos factores de selección que deben ser analizados detalladamente, para que la selección sea la más adecuada a nuestras necesidades.

2.3.1 Factores de selección.

Hay un número de factores que al menos requieren algún nivel de investigación cuando determinamos cual medidor de flujo se seleccionara para una aplicación.

En la actualidad hay aproximaciones analíticas y cada análisis está pensado para provocar y ayudar en la necesidad es dar soluciones más directas.

Una lista típica de factores de selección incluiría lo siguiente:

¿La medición será para masa o volumen?

¿Se va a medir líquido, gas, vapor ó hay mezclas ó están estas en combinación con sólidos?

¿El fluido es Newtoniano ó No-Newtoniano?

¿Se requiere caudal de flujo total ó parcial?

¿Qué señal es requerida?

¿Qué tipo de lectura se requiere?

¿Es el fluido corrosivo ó pasivo?

¿Cuáles son las restricciones ambientales?

¿Es el fluido limpio ó sucio?

¿Cuál es la potencia requerida de la bomba?

¿Qué rango es requerido? ; es decir, cuál es la razón de caudal de flujo máximo ó la razón de flujo mínimo.

¿Qué función se necesita? (Este generalmente se declara como exactitud)

¿Cuál es el costo?

¿Cuál es el mantenimiento requerido y quién lo va a realizar?

¿Cuáles son las temperaturas y presión de operación (normal y en los extremos)

¿Cuál es la caída de presión permitida? ; esto es, ¿qué consumo de energía habrá allí?

¿Cuáles propiedades del fluido deben ser consideradas? (Estas usualmente incluyen la viscosidad, el índice de viscosidad, densidad, compresibilidad, conductividad eléctrica, cualidades de lubricación, opacidad, etc.)

El problema se vuelve más difícil porque cada aplicación tiene diferentes prioridades por factores individuales, añadiendo una mayor complejidad para hacer la selección para la aplicación.

Hay sistemas expertos que están disponibles para llevar a cabo una selección, pero será necesario ordenar manualmente las opciones. La Tabla 2.1. construye un sistema experto que muestra criterios que se deben tomar en cuenta para llegar a seleccionar un medidor de flujo.

Los criterios de selección principales se presentan a continuación.⁽¹²⁾

Estándares de la Compañía	Instalación del medidor de flujo
Requerimientos legales	Limitaciones de espacio
Fase(s) del fluido(s) principal	Tubería para corriente arriba
Contención de sólidos	El componente más cercano corriente arriba
Factores de calibración	Nivel de vibración
Tipo de fluido –aire, metano, agua...	Exactitud de la lectura
Naturaleza del fluido –corrosivo...	Repetibilidad de la lectura
Forma y tamaño de tubería	¿Puede ser usado un microprocesador para linealidad?
¿Un indicador de flujo será suficiente?	Tiempo de respuesta del instrumento
¿Se va a medir el caudal de flujo o la cantidad de flujo?	Tipo de control de salida requerido
¿Es probable que el flujo cambie de dirección?	Obstrucción de flujo –perdida de presión
Caudal máx. y min.	Tiempo entre inspección/mantenimiento
Presiones máx. y min.	Confiabilidad
Temperaturas máx. y min.	Seguridad intrínseca
Densidad del fluido	Tendencia de calibración
Viscosidad del fluido	Condiciones externas -humedad, calentamiento.
¿El flujo es pulsante?	Costo
¿El fluido es transparente?	Proveedor
Material de la tubería	

Tabla 2.1. Criterios de selección de medidores de flujo.

2.4 Clasificación de los medidores de flujo por factores del proceso dominantes.

La manera más común de clasificar a los medidores de flujo, es por la tecnología de medición que éstos usan. Sin embargo, la selección de un medidor de flujo es superficial, si se basa solamente en el método de medición que este usa. La tecnología de medición, proporciona acceso a otras características que deberían ser investigadas.

Estas características forman la base para la clasificación de los medidores de flujo y facilitan el proceso de selección.

Algunas de las características básicas incluirán:

- 1) Tipo de medición, masa ó volumen;
- 2) La información proporcionada, flujo total ó parcial; y
- 3) El estado del fluido que el medidor de flujo puede manejar –líquido, gas, vapor ó pastas.

2.4.1 Medición de masa ó volumen.

Algunos procesos requieren información de flujo másico, mientras otros requieren información de flujo volumétrico. La clasificación de medidores de flujo basados en el tipo de medición que proporcionan, ya sea de masa ó volumen revela que: algunos medidores son clasificados tradicionalmente como tipo volumétrico, son de hecho detectores de velocidad, y algunos medidores también proporcionan la medición de masa o volumen.

Cuando se calibra el medidor, el área del medidor de flujo se determina y ahora es conocida. Sí en la tubería no hay obstrucción o no hay corrosión en el interior del medidor, el área de sección transversal permanece constante y la relación masa–volumen (densidad) es valida. La velocidad de percepción de los medidores de flujo se puede usar legítimamente para deducir el flujo volumétrico cuando se conocen las siguientes condiciones:

- 1) La velocidad percibida, es proporcional a la velocidad de flujo.
- 2) El área de sección transversal es medida, conocida y constante.

Los procesos que incluyen reacciones químicas y transferencias de calor usualmente requieren información de flujo másico. Hay, sin embargo, sólo dos tipos de medidores de flujo másico y con una extensa aceptación en la industria: medidor de flujo másico Coriolis y el tipo Térmico.

Para estos tipos de medidores se explicará su funcionamiento más adelante. Además, los medidores de masa se pueden utilizar para medir el caudal de flujo másico, se puede deducir el caudal volumétrico al multiplicarlo por la densidad del fluido.

2.4.2 Medición de caudal de flujo total o parcial.

Los procesos necesitan información del caudal de flujo ó el total de flujo acumulado, en algunos casos ambos tipos de información se requieren. Los medidores se pueden clasificar en dos; los que miden el flujo natural y los que miden el flujo totalizado.

Es posible traducir de un flujo parcial a un flujo total o viceversa. Sí, sólo se requiere la información del caudal de flujo ó el caudal de flujo totalizado, se debe dar preferencia a los medidores que naturalmente proporcionan dicha información (Apéndice B.1).

Algunos integradores pueden proporcionar información total utilizando cualquier señal analógica, raíz cuadrada o lineal para proporcionar el caudal de flujo requerido. Las unidades gravimétricas pueden ser totalizadas, cuando la densidad o la gravedad específica es conocida y no cambia con el tiempo, incluyendo un factor apropiado de escalamiento. Cuando hay cambios de densidad en una medición adicional o se requiere la deducción de la densidad, la señal compensada puede ser totalizada.

2.4.3 Estado del fluido.

Los medidores de flujo pueden ser clasificados por su habilidad de manejar varios tipos de fluidos. Una guía puede ser hacer la selección basada en la Apéndice B.2. Más allá, de los tipos de fluidos que se muestran en el Apéndice B.2, hay problemas de aplicación, cuando hay gas contenido en el líquido y donde la fase líquida se encuentra en una fase gaseosa. Los medidores de volumen manejan líquidos con gas contenido, el cual, es

considerado en el error del porcentaje de volumen del gas presente. La fase gaseosa se transporta, normalmente, a través del sistema de tuberías y a velocidades de fluido de al menos diez veces más grandes que la fase líquida. Si las gotas del líquido están presentes con la fase gaseosa, estas también son transportadas a velocidad alta, y el flujo puede ser muy erosivo.

2.4.4 Limpieza del fluido.

Hay una consideración cuando se hace la selección de un medidor de flujo para una aplicación específica del fluido. Si el medidor cuenta con partes en movimiento, la limpieza del fluido (o falta de esta) es un problema, como regla general, los medidores con partes en movimiento tienen menor tolerancia de sólidos, particularmente hacia las partículas fibrosas. Los medidores que presentan una obstrucción en la corriente de flujo, aun a través de las partes que no se mueven, requieren consideraciones específicas. En este caso, la "limpieza" se refiere a la presencia de partículas sólidas.

El conocimiento del tipo de partículas, su concentración y distribución en el fluido son importantes, pero igual de importante es su naturaleza.

- 1) ¿Es blando ó amorfo?
- 2) ¿Esta pegajoso?
- 3) ¿Es áspero y abrasivo?
- 4) ¿Es fibroso?
- 5) ¿Las fibras son largas o cortas?

El tipo de fluido que se medirá determina las opciones disponibles. Hay una clasificación de los tipos de fluidos comúnmente medidos en los procesos químicos industriales como:

- líquido limpio
- líquido sucio
- mezcla pastosa con partículas contenidas
- mezcla pastosa que contiene sólidos fibrosos
- líquido corrosivos
- líquido criogénico
- gas limpio
- gas sucio y
- gas con vapor

Esta clasificación se hizo ya que muchos de los medidores de flujo no pueden medir todos los tipos de fluidos; determinando el tipo de fluido se pueden ir eliminando y determinando, que tipo de medidor de flujo es el más adecuado para nuestras necesidades.

2.4.5 Dependencia del perfil del flujo.

Familias enteras de medidores de flujo se han clasificadas como sensitivos a la viscosidad, ó de manera más precisa dependientes del número de Reynolds. Todos los medidores se clasifican de esta manera excepto Coriolis, Magnético y algunos tipos de medidores térmicos.

El perfil de flujo no solamente es una función del número de Reynolds sino que también está influenciado por la forma y tamaño de la tubería. Todos los medidores que son clasificados como dependientes del número de Reynolds excepto los de desplazamiento positivo y los de área variable, tendrán requerimientos específicos de instalación para la tubería y así asegurar un perfil de flujo estable y conocido, ya que, es esencial para realizar una medición correcta de flujo.

2.4.6 Instalación de medidores de flujo.

Los requerimientos de instalación constituyen un criterio importante en la selección, particularmente, donde las unidades de procesos han comenzado a modernizarse. Los requerimientos tradicionales de instalación tal como, los tramos rectos de tubería corriente arriba, se muestran en el Apéndice B.3, también se incluyen factores como el desgaste inducido en las tuberías y su efecto en la operación del medidor.

Hay un incremento en el entendimiento de la interacción entre la instalación y el funcionamiento del medidor, si se instala de manera correcta se puede asegurar un nivel de funcionamiento aceptable.

Recientemente los medidores de flujo se han seleccionado en base a la exactitud o costo sin considerar la instalación y los requerimientos de mantenimiento. Los medidores que requieren de una instalación compleja, frecuentemente no se conoce su rango de exactitud al menos que se haya instalado de manera adecuada. Los costos, consideraciones de instalación y mantenimiento varían de acuerdo a las necesidades de cada medidor de flujo.

2.4.7 Tipo de señal requerida.

La señal característica de un medidor (ver Figura 2.1) puede ser un factor decisivo en algunas aplicaciones. La señal preferida, es la raíz cuadrada, la cual proporciona un cambio considerable en la amplitud de señal para un pequeño cambio en el caudal. La señal lineal, se recomienda cuando hay un rango amplio de operación y la exactitud de la totalización es importante. Las características logarítmicas se encuentran en algunos tipos de medidores de área variable y térmicos. Incidentalmente, la característica $5/2$ es para vertederos triangulares o de ranura-V y canales Parshall. El Apéndice B.4, es un método de selección de medidores de flujo de acuerdo al tipo de señal como primer criterio de selección.

2.4.8 Exactitud.

La calidad (exactitud) de la medición de flujo es un elemento importante en la selección de los medidores de flujo. La gráfica para la selección en el Apéndice B.5, usa como primer factor de selección la exactitud.

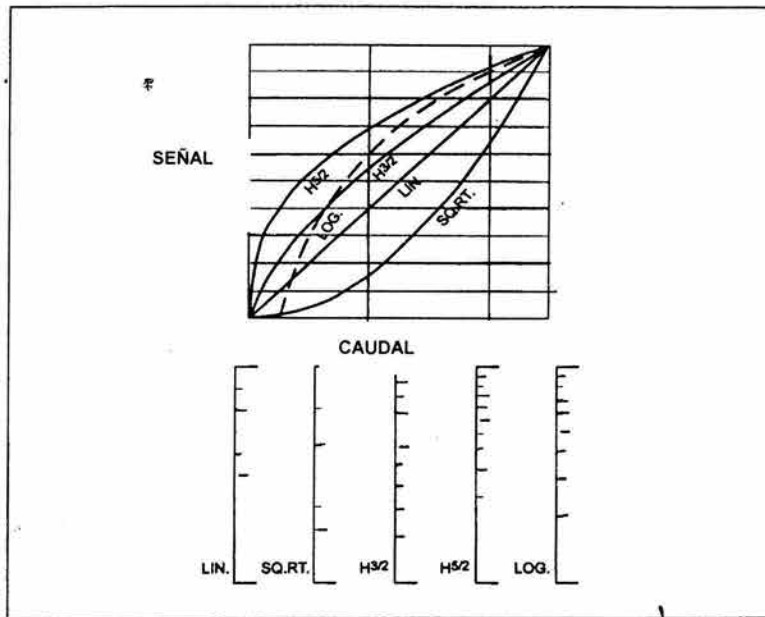


Figura 2.1. Señales características de medidores de flujo.

2.5 DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN DE FLUJO.

Muchos de los medidores de flujo se pueden agrupar dentro de cuatro categorías: presión diferencial, velocidad, masa y volumétricos.

- **Medidores de presión diferencial** la restricción del flujo de fluido para crear una diferencia de presión que proporciona una medición indirecta.
- **Medidores de velocidad de flujo** usa primero un aparato para generar una señal lineal con una velocidad de fluido que después se multiplica por el área de sección transversal del medidor para obtener el caudal volumétrico.
- **Medidores de flujo másico** miden directamente el caudal másico del fluido. Así que ningún valor para la densidad necesita ser asumido, como se debe hacer para otros tipos de medidores de flujo.
- **Medidores de flujo volumétrico** divide el flujo en volúmenes conocidos que son contados para proporcionar el flujo total.

2.6 MEDICIÓN POR PRESIÓN DIFERENCIAL O DE CABEZA VARIABLE.

Los aparatos de medición de presión diferencial representan el segmento más grande en el mercado de medición de flujo. Este método confía en medir la diferencia de presión que existe entre los lados corriente arriba y corriente abajo de una reducción en una corriente limitada.

De acuerdo con la ecuación de energía de Bernoulli, cuando una corriente de flujo sufre una reducción su energía cinética se incrementa, a cambio de la disminución de la energía potencial del fluido. Este principio se ilustra cuando una restricción comúnmente llamada **elemento primario**, se coloca en una tubería que contiene un fluido en

movimiento (Figura 2.2). La velocidad (energía cinética) del flujo que fluye a través de la restricción causa una disminución correspondiente en la presión estática (energía potencial).

La diferencia entre la presión corriente arriba y la presión corriente abajo se relaciona con el cuadrado de la velocidad del flujo, una ecuación que en parte se define por el tipo de restricción seleccionada. Una vez que se mide la diferencia de presión, se puede medir el caudal volumétrico o másico tomando en cuenta el diámetro de la tubería y la forma de la restricción y de la tubería adyacente, junto con suposiciones hechas para algunas propiedades del fluido. Algunas de estas correcciones están consideradas en un simple factor conocido como **coeficiente de descarga (C_D)**, el cual se deriva de pruebas de flujo de laboratorio como la relación de flujo real y flujo teórico. El coeficiente de descarga es adimensional y depende del número de Reynolds en la tubería y de la relación β , que es la relación entre el diámetro de la tubería y el diámetro de restricción.

$$C_D = C_D(Re, \beta)$$

La relación entre el coeficiente de descarga del medidor de flujo y el número de Reynolds y la relación β debe ser obtenida experimentalmente.

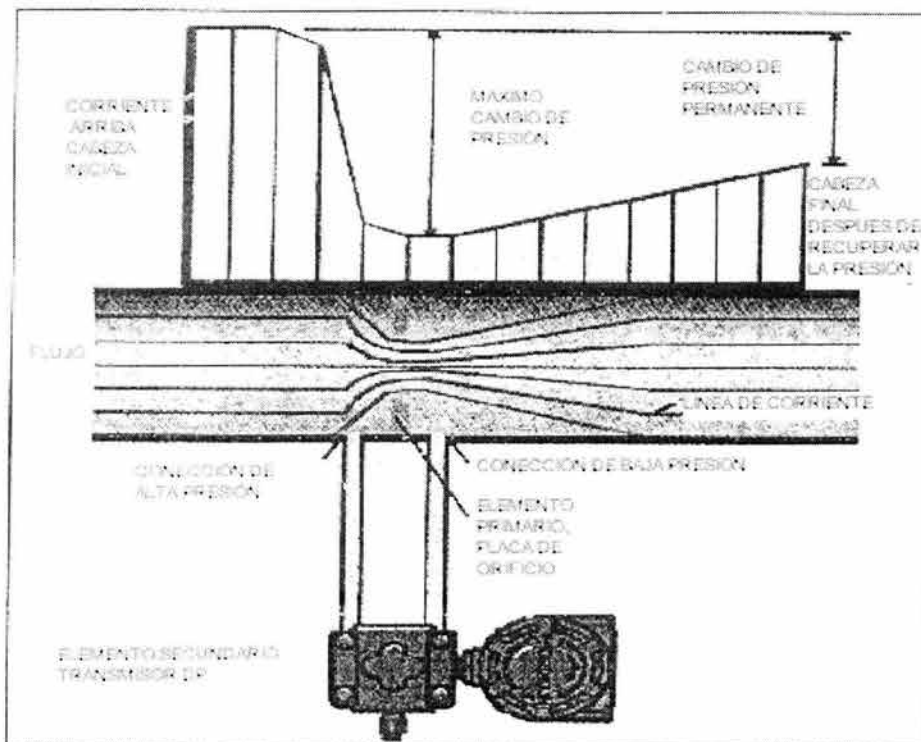


Figura 2.2. Flujo a través de una reducción produce una diferencia de presión la cual es proporcional al caudal.

El **elemento secundario** en medidores de flujo de presión diferencial (DP), es el transmisor de la diferencia de presión, que proporciona una salida (resultado)

proporcional para ambos, la DP o el caudal de flujo. La instrumentación basada en la medición de DP debe ser capaz de calcular la raíz cuadrada de la diferencia de presión medida para poder proporcionar una salida lineal con el caudal.

Los métodos de extracción mecánica análoga de la raíz cuadrada utilizados en el pasado fueron imprecisos y magnificaban los errores, pero estos han sido virtualmente eliminados en años recientes, ya que muchos transmisores ahora son microprocesadores. Sin embargo, el rango (el caudal más alto al más bajo, que el medidor puede medir exactamente) es generalmente limitado 3:1, utilizando la combinación del transmisor tradicional DP y la placa de orificio. Esto se debe en mayor parte debido a cambios no compensados en el coeficiente de descarga.

Siempre hay que mantener en mente que la inexactitud de la medición de flujo frecuentemente proviene de la falla para corregir las diferencias entre las condiciones supuestas de diseño y las condiciones del flujo actual.

En el caso de los líquidos las variaciones muy grandes en la presión o temperatura también se deben compensar, si la exactitud es importante.

Sin embargo, el desarrollo de transmisores multivariados de DP ha cambiado. Estos nuevos transmisores combinan tres sensores de medición de DP, presión y temperatura en una sola unidad, más un microprocesador para calcular el flujo másico, un trabajo que se dejaba para el sistema de control o para un programa para el cálculo de flujo de masa.

Los transmisores multivariados también permiten un mejor ambiente en la regulación en una planta por la reducción del número de entradas del proceso. Los datos en una auditoría se reducen al usar un solo transmisor en lugar de tres y los medidores usan un protocolo de comunicación común, tal como HART o los estándares Fieldbus que pueden alimentar automáticamente esta información en la base de datos.

2.6.1 Medida de la presión estática.

Para obtener una medida precisa de la presión estática en un fluido en movimiento es importante que el medidor se ajuste perfectamente a las líneas de corriente de tal manera que no se produzcan perturbaciones en el flujo. En un tramo recto de conducto se suele medir la presión estática uniendo al piezómetro un medidor de presión o un manómetro de tubo en U. La abertura del piezómetro debe estar perpendicular a la superficie y al ras de la misma. Cualquier saliente, dará lugar a un error. Cuando se mide la presión estática en una tubería es mejor tener dos o más aberturas alrededor de la periferia de la sección para tener en cuenta posibles imperfecciones en la pared. Por esta razón se utiliza un anillo piezométrico. Para calcular la diferencia de presión utilizaremos la siguiente ecuación:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = h(\rho_m - \rho) \frac{g}{g_c} \quad (2.1)$$

donde:

- h = diferencia de alturas manométrica.
- ρ_m = densidad del líquido manométrico.
- ρ = densidad del fluido del proceso.
- g = gravedad local.
- g_c = constante gravitacional local.

2.6.2 Placa de orificio.

El elemento de medición primario más sencillo se conoce como placa de orificio, además de su bajo costo. Se trata de una placa metálica de espesor relativamente pequeño, la cual se inserta en la tubería y presenta una restricción, actuando como un dispositivo primario, ésta restringe el flujo del fluido para producir una presión diferencial a través de la placa (ver Figura 2.3). El resultado es una alta presión corriente arriba y una baja presión corriente abajo, la cual es proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad del flujo. El flujo cuando interacciona con la restricción cambia su energía potencial (presión) en energía cinética (velocidad) al pasar por la restricción. La forma que describe el flujo al pasar por el orificio se conoce como vena contracta, como se muestra en la Figura 2.4.

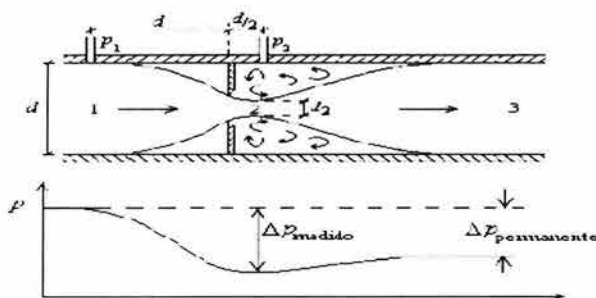


Figura 2.3. Presión diferencial creada por la placa de orificio.

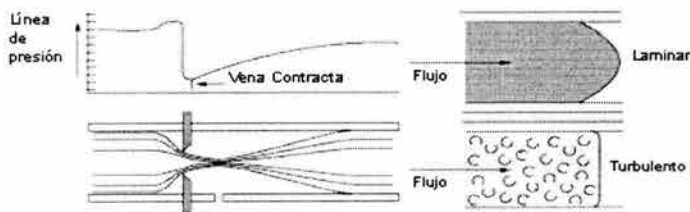


Figura 2.4. Vena contracta.

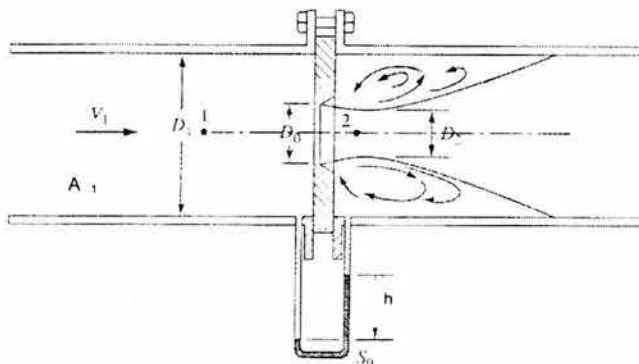


Figura 2.5. Placa de orificio

El teorema de Bernoulli describe el funcionamiento de la placa de orificio para flujo incompresible, como sigue (ver Figura 2.5) . Entre las secciones 1 del chorro y su vena contracta, la sección 2 es

$$\frac{v_1^2}{2g_c} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2g_c} + \frac{P_2}{\rho} \quad (2.2)$$

v_1 y v_2 , se relacionan por medio de la ecuación de continuidad

$$v_1 = v_2 \cdot \frac{A_2}{A_1} \quad (2.3)$$

sustituyendo la ecuación (2.3) en (2.2) y obteniendo la velocidad teórica de la vena contracta (sección 2):

$$v_2 = \sqrt{\frac{2g_c(P_1 - P_2)}{\rho[1 - (A_2/A_1)^2]}} \quad (2.4)$$

entonces el caudal teórico Q_t quedara de la siguiente forma:

$$Q_t = A_2 v_2 = A_o \sqrt{\frac{2g_c(P_1 - P_2)}{\rho[1 - (A_2/A_1)^2]}} \quad (2.5)$$

En realidad las aproximaciones que se han efectuado hasta conseguir la ecuación (2.5) hacen que el verdadero caudal se aleje del obtenido por la ecuación por lo que será necesario calibrar el medidor de flujo mediante la determinación experimental de un coeficiente de descarga C_D , de forma que el caudal real vendrá dado por:

$$Q = A_2 v_2 = C_D A_o \sqrt{\frac{2g_c(P_1 - P_2)}{\rho[1 - (A_2/A_1)^2]}} = C_D A_o \sqrt{\frac{2g_c(\Delta P)}{\rho[1 - (A_2/A_1)^2]}} \quad (2.6)$$

Donde:

Q = Caudal volumétrico en el medidor en $[m^3/s]$.

C_D = Coeficiente de descarga

A_o = Área del orificio en $[m^2]$.

g_c = Constante gravitacional en $[kg \cdot m / kgf \cdot s]$.

ρ = Densidad del fluido de proceso en $[kg/m^3]$.

A_2 = Área del orificio en $[m^2]$.

A_1 = Área de la tubería en $[m^2]$.

ΔP = Presión diferencial en $[kgf / m^2]$.

La predicción de los coeficientes de descarga en placas de orificio han requerido de una exhaustiva investigación y trabajo experimental por parte de los principales institutos involucrados en la medición de flujo de fluidos, el Apéndice D.2a reporta lo valores de C_D

para placa de orificio. Sin embargo, una ecuación generalizada para evaluar el coeficiente de descarga de un medidor de flujo de orificio fue desarrollada por el científico Francés J. Stloz, y fue aceptada por la Organización Internacional de Normas (ISO) y ASME para líneas de 2" en adelante, dicha ecuación se muestra enseguida:

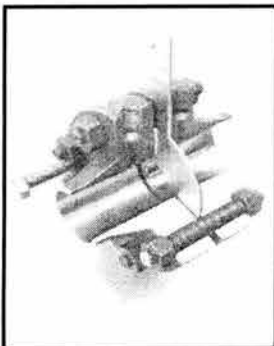
$$C_D = 0.5959 + 0.0312 \cdot \beta^{2.1} - 0.1840 \cdot \beta^8 + \frac{0.0900 \cdot L_1 \cdot \beta^4}{(1 - \beta^4)} - 0.0337 \cdot L_2 \cdot \beta^3 + \frac{91.71 \cdot \beta^{2.5}}{Re^{0.75}} \quad (2.7)$$

donde:

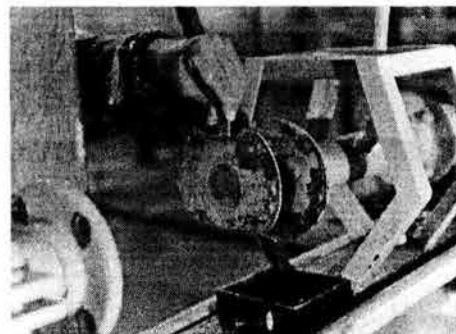
- β = relación entre el diámetro del orificio y el diámetro de la tubería (d/D).
- L_1 = corrección dimensional para localización de las tomas de corriente arriba.
 - = l_1/D relación que existe entre la distancia de la toma de presión corriente arriba respecto a la placa de orificio.
- L_2 = corrección dimensional para localización de las tomas de corriente abajo.
 - = l_2/D relación que existe entre la distancia de la toma de presión corriente abajo respecto a la placa de orificio.
- Re = número de Reynolds.

Para calcular el diámetro del orificio de una placa es preciso resolver una serie de ecuaciones matemáticas, se realizan en función de las condiciones normales de operación, determinadas por el rango de valores de presión, temperatura y velocidad de flujo a las que usualmente operará la aplicación de flujo en particular, lo cual es un trabajo complejo y tedioso. Por fortuna, en la actualidad se cuenta con una serie de productos de software que realizan estos cálculos con rapidez y muy poca intervención del usuario y debido al objetivo de este trabajo no se mostraran las ecuaciones matemáticas para este cálculo.

La placa de orificio es fácil de instalar y también es fácil de remover para inspección, ver Figura 2.6(a). La erosión, corrosión y otros daños son claramente observables como se muestra en la Figura 2.6(b). El diámetro exterior de la placa es tal que permite que ésta pueda montarse entre los tornillos de la brida. Tiene una oreja con los datos grabados, que en el montaje sobresale de la brida para su identificación. El diámetro del orificio se identifica generalmente con una letra " d " y la relación d/D , donde D es el diámetro interior de la tubería, se denomina "**relación Beta**" (β).



(a)



(b)

Figura 2.6.(a) Instalación de la placa de orificio, (b) inspección de la placa de orificio.

La presión diferencial causada por el flujo del fluido en una placa de orificio bajo condiciones particulares, es fácil y exactamente reproducible cuando se presentan las mismas condiciones y con el mismo fluido. El tamaño del orificio es importante, ya que determina el grado de restricción que habrá en la línea. Un orificio grande presenta una restricción baja y, en consecuencia, una presión diferencial de baja magnitud. Por otro lado, un orificio pequeño presenta una gran restricción y una presión diferencial elevada.

La magnitud de la presión diferencial desarrollada a través del orificio no sólo depende del diámetro del mismo, sino de algunas características físicas inherentes al fluido o a las condiciones de operación. Entre las primeras, las más importantes son la densidad y la viscosidad; entre las segundas, la temperatura y la presión. También se debe considerar si el fluido es un líquido, un gas o un vapor, y cada uno de ellos tiene un comportamiento muy particular.

2.6.2.1 Tomas de presión.

En la técnica de medición de presión diferencial localizar adecuadamente las tomas de presión depende de la forma de la vena contracta que se forma cuando el fluido pasa a través del orificio (reducción); el punto de alta presión se puede localizar desde varios diámetros de tubería hasta pocos milímetros antes de llegar a la placa de orificio. El punto de baja presión tiene una localización que varía en función de $\beta = d/D$.

Hay cinco localizaciones de tomas de presión para tomar las mediciones de la presión diferencial a través de los elementos primarios: brida, esquina, vena contracta, radio y tubería.

Tomas en brida. Estas tomas de presión se localizan a una pulgada corriente arriba y a una pulgada corriente abajo del orificio eliminándose así los posibles errores de localización en campo (Figura 2.7).

Es el método más utilizado, para tomas de tuberías de 2" de diámetro y mayores. Esta localización permite la inspección y limpieza, también estas tomas no son recomendadas para tuberías menores de 2" de diámetro y de ninguna manera deben usarse en tuberías menores de 1½", debido a que la vena contracta puede formarse a menos de 1" corriente abajo a partir de las caras de la placa de orificio. A varios diámetros de tubería de distancia más allá de estos la vena contracta tiende a ser inestable por lo que no es adecuado para la medición de la presión diferencial.

Tomas en esquina. Estas tomas son muy similares a las tomas en brida, excepto que la presión se mide en la "esquina", entre la placa de orificio y la pared de la tubería. El principal inconveniente, son los espacios tan pequeños de medición, los cuales fácilmente se pueden tapar. Se utilizan en tuberías con diámetro menor de 2" (Figura 2.7).

Tomas en la vena contracta. La toma de alta presión, está localizada a una distancia de un diámetro de tubería corriente arriba de la placa de orificio y la toma de baja presión, está localizada en el punto de mínima presión estática, o sea en la sección de la vena contracta, ver Figura 2.7. Teóricamente ésta es la localización óptima en la cual se genera la máxima presión diferencial. Tiene el inconveniente que las tomas se localizan en campo con la consiguiente probabilidad de error debido a que la localización de la vena contracta varía con la relación beta y por lo tanto está sujeta a error si la placa se cambia.

Las tomas en vena contracta están limitadas a tuberías de 6" y mayores dependiendo del libraje y dimensiones de la brida. Es bastante usada en mediciones de flujo de vapor. Las perforaciones para las tomas de presión diferencial deben tener superficies lisas, ser ligeramente redondeadas en los extremos y ser rectas desde la entrada por una longitud no inferior a $2 \frac{1}{2}$ veces el diámetro de la toma.

Tomas en radio. Las tomas en radio son similares a las tomas en vena contracta, excepto que la toma se localiza a un radio (medio diámetro) corriente abajo a partir de la placa de orificio. Esto prácticamente asegura que la toma no se encuentre en una región inestable. La toma de alta presión se localiza a un diámetro corriente arriba. Actualmente las tomas en radio son consideradas superiores a las tomas en vena contracta porque simplifican la localización de las tomas de presión y no varían con los cambios de beta. Las tomas en radio están limitadas a tuberías de 6" y mayores dependiendo del libraje y dimensiones de la brida.

Tomas en tubería. En estas tomas la de alta presión está localizada a $2 \frac{1}{2}$ diámetros de tubería corriente arriba y la de baja presión a 8 diámetros corriente abajo de la placa de orificio, ver Figura 2.7.

Este tipo de tomas no se usa normalmente sólo cuando es necesario instalar un medidor de orificio en una tubería existente y no se puede usar tomas en radio o en vena contracta.

La localización exacta de las tomas a partir de la placa de orificio no es crítica, pero los efectos de la rugosidad de la tubería, y las inconsistencias dimensionales son más severas. La incertidumbre en la medición es 50% mayor con las tomas en tubería que con las tomas cercanas a la placa de orificio.

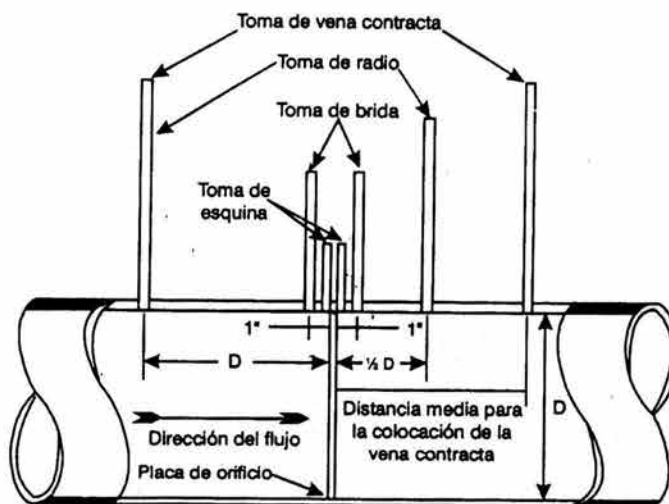


Figura 2.7. Tomas de presión.

2.6.2.2 Tipos de placa de orificio.

Existen tres tipos de placas de orificio:

- Placas de orificio concéntricas de perfil cuadrado y de perfil cuadrante
- Placas de orificio excentricas y
- Placas de orificio segmentales.

a.1) Placa de concéntrica de perfil cuadrado.

La placa de orificio concéntrica es la más común (Figura 2.8), puede fabricarse en una gran variedad de materiales, siendo los más comunes los aceros inoxidable. Una placa con un orificio circular concéntrico se monta entre bridas a una tubería. El orificio tiene un diámetro más pequeño que el diámetro interior del tubo (normalmente entre 30 y 75 % del diámetro). Cuando la placa puede localizarse en forma vertical para medición de flujo descendente se prefiere la placa de orificio concéntrica debido a la gran exactitud de los coeficientes. En este caso, el orificio concéntrico en una tubería vertical con el flujo en dirección ascendente es preferido por su gran exactitud, si una localización adecuada está disponible. El grueso de la placa de orificio varía desde 1/8" hasta 1/2", dependiendo del tamaño de la tubería, temperatura del fluido y de la presión diferencial.

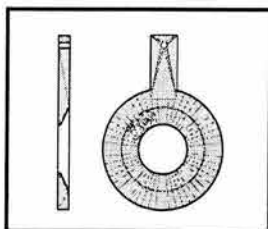


Figura 2.8. Placa de Orificio Concéntrica de Perfil Cuadrado.

Cuando el fluido a medir es un líquido con gas o un gas o vapor con líquido, la placa de orificio tiene un pequeño orificio en la parte inferior o superior. En general, los orificios de drene o venteo no son considerados debido a que pueden taponarse, por lo tanto no son recomendables. El diámetro del agujero de drene, depende del diámetro del orificio.

a.2) Placa de orificio concéntrica de perfil cuadrante

La placa de orificio de perfil cuadrante es muy utilizada cuando se tienen fluidos muy viscosos o cuando se presenta flujo a baja velocidad (Figura 2.9). El fluido debe ser limpio ya que el orificio es concéntrico. Este tipo de placa fue desarrollado para extender la capacidad de los medidores de flujo en la región donde se encuentran bajos números de Reynolds (50 a 10000) y donde ni las placas convencionales ni los tubos Venturi pueden usarse. Se prefiere utilizar las tomas en brida para la placa de perfil cuadrante, pero las tomas en esquina y radio también se pueden utilizar con los mismos coeficientes de flujo. En tuberías grandes se recomiendan las tomas en brida, pero las tomas en vena contracta también se pueden usar.

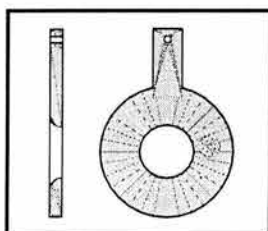


Figura 2.9. Placa de Orificio Concéntrica de Perfil Cuadrante.

b) Placa de orificio excéntrica

La placa de orificio excéntrica de perfil cuadrado se muestra en la Figura 2.10. Esta placa tiene una perforación excéntrica, la cual es tangente a la superficie superior de la tubería cuando el fluido es un gas, y tangente a la superficie inferior cuando es un líquido. El diámetro del orificio es igual al 98% del diámetro del tubo. Durante la instalación no debe cubrirse ninguna porción del orificio por la brida o por el empaque. Se usa especialmente para fluidos que tienen sólidos en suspensión.

El orificio excéntrico tiene las mismas ventajas indicadas para el orificio segmental, pero no permite el libre drenaje sobre muchas de las circunferencias de la tubería. En cuanto a lo demás el orificio excéntrico es superior al segmental

Los coeficientes para los orificios concéntricos están dados para localizaciones de tomas a 180° y 90°, medidos desde el punto de tangencia. Esto permite el uso en líquidos con sedimento sin la necesidad de crear puntos altos en la tubería de medición, donde se pueda acumular vapor.

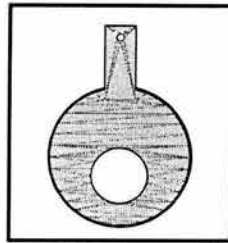


Figura 2.10. Placa de Orificio Excéntrica.

La relación d/D está limitada a 0.3 y 0.8, el número de Reynolds está limitado a $2000D$, donde D es el diámetro de la tubería en pulgadas, pero no menores a 10000.

Se recomiendan las tomas en brida pero las tomas en vena contracta pueden usarse en tuberías grandes. Las tomas deben localizarse en el cuadrante opuesto al orificio.

El tamaño mínimo para este tipo de placas es de 4", sin embargo puede construirse en tamaños menores siempre que el orificio no requiera biselado

c) Placa de orificio segmental

La placa de orificio segmental se muestra en la Figura 2.11. El área del orificio segmental es equivalente al área del orificio concéntrico. La abertura es un segmento de un círculo. El diámetro de la abertura normalmente es del 98% del diámetro de la tubería. La sección circular de la abertura es concéntrica a la tubería. Este tipo de placa de orificio debe estar exactamente centrada para asegurar que la parte de la abertura no será cubierta por pequeñas irregularidades en la tubería o instalaciones excéntricas. Para la placa de orificio segmental, se usa un valor equivalente para la relación de diámetros β igual a la relación de diámetros de una placa de orificio circular la cual tiene una abertura igual en área, al área del orificio segmental.

Las características de la placa de orificio segmental la hacen aplicable para servicios especiales, porque previene la acumulación de sólidos en el lado de la entrada; elimina el daño por materiales externos al lado del tubo sobre el cual la abertura es localizada. También es usado para medición de vapor húmedo, líquidos que contienen sólidos granulares en suspensión o agua con aceites, cuando la medición debe efectuarse en una tubería horizontal.

Cuando se deban medir líquidos que contengan gas o vapor en una tubería horizontal, se debe usar la placa de orificio segmental con la abertura en la parte superior del tubo. Cuando el orificio se puede localizar verticalmente, debe cambiarse a placa de orificio concéntrica. La placa de orificio segmental no debe ser usada para medir líquidos que contengan sólidos largos o sólidos que tengan una densidad cercana a la del líquido que los contiene. Esta placa se afecta de igual manera que la placa de orificio concéntrica por depósitos sobre la cara o los bordes del orificio. En tales casos se recomiendan los medidores magnéticos para fluidos conductivos, o el medidor Venturi para fluidos no conductivos.

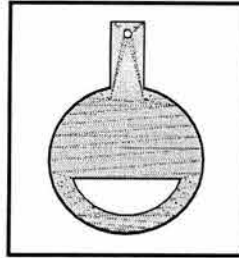


Figura 2.11. Placa de Orificio Segmental.

La beta recomendada para el orificio segmental puede expresarse como $\beta \sqrt{a/A}$, donde a es el área del segmento y A es el área interna de la tubería mientras que se encuentre entre 0.3 y 0.8. El tamaño mínimo de la tubería para la instalación de este tipo de placas es de 4". La relación d/D está limitada a 0.3 y 0.8, el número de Reynolds está limitado a $2000D$, donde D es el diámetro de la tubería en pulgadas, pero no menores a 10000. Se recomiendan las tomas en brida pero las tomas en vena contracta pueden usarse en tuberías grandes.

2.6.3 Medidor Venturi.

El medidor venturi se usa para medir el caudal que pasa por una tubería. El Tubo de venturi es un dispositivo que origina una pérdida de presión al pasar por él un fluido.

Por lo general es una pieza fundida (Figura 2.12), que consta de (1) una parte cilíndrica del mismo diámetro que la tubería, esta parte tiene un anillo de bronce con una serie de orificios piezométricos para medir la presión estática; sigue después (2) una región cónica convergente que termina en (3) una garganta cilíndrica con anillos de bronce que contiene otra serie de orificios piezométricos; y a continuación sigue (4) una parte cónica divergente (difusor), la cual desemboca en una sección cilíndrica del mismo diámetro de la tubería. El cilindro de alimentación y el difusor terminan en unas juntas soldadas. La entrada convergente tiene un ángulo incluido de alrededor de 21° , y el cono divergente de 7 a 8° . La finalidad del cono divergente es reducir la pérdida global de presión en el medidor; su eliminación no tendrá efecto sobre el coeficiente de descarga. El tamaño de un venturi se da con el diámetro de la tubería y la garganta. Para obtener resultados adecuados el venturi debe estar precedido al menos de una longitud de 10 diámetros de tubería recta. En el flujo de la tubería a la garganta del aparato, la velocidad aumenta mucho y la presión disminuye en forma correspondiente. Se ha demostrado que la magnitud del caudal para flujo incompresible es función de la lectura del manómetro.

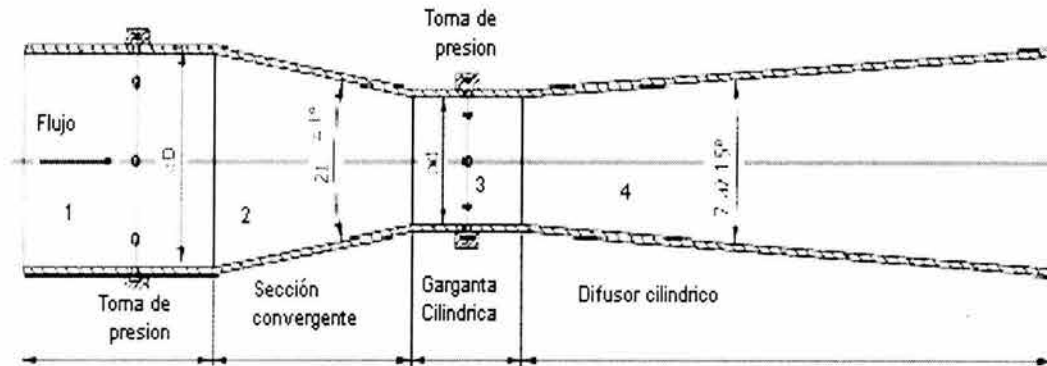


Figura 2.12. Secciones del Medidor Venturi.

2.6.3.1 Funcionamiento del tubo de venturi.

En el tubo de venturi el flujo (Figura 2.13) desde la tubería principal en la sección (1) se hace acelerar a través de la sección angosta llamada garganta, donde disminuye la presión del fluido. Después se expande el flujo a través de la porción divergente al mismo diámetro que la tubería principal. En la pared de la tubería en la sección (1) y en la pared de la garganta, a la cual llamaremos sección (2), se encuentran ubicados tubos piezométricos de presión. Estos tubos piezométricos de presión se encuentran unidos a los dos lados de un manómetro diferencial de tal forma que la deflexión h es una indicación de la diferencia de presión $p_1 - p_2$. Por supuesto, pueden utilizarse otros tipos de medidores de presión diferencial.

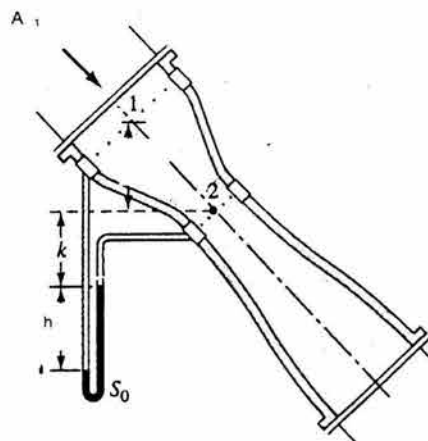


Figura 2.13 Medidor Venturi

Las presiones en la sección corriente arriba y en la garganta son presiones reales y las velocidades de la ecuación de Bernoulli son velocidades teóricas. A partir de la ecuación de Bernoulli (es decir, sin término de pérdida de carga) es posible obtener la velocidad teórica en la garganta.

De la Figura 2.13

$$\frac{v_1^2}{2g_c} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2g_c} + \frac{P_2}{\rho} \quad (2.8)$$

En donde la referencia de la elevación pasa por el punto 2. v_1 y v_2 , son las velocidades promedio en las secciones 1 y 2 respectivamente, se supone que $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$. A partir de la ecuación de continuidad

$$v_1 = v_2 \cdot \frac{A_2}{A_1} \quad (2.9)$$

Esta ecuación es válida para las velocidades teóricas. Igualando las ecuaciones (2.8) y (2.9) resulta ser para v_2 ,

$$v_2 = \sqrt{\frac{2g_c(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - (A_2/A_1)^2\right]}} \quad (2.10)$$

Al multiplicar ésta por el coeficiente de velocidad C_v y por A_2 , se tendrá la velocidad real. La velocidad real multiplicada por el área real de la garganta determina el caudal real.

$$Q = A_2 v_2 = C_v A_G \sqrt{\frac{2g_c(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - (A_2/A_1)^2\right]}} = C_v A_G \sqrt{\frac{2g_c(\Delta P)}{\rho \left[1 - (A_2/A_1)^2\right]}} \quad (2.11)$$

Donde:

- Q = Caudal volumétrico en el medidor en [m³/s].
- C_v = Coeficiente de descarga
- A_G = Área de la garganta en [m²].
- g_c = Constante gravitacional en [kg•m / kgf•s].
- ρ = Densidad del fluido de proceso en [kg/m³].
- A_2 = Área del orificio en [m²].
- A_1 = Área de la tubería en [m²].
- ΔP = Presión diferencial en [kgf / m²].

Ésta ecuación del medidor venturi es para flujo incompresible. El coeficiente de contracción es la unidad; por lo tanto $C_v = C_D$. Se debe hacer notar que h no aparece en la ecuación. El caudal depende de la diferencia manométrica ΔP sin importar la orientación del medidor Venturi; No es relevante si el medidor está colocado horizontal, vertical o inclinado.

C_v se determina por calibración, midiendo el caudal y la diferencia manométrica y al resolverse para C_v , el cual generalmente se encuentra graficado contra el número de Reynolds, el cual se muestra en el Apéndice D.2b, en este se dan los resultados

experimentales obtenidos con el medidor venturi de diámetro de garganta mitad de la tubería ó se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$C_D = 0.9858 - 0.196 \cdot \beta^{4.5} \quad (2.12)$$

Si es posible, conviene elegir el medidor venturi de manera que su coeficiente C_v se mantenga constante dentro de la gama de números de Reynolds para la cual se usa. El coeficiente puede ser ligeramente superior a la unidad para los medidores de venturi que estén excepcionalmente lisos en su interior. Esto no significa que no haya pérdida de energía, en realidad es resultado de despreciar los factores de correlación de la energía cinética α_1, α_2 en la ecuación de Bernoulli. Generalmente α_1 es mayor que α_2 , puesto que la reducción de la sección hace que la distribución de la velocidad sea uniforme en la sección (2). El medidor venturi tiene una pérdida total pequeña, debido a la región cónica, que se expande gradualmente y que ayuda a transformar la energía cinética en la garganta en energía de presión. La pérdida es aproximadamente del 10% al 15% de carga entre las secciones (1) y (2).

2.6.3.2 Rango de funcionamiento.

El tubo venturi puede soportar temperaturas de hasta 540° C y presiones de 41000 kPa. El rango de medida de caudal para líquidos es de 5 m³/hora - 106 m³/hora ó 10 - 107 gpm (galones por minuto) y para gases de 1 a 106 scfm (pies cúbicos estándar por minuto). El coeficiente de descarga es constante a lo largo de todo el rango de medida del flujo, independientemente del valor de beta o del tamaño de la línea. En la Tabla 2.2 se mencionan algunas ventajas, desventajas y limitaciones que presenta este tipo de medidor de flujo.

Ventajas	Desventajas y Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión en líquidos y gases – en muchas aplicaciones la precisión es $\pm 0.5\%$, y se puede obtener precisión hasta $\pm 0.25\%$ con calibración en el laboratorio. • Bajo mantenimiento - no hay partes para reemplazar. • Baja caída de presión. • Aceptan fluidos con contenido de partículas sólidas. • Amplio rango de flujo - se mantiene el mismo coeficiente de flujo sobre todo su rango. • No se requiere un tramo largo de tubería recta corriente arriba del tubo Venturi. • Costo de bombeo reducido. • Resistentes a fluidos abrasivos, pesados, y corrosivos. • Están disponibles en varios materiales • Son aptos para presiones altas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para la construcción se precisa de la adecuación de un sitio de descarga, dado que debe poseer una inclinación que permita la formación de un flujo crítico en la garganta, y los parametros de construcción van a depender de las características de la descarga, dado que estas influyen en el tipo de material de construcción como de las dimensiones en el diseño. • Los tubos de tamaño grande son caros. • Tienden a gastarse por el uso, dando lugar a problemas de calibración. • Son difíciles de reparar cuando se gastan. • En algunas aplicaciones donde el fluido contenga sólidos, la garganta puede quedarse taponada y parar el flujo.

Tabla 2.2. Ventajas, desventajas y limitaciones del medidor Venturi.

2.6.3.3 Comparación con otros medidores de flujo.

La Figura 2.14 que se muestra a continuación denota la ventaja del tubo venturi frente a otros dos medidores de flujo (orificio y nozzle), debido a que el porcentaje de la pérdida de presión, en % frente a la presión diferencial total medida, es mucho menor en el caso del tubo venturi. β es la relación entre d y D (diámetros del tubo).

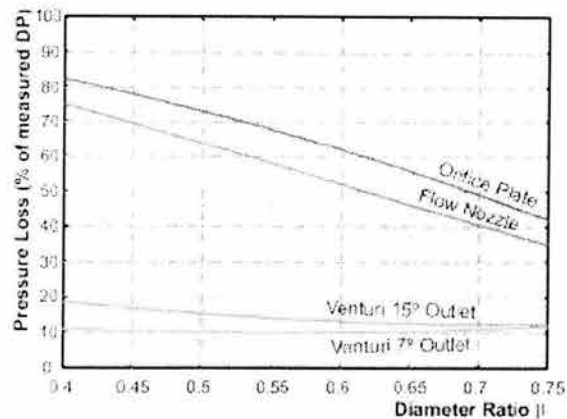


Figura 2.14 Comparación de medidores de flujo.

2.6.4 Tubo Pitot

El tubo Pitot es un medidor de flujo de presión diferencial; es un elemento primario.

Es un tubo de cristal o una aguja hipodérmica de pequeño diámetro y doblado en ángulo recto que se opone al flujo. La abertura del tubo está dirigida hacia arriba, de modo que el fluido penetre dentro de la abertura y suba por el tubo hasta que la presión aumente lo suficiente dentro del mismo y equilibre el impacto producido por la velocidad. Enfrente mismo de la abertura el flujo está en reposo.

En general, un tubo Pitot consiste de dos tubos cóncavos que miden la presión en diferentes partes dentro de la tubería. Los tubos Pitot pueden montarse por separado en la tubería o instalarse juntos en una caseta como un solo dispositivo. Un tubo Pitot mide la presión de impacto o estancada en un punto de un fluido. El otro tubo mide únicamente la presión estática usualmente en la pared de la tubería. Combinando la medida de la presión estática con la medida de la presión total, es decir, midiendo cada una con su aparato correspondiente y conectados los extremos a los de un manómetro diferencial, puede obtenerse la presión dinámica.

El tubo estático y el tubo de Pitot pueden estar montados en un único instrumento llamado tubo de Pitot estático como se muestra en la Figura 2.15.

Debido a la escasa caída de presión que presenta y su bajo precio, el uso del tubo del Pitot se recomienda cuando no se requiera gran precisión, siempre que:

- El fluido este limpio.
- El diámetro de la tubería sea grande.
- La velocidad sea alta.

Cuando se requiera de un máximo de exactitud en la medida o las circunstancias de la aplicación obliguen a mantener una mínima caída de presión es aconsejable usar otros dispositivos como el tubo de Venturi, el cual tiene un alto costo.

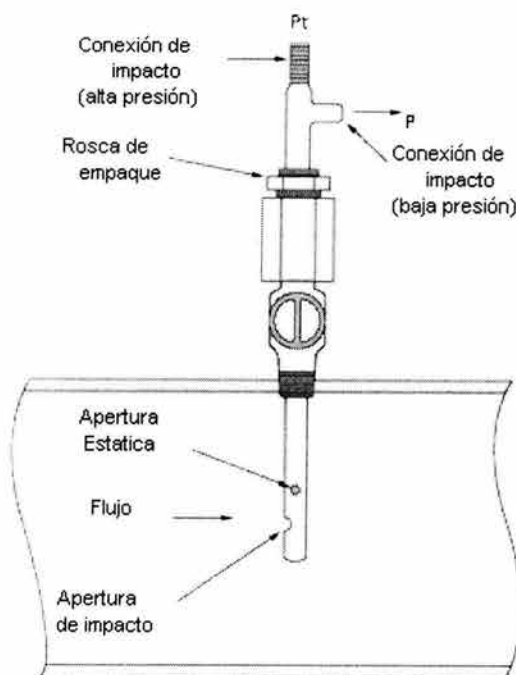


Figura 2.15. Tubo Pitot.

Existen distintos tipos de tubo de Pitot:

Tubo de Pitot Normal: Es el que debe emplearse normalmente, salvo cuando se obtengan resultados erróneos.

Tubo de Pitot Tipo S: Puede usarse cuando el tubo de Pitot Normal se obstruya por la acción del polvo, humedad o ambos.

Tubo de Pitot Invertido: Puede usarse cuando el flujo gaseoso contenga cantidades exageradas de polvo.

Aun cuando un tubo Pitot puede ser calibrado para medir el flujo del fluido a $\pm 0.5\%$ cambiando los perfiles de velocidad, puede causar errores significantes. Ésta es una razón por la cual los tubos Pitot son usados principalmente para medir gases. Su exactitud depende del perfil de velocidad y puede desarrollar una muy baja presión diferencial la cual es difícil de medir.

Los tubos Pitot modificados utilizan una forma de la clásica ecuación del balance de energía de Bernoulli para determinar el caudal.

La señal de presión diferencial producida por dicho elemento de flujo es consistente y uniforme para una condición de flujo y tamaño de tubería dado. De esta forma solamente el rango de trabajo del elemento o sistema necesita ser dimensionado, esta característica reduce los cálculos y también permite cambios en el caudal de un sistema sin la necesidad de dimensionar y cambiar otra vez el sensor primario. En la Tabla 2.3 se mencionan algunas ventajas, desventajas y limitaciones que se pueden tener por el uso de este tipo de medidor de flujo.

Ventajas	Desventajas y Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • No hay pérdida de presión. • Instalación económica. • Algunas veces pueden ser removidos de la línea. • Bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> • Poca exactitud. • Se pueden taponar fácilmente con materiales contenidos en el fluido. • Los datos de calibración deben de ser proporcionados por el fabricante. • No es recomendable para fluidos sucios o pegajosos. • Sensible a perturbaciones corriente arriba.

Tabla 2.3. Ventajas, desventajas y limitaciones del Tubo Pitot.

2.6.5 Tubo Annubar.

Éste es una variación mejorada del tubo pitot, un Annubar consiste en varios tubo Pitot colocado en una tubería para proporcionar una aproximación al perfil de velocidad, por lo que, la diferencia radica en que no sólo se toma en cuenta la medida de la presión total del fluido en el centro de la tubería, sino que se realiza un promedio al tomar la presión total en varios puntos a lo largo de la sección transversal de la tubería principal, por eso como se puede observar en la Figura 2.16, el tubo que realiza la toma de estas presiones tiene varios orificios de posición crítica determinados por computadora. Con esto se logra una mayor precisión en la medida, evitando el error que produce el tubo de Pitot. El tubo Pitot y Annubar contribuyen a caídas de presión muy pequeñas, ellos no son físicamente fuertes y sólo deben usarse con los fluidos limpios.

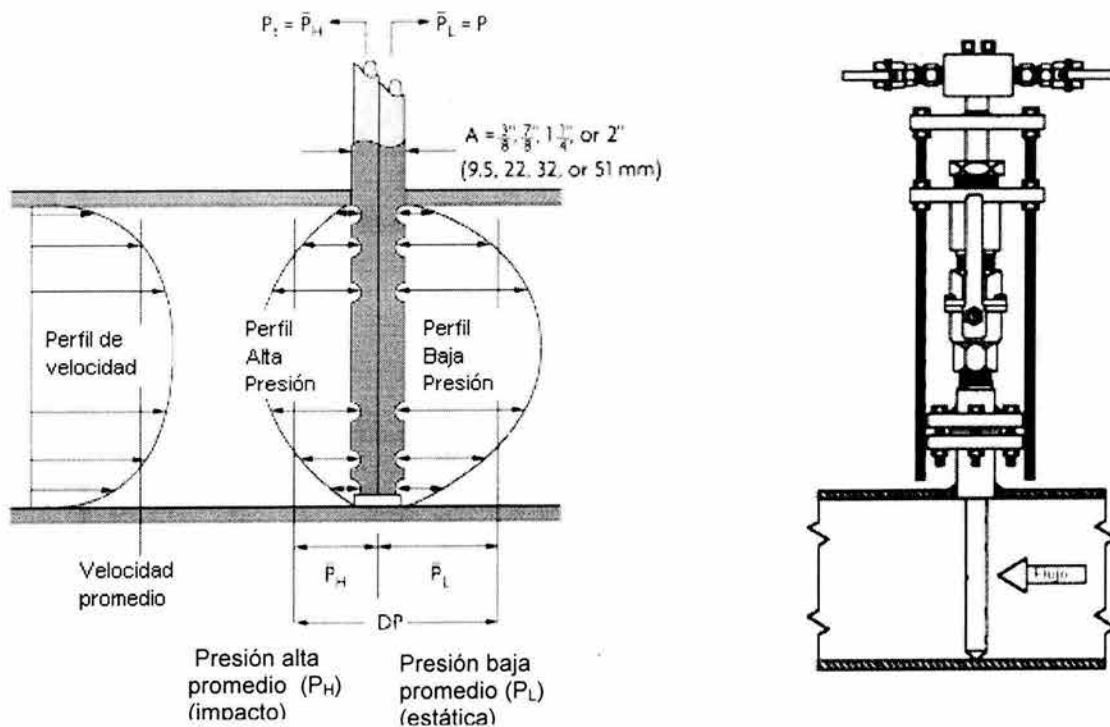


Figura 2.16 Tubo annubar

2.6.6 Medidor de codo.

El medidor de codo para flujo incompresible es uno de los dispositivos más simples para medir flujo. Las aberturas piezométricas del interior (P_{in}) y el exterior (P_{out}) del codo se conectan a un manómetro diferencial, como se muestra en la Figura 2.17. Debido a la fuerza centrífuga en el codo, la diferencia de presiones está relacionada con la descarga. Una cierta distancia debe preceder al codo y para tener resultados precisos el dispositivo deberá ser calibrado en el lugar. En la Tabla 2.4 se mencionan algunas ventajas, desventajas y limitaciones que presenta este tipo de medidor de flujo.

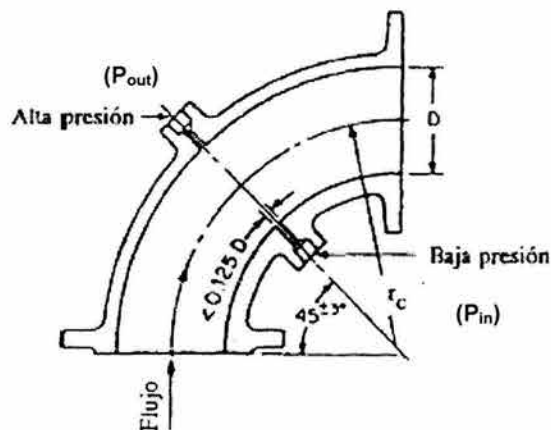


Figura 2.17. Medidor de codo. Las tomas de presión se hacen a 45° de la entrada del fluido.

Ventajas	Desventajas y Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Como casi todas las tuberías tienen un codo, éste puede ser usado como medidor. • Bajo costo. • No obstruye la tubería. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita 25 diámetros de tubería corriente arriba. • La exactitud es deficiente desde ± 5 a $\pm 10\%$

Tabla 2.4. Ventajas, desventajas y limitaciones del Medidor de Codo.

2.6.7 Boquilla de flujo (Nozzle).

La boquilla de flujo consiste de un tubo corto con una restricción, un contorno elíptico que termina en una sección de garganta cilíndrica. La caída de presión es medida entre la localización de un diámetro de la tubería corriente arriba y medio diámetro corriente abajo. La Figura 2.18 muestra la boquilla de flujo ISA (Instrument Society of America) que no presenta otra contracción del chorro más que la causada por la abertura; Por lo tanto el coeficiente de contracción es una unidad. La boquilla de flujo proporciona una caída de presión intermedia que cae entre el desempeño de la placa de orificio y el tubo venturi. En la Tabla 2.5 se mencionan algunas ventajas, desventajas y limitaciones que presenta este tipo de medidor de flujo.

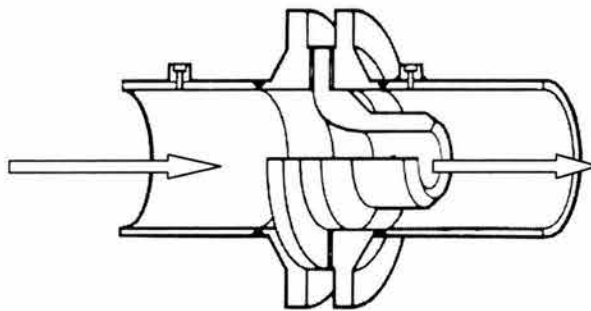


Figura 2.18 Boquilla de flujo.

Ventajas	Desventajas y Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad para manejar sólidos • Dimensionalmente es más estable que una placa de orificio a velocidades, turbulencia y temperaturas altas. • Requiere una relación beta más pequeña que para una placa de orificio para un mismo caudal y presión diferencial. • Es mucho más resistente a la abrasión que una placa de orificio. • La precisión de una boquilla es $\pm 1\%$ sin calibración, $\pm 0.25\%$ con calibración de laboratorio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay pérdidas globales mayores debido a la falta de orientación del chorro corriente debajo de la apertura de la boquilla y que por su anchura es más difícil de remplazar que una placa de orificio. • No es tan efectivo midiendo el flujo todos los días, pero pueden ser útiles para aplicaciones especiales a temperaturas altas que los medidores de flujo más comunes no pueden manejar. • El costo de este medidor es menor al del tubo venturi. • Es menos exacto y no puede crear diferencias de presión más altas y permanentes.

Tabla 2.5. Ventajas, desventajas y limitaciones de la Boquilla de flujo (Nozzel).

2.7 MEDIDORES DE ÁREA VARIABLE.

Los medidores de área variable son en esencia un tipo especial de medidores de flujo de presión diferencial, el área de la orificio (abertura) es fija y el caudal se mide como una función de la diferencia de presión producida por el orificio. En las medidores de área variable, la diferencia de presión a través de la apertura es constante, y el caudal se mide como una función del área de la abertura. Esta área generalmente se exhibe con la posición de un "flotador" que se mueve libremente para producir una variación de área. Hay tres tipos generales de medidores de flujo de área variable.

2.7.1 Medidor de orificio o cubierto.

Este tipo de medidor es equipado con un orificio fijo dentro de una coraza cilíndrica. El flotador tiene un cuerpo cubierto con una pequeña terminación en el fondo y está libre para moverse verticalmente a través del orificio [ver Figura 2.19 (b)]. El caudal se indica por la posición del flotador.

2.7.2 Medidor tipo pistón.

En este medidor un pistón esta ajustado a un mango cónico con una serie de ranuras que se descubren progresivamente como una diferencia de presión cada vez que el flotador asciende. El fluido de las aberturas se vierte a una coraza externa. El caudal es indicado por la posición del pistón [ver Figura 2.19 (c)].

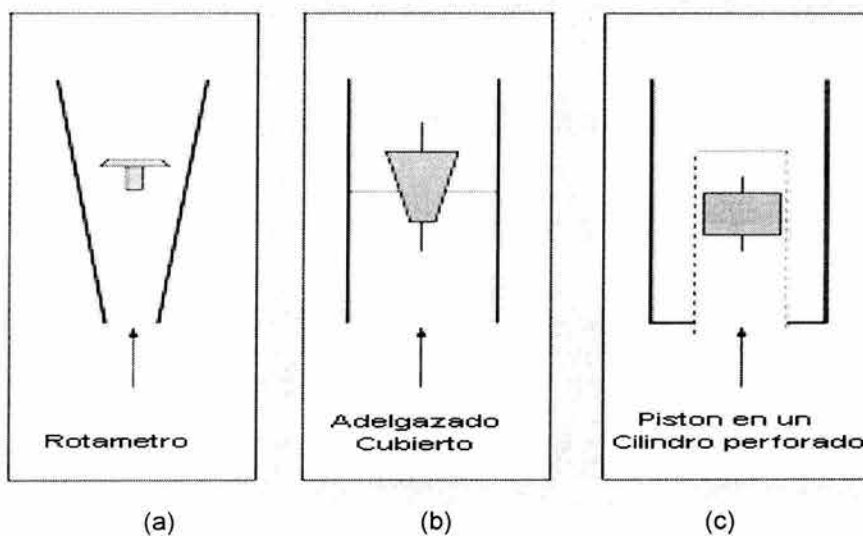


Figura 2.19. Tipos de medidores de área variable.

2.7.3 Rotámetro.

Un Rotámetro es un medidor de flujo de área variable el cual consta principalmente de un tubo graduado de sección cónica. Dentro del tubo se encuentra el elemento de medición denominado flotador hecho de un material de mayor densidad que la del fluido, el cual genera una caída de presión constante al paso del líquido entre la pared del tubo y el

diámetro del flotador [ver Figura 2.19 (a)]. El flotador se eleva y desciende dentro del tubo para proporcionar una medición del caudal de flujo (Figura 2.20). La fuerza de gravedad descendente sobre el flotador continuamente se opone a la fuerza ascendente del flujo de fluido. Con un cambio en el caudal, el flotador asciende o desciende en el tubo cónico hasta el tamaño de área anular entre el flotador y el tubo cambia lo suficiente para crear una nueva posición de equilibrio, (de aquí el área variable).

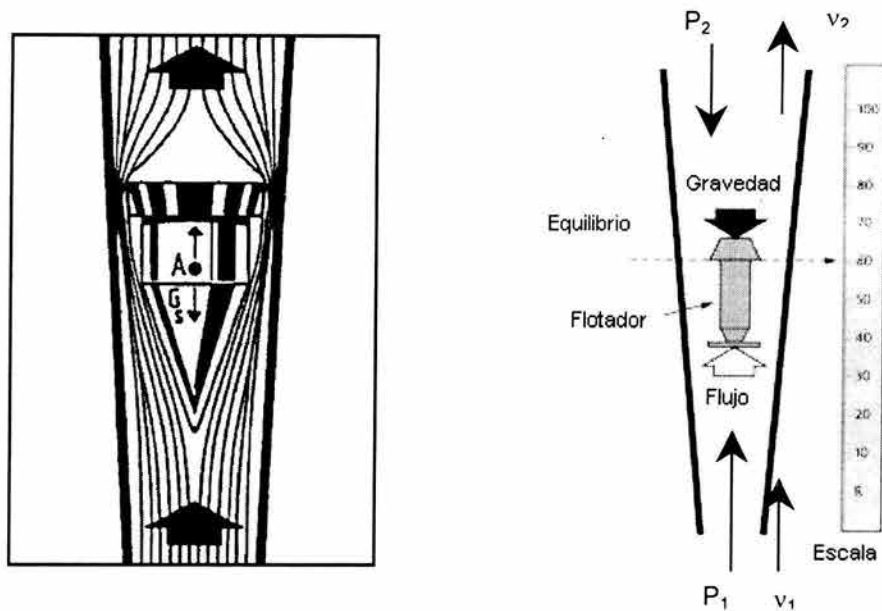


Figura.2.20 Fuerzas que actúan sobre el flotador

Hay un requerimiento de instalación, el tubo de la medición debe ser vertical, para el balance del flotador contra la máxima fuerza de gravedad.

El término "Rotámetro" se origina de la versión temprana del diseño de un flotador. Estos flotadores contenían aberturas que causaban, que girarán dentro del tubo de vidrio y esta acción rotatoria estabilizaba y centraba el flotador. Ahora los flotadores son centrados principalmente por el uso vertical, una guía patrón de acero inoxidable o por una cuenta guía dentro del tubo de vidrio. Los flotadores vienen en una gran variación de formas, tamaños, pesos y materiales de construcción, dependiendo de la aplicación.

Ambos tipos de medidores de orificio y el rotámetro la caída de presión surge de la conversión de energía de presión en energía cinética (llamada ecuación de Bernoulli) y las pérdidas por fricción las cuales son consideradas por el coeficiente de descarga.

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{v_2^2}{2g_c} - \frac{v_1^2}{2g_c} \tag{2.13}$$

La ecuación de continuidad:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{2.14}$$

Donde A_1 es el área de sección transversal y A_2 es el área de la sección anular (área entre el tubo y el flotador).

De la ecuación (2.13) y (2.14),

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - (A_2 / A_1)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.15)$$

La caída de presión Δp sobre el flotador, esta dada por:

$$\Delta P = \frac{V_f (\rho_f - \rho) g}{A_f} \quad (2.16)$$

Donde V_f es el volumen del flotador, ρ_f la densidad del material del flotador, y A_f es el valor máximo del área de sección transversal del flotador en un plano horizontal.

Sustituyendo la ecuación (2.16) en la ecuación (2.15) y la ecuación para calcular el caudal la ecuación queda como:

$$Q = C_D A_2 \sqrt{\frac{2V_f (\rho_f - \rho) g_c}{\rho A_f [1 - (A_2 / A_1)^2]}} \quad (2.17)$$

El coeficiente C_D depende de la forma del flotador y el número de Reynolds (basado en la velocidad en el anillo y el diámetro hidráulico del anillo) para el espacio anular del área A_2 . Los valores para el coeficiente de descarga se muestra en el Apéndice D.2c.

Los coeficientes constantes para el flotador incrementan para la promoción de la turbulencia, y por esta razón el coeficiente es también sustancialmente independiente de la viscosidad del fluido. El medidor puede ser relativamente insensitivo a cambios en la densidad del fluido por la selección de la densidad del flotador, ρ_f . Si la densidad del flotador es dos veces la del fluido, entonces la posición del flotador, para un flotador dado es independiente de la densidad del fluido.

El rango del medidor puede ser incrementado por el uso del flotador de diferentes densidades. Para un trabajo de alta presión el tubo de vidrio es reemplazado por el tubo de metal. Cuando un tubo de metal es usado o cuando el líquido es muy oscuro o sucio se requiere un indicador externo.

2.7.4 Diseño de componentes del Rotámetro.

El tubo cónico y el peso del flotador son los puntos por los que hay que empezar a especificar un rotámetro. Los diámetros de los tubos pueden tener un rango entre 1/16 a 4 in. Con el rango de 1/4 a 2 in son los más comunes. Por supuesto, todos los modelos tienen limitaciones relacionadas a la capacidad, temperatura, presión y en el caso de los líquidos a la viscosidad. Varios modelos están disponibles en una selección extensa de

materiales de construcción y con accesorios tales como contactos de alarma, transmisión remoto y controles para una variedad de sistemas de instrumentación necesarios.

2.7.4.1 Tubos de vidrio.

De los rotámetros originales que se introdujeron en los años 40's, y que aún están en uso, destacan tubos de precisión de medición formados de vidrio borosilicato. El flotador es visible en el tubo de vidrio, el medidor muestra las lecturas del caudal en las escalas de graduación en la superficie del vidrio o en una adyacente, que es una escala vertical intercambiable. La baja capacidad de medidores de tubo de vidrio (Figura 2.20) permite que sean utilizados en sistemas de purga, por este su servicio se les conoce como medidores de purga.

Generalmente, el uso del rotámetro del tubo de vidrio es simple, pero confiable en la indicación de caudal. Este medidor puede repetir un caudal dado con un alto grado de precisión (generalmente $\pm 0.5\%$ como máximo), lo cual puede ser muy deseable. Los contactos de alarma puede ser añadidos fácilmente para proporcionar señales de alto o bajo flujo ó para proporcionar el de control encendido-apagado. Estos activan el contacto solamente si el caudal cae por debajo del punto de referencia bajo o incrementa por encima del punto de referencia alto. Algunas escalas son marcadas linealmente desde 0 a 100% sobre el rango de medición. El proveedor puede proporcionar al usuario un gráfico que traza las lecturas del medidor contra los caudales para que el fluido sea medido. Estos medidores también son equipados con un escudo de plástico que sirve como protector para los trabajadores en caso de que se rompa el medidor.

4.7.4.2 Tubos metálicos.

Para aplicaciones donde la temperatura o presión excede los límites del rotámetro de tubo de vidrio. También los tubos metálicos se conocen como medidores acorazados, esto permite que se usen con fluidos que pudieran atacar el vidrio (Figura 2.20). Los tubos metálicos están bien situados en la medición de vapor, son útiles también cuando la naturaleza del fluido obscurece la lectura en la posición del flotador, por un momento ya sean líquidos oscuros u opacos. Este tipo de medidores indica el caudal por un apuntador de un magneto que se encuentra dentro del flotador y un magneto seguidor externo ligado al apuntador. Alternativamente pueden ser conectados a una energía eléctrica externa y a un convertidor de señal, para ser usados en mediciones de transmisiones remotas de caudal. Esta opción no está disponible en los medidores de vidrio. El flotador se puede acoplar para actuar como alarma de alto y bajo flujo. El material de construcción más común es el resistente a la corrosión. Este medidor al igual que el tubo de vidrio puede ser usado como sistema de purga.

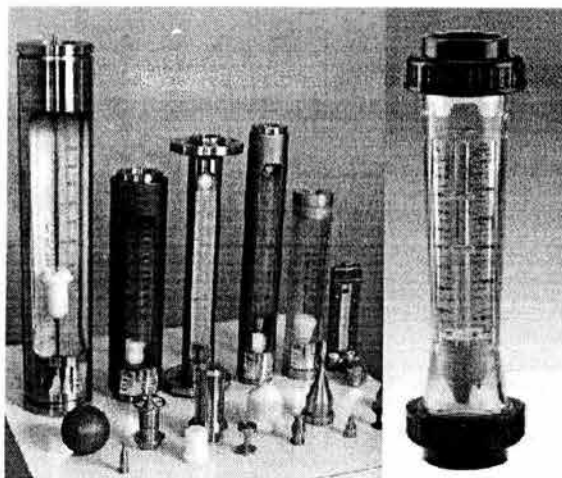


Figura 2.21. Tipos de rotámetros y flotadores.

2.7.4.3 Tubos de plástico.

Los rotámetros con tubos de plástico transparente pueden ser enteramente convenientes, y en costo es alternativo para los medidores de vidrio y metálicos para una variedad completa de fluidos inertes (Figura 2.21).

2.7.4.4 Flotadores.

Hay flotadores centralmente guiados con posibles efectos de fricción que ofrecen más repetibilidad que los flotadores no guiados [Figura 2.22(b)]. Una alternativa es un flotador con una cola guía, donde un anillo es sostenido por una membrana así que el anillo se mueve en el tubo bordeado y mantiene el flotador centrado en el tubo. La Figura 2.22(c) muestra algunas formas de flotadores. Los cinco flotadores en la Figura son flotadores de bola, flotador de orilla puntiaguda para reducir la dependencia de la viscosidad, un flotador no inmune a la viscosidad, un flotador formado por una baja pérdida de presión y un flotador no guiado rotatorio.

En medidores pequeños el flotador usualmente es una bola hecha de vidrio negro y acero inoxidable, zafiro, carboloy (aleación de Co + W + C), o tantalio. Para tamaños grandes en ambos diseños vidrio o metálicos, el flotador es generalmente fabricado de materiales resistentes a la corrosión, con variaciones para satisfacer las aplicaciones los flotadores se encuentran en una gran variedad de materiales de construcción, con variación de las densidades que pueden ser usadas para cambiar el rango del medidor. En la Tabla 2.6 se mencionan algunas ventajas, desventajas y limitaciones que presenta este tipo de medidor de flujo.

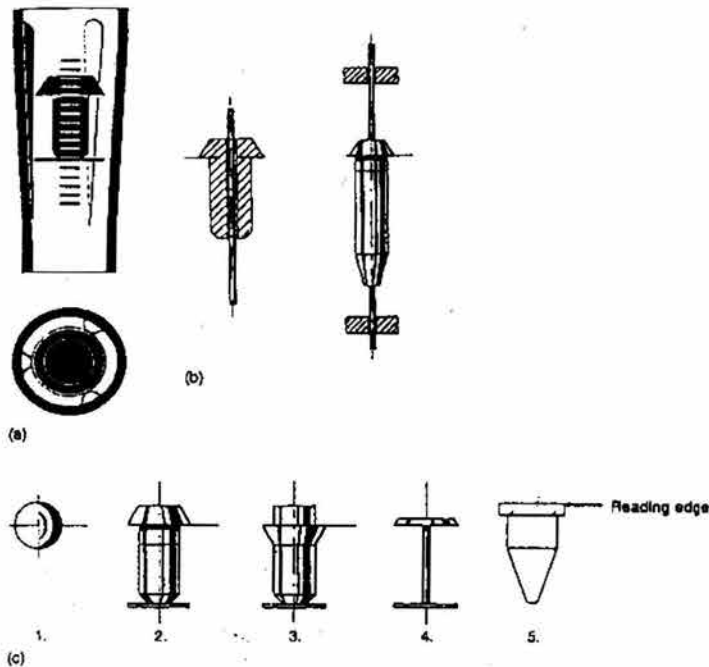


Figura 2.22. Formas de flotadores.

Ventajas	Desventajas y Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Familiaridad: Algunos usuarios prospectos pueden entender fácilmente el funcionamiento del rotámetro. • Legibilidad: Con un medidor de tubo de vidrio el usuario puede ver si hay alguna incrustación en el flotador o una materia extraña en el fluido. • Sostiene alta repetibilidad. • Escala lineal. • Baja caída de presión. • Compensación por viscosidad: el flotador puede ser diseñado para compensar variaciones normales en la viscosidad y densidad. • Modera la corrosión debido a materiales de construcción. • Habilidad para manejar caudales bajos. • Fácil conversión para medir fluidos diferentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los tubos de vidrio se pueden romper. • No es bueno en servicios pulsantes. • Debe ser instalado verticalmente. • Generalmente, esta limitado para tuberías pequeñas (al menos que se use en bypass). • Limitado para temperaturas bajas. • Requiere montaje en línea (excepto en tipo bypass).

Tabla 2.6. Ventajas, desventajas y limitaciones del Rotámetro.

2.8 MEDIDORES DE VELOCIDAD.

Los medidores basados en velocidad calculan el caudal (Q) basado en la fórmula $Q = vA$, donde v es la velocidad del fluido y A el área de sección transversal del cuerpo del medidor. Porque el elemento primario genera una señal lineal al flujo con la velocidad del fluido, la imprecisión asociada a la extracción de la raíz cuadrada es eliminada. Además, los medidores de flujo de velocidad pueden operar sobre un rango amplio de velocidades

y tienden a ser menos sensitivos a perfiles de flujo que los tradicionales medidores DP de orificio.

2.8.1 Medidores tipo turbina.

Introducidos al mercado en la década de los cuarenta. Su construcción, es muy sencilla, consta de un juego de paletas o aspas acopladas a un eje (rotor), las cuales giran libremente a una frecuencia cuando pasa por un fluido a través de ellas (Figura 2.23). La velocidad a la cual giran estas aspas es proporcional a la velocidad del fluido, y si tenemos la velocidad y el área del conducto se puede determinar el caudal. La velocidad de giro del rotor se mide por conexión mecánica (un sensor registra el número de vueltas) o por pulsos electrónicos generados por cada giro.

Estos sistemas son utilizados para proveer información de medición en transporte de fluidos, procesamiento de petróleo y químicos, transferencia de custodia de líquidos, sistemas de mezclado en operaciones de planta o en el campo. En la Tabla 2.7 se mencionan algunas ventajas, desventajas y limitaciones que presenta este tipo de medidor de flujo.

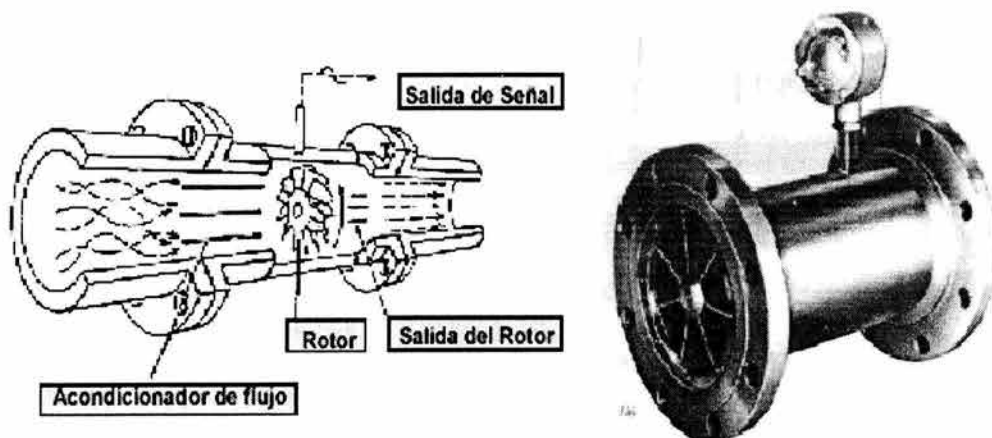


Figura 2.23 Medidor tipo turbina.

Ventajas	Desventajas y Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Estos dispositivos tienen una precisión muy alta. • Gran resistencia mecánica. • La repetitividad de estos sistemas garantiza la correcta medición de flujo en un amplio rango de flujo, temperaturas, composiciones y viscosidades. • Baja diferencia de presión • Fácil instalación y mantenimiento. • Adaptable para totalización de flujo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere montaje en línea • Relativamente alto costo. • Uso limitado para aplicaciones con fluidos pastosos. • Fluidos no lubricantes algunas veces presentan problemas. • Requiere tubería recta (15 diámetros) delante del medidor. • Se recomiendan enderezadores de flujo, excepto para mediciones especiales de slurry.

Tabla 2.7. Ventajas, desventajas y limitaciones de Medidores tipo turbina.

2.8.2 Medidores Vortex (vórtice)

Estos dispositivos se basan en algunas propiedades de la dinámica de los fluidos, esto es, aquellas características que se presentan cuando éstos se encuentran en movimiento. El nombre —que significa vórtice o remolino— se debe a que, ya desde 1878, los científicos habían observado que el número de remolinos que se forman en una corriente de agua cuando ésta pasa por un obstáculo se incrementaban linealmente según aumentaba la velocidad corriente.

El medidor está formado fundamentalmente por tres componentes: un elemento propio generador de remolinos o vórtices; un detector, que convierte la energía de los remolinos en una señal eléctrica, y un transmisor, capaz de amplificar esta señal y producir un registro sobre una escala graduada en unidades de velocidad de flujo (Figura 2.24).

El elemento más importante es el detector de remolinos, ya que su diseño es lo que diferencia a los múltiples dispositivos que se ofrecen en el mercado. Por lo general hay dos maneras de montar el detector: en forma directa sobre la pieza generadora de remolinos o inmediatamente después de que la corriente pase este obstáculo. Lo que el detector debe medir es la frecuencia de formación de remolinos, directamente proporcional al flujo que circula a través del cuerpo del medidor.

A veces se emplean sensores piezoeléctricos suficientemente sensibles, montados en la pieza generadora, que detectan el momento en que se genera cada nuevo remolino. En otras ocasiones, el dispositivo sensor se encuentra inmediatamente después de la pieza generadora y mide las fluctuaciones de presión provocadas por el paso de los remolinos que se generan en la corriente. En ambas situaciones se necesita que un circuito electrónico interprete la frecuencia de los pulsos producidos por el detector de remolinos y despliegue una lectura expresada en unidades de velocidad de flujo.

Las ventajas de este tipo de medidor son: se comporta con mucha eficiencia cuando los fluidos líquidos limpios, gas, no requiere extracción de raíz cuadrada u otro tipo de linealización. Sin embargo, cuando se pretende utilizar este medidor en aplicaciones de medición de gases de baja densidad, su desempeño deja mucho que desear.

En tales circunstancias, el dispositivo detector de remolinos se confunde porque los vórtices que se forman tienen una presión muy baja y su detección queda enmascarada por los ruidos del proceso.

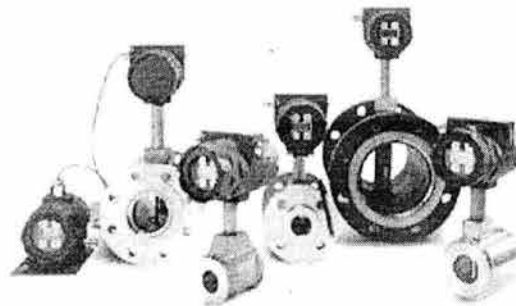


Figura 2.24. Medidor Vortex.

2.8.3 Medidores de flujo magnético

Utiliza el principio de inducción electromagnética de Faraday, el cual dice que si un conductor se mueve a través de campo magnético en ángulo recto a éste, se induce una diferencia de potencial entre sus terminales. Un medidor magnético de flujo consiste básicamente en un campo magnético producido por un par de electroimanes y dos electrodos. Todo esto se encuentra montado en un tubo apropiado que se puede intercalar en la tubería que transporta el fluido que se desea medir (Figura 2.25). El voltaje que se produce entre los electrodos está en función de la distancia entre ellos, la densidad del flujo magnético y la velocidad del fluido. Como los primeros dos parámetros no varían se puede considerar que el potencial entre los electrodos es proporcional a la velocidad del fluido. Al medir este potencial es posible determinar la velocidad de flujo. Aunque el diseño de un medidor de flujo magnético tiene una gran complejidad, la instalación, la calibración y el mantenimiento son muy sencillos. En la Tabla 2.9 se mencionan algunas ventajas, desventajas y limitaciones que presenta este tipo de medidor de flujo.

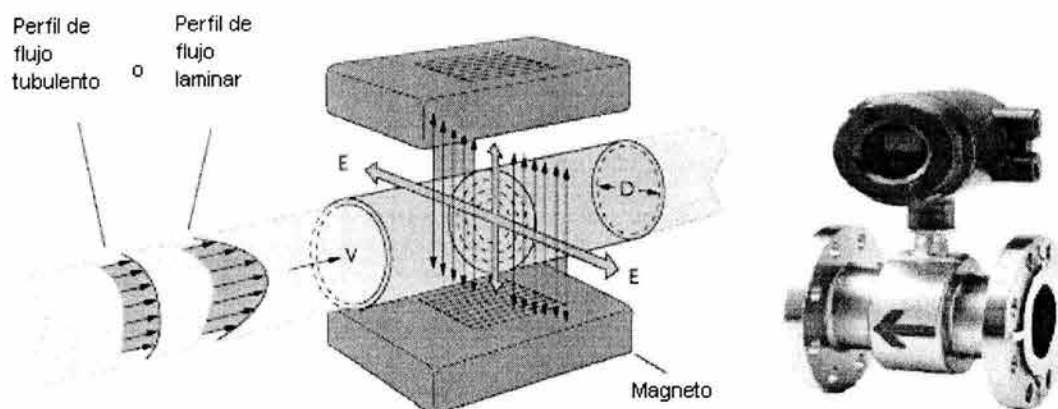


Figura 2.25. Medidor magnético. El principio de operación del medidor magnético se describe esquemáticamente – un voltaje se produce por un conductor en movimiento (fluido) cortando el campo magnético. El conductor, el campo magnético y el voltaje producido son mutuamente perpendiculares.

Ventajas	Desventajas y Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad para medir fluidos de alta densidad como los que se presentan en la industria del papel y el azúcar (pulpa, melaza, etcétera). • Puede manejar fluidos corrosivos • La medida del caudal es independiente de la temperatura, presión, densidad o la viscosidad del líquido. • La influencia del perfil de velocidades es despreciable. • No presenta restricciones al paso del fluido. • Disponible para tamaños grandes de tubería. • Amplia rangeabilidad y buena linealidad, buena precisión, repetibilidad. • Exige pocos tramos rectos 	<ul style="list-style-type: none"> • Exige que el fluido presente una conductividad mínima requerida, dependiendo del fabricante es desde 0.1 a 20 microhmios. • El medidor debe estar lleno todo el tiempo. • Su alto costo. • El ingreso de burbujas de gas causa errores en la medición. • Debe ser montado en línea.

Tabla 2.9. Ventajas, desventajas y limitaciones de Medidores de flujo magnético.

2.8.4 Medidor Ultrasónico

Hay dos tipos de medidor ultrasónico: de tiempo de tránsito y efecto Doppler. Los de tiempo de tránsito utilizan cierta característica en la propagación de la señal, y en éste tipo, una onda de ultrasonido viaja más rápido cuando ésta viajando en el sentido del fluido que cuando viaja en contra de éste. El medidor ultrasónico mide el tiempo de tránsito de ambas señales, la diferencia entre dos tiempos al propagarse en el sentido del fluido y en el sentido contrario, da una medida de la velocidad del fluido (v), y si se sabe la velocidad y el área por donde pasa entonces se conoce el caudal en ese instante [Figura 2.26 (a)]. Los medidores de efecto Doppler que se utilizan en fluidos que contienen partículas, calculan la velocidad del fluido basándose en el desplazamiento de las partículas en la frecuencia que ocurre cuando la señal de ultrasonido se refleja en una partícula contenida en el fluido, y si se sabe la velocidad, se puede conocer el caudal [Figura 2.26(b)]. En la Tabla 2.10 se mencionan algunas ventajas, desventajas y limitaciones que presenta este tipo de medidor de flujo.

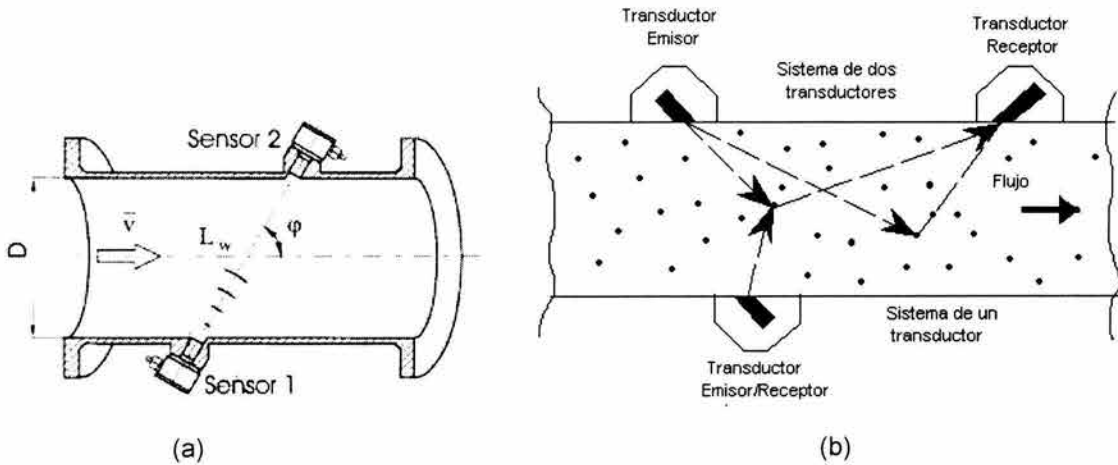


Figura 2.26. Medidor Ultrasónico. El principio de medidores de tiempo de tránsito (a). Transmite un pulso ultrasónico corriente arriba y corriente abajo a través del fluido: el líquido en movimiento con una velocidad v en un ángulo ϕ para el pulso ultrasónico. Efecto Doppler (b).

Ventajas	Desventajas y Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • No tienen partes en movimiento. • Tienen muy buena precisión. • Gran flexibilidad de instalación • Se utilizan en forma portátil. • Aplicable para medir corrientes difíciles de medir como fluidos que contengan sólidos y slurries. 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipos de alto costo • Difícil de fijar una distancia entre el transmisor y la unidad de recibimiento en unos sistemas de dos elementos. • Se aplica para fluidos conductivos acústicamente.

Tabla 2.10. Ventajas, desventajas y limitaciones de Medidor Ultrasónico.

2.9 MEDIDOR DE FUERZA (Blanco ó Target).

Consiste de un disco redondo que recibe directamente el impacto del flujo, este disco está suspendido por una barra móvil, que por medio de un resorte se mantiene en posición vertical. Al aumentar la velocidad del fluido, aumenta el impacto sobre el blanco produciendo en este un desplazamiento de su posición. Este desplazamiento es proporcional a la velocidad y por lo tanto al caudal se mide con otro instrumento en la barra móvil, infiriendo de esta forma el flujo que está pasando justo en ese momento (Figura 2.27). En la Tabla 2.11 se mencionan algunas ventajas, desventajas y limitaciones que presenta este tipo de medidor de flujo.

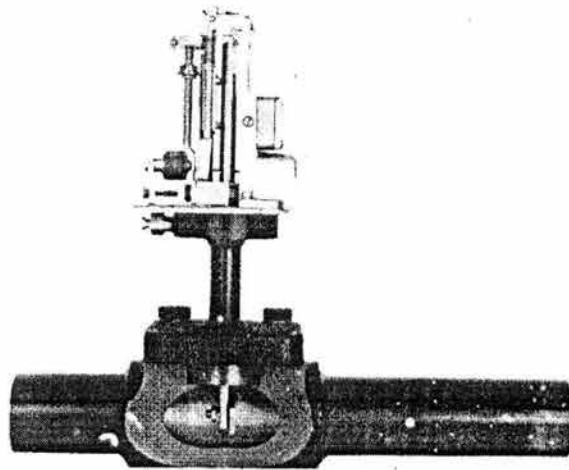


Figura 2.27. Medidor de blanco.

Ventajas	Desventajas y Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Beneficioso para mediciones difíciles, tales como slurries, polímeros y materiales sedimentados, mezclas corrosivas, etc. • Buena exactitud cuando es calibrado para corrientes específicas. • Buena repetitividad. • Relativamente adecuado para temperaturas y presiones altas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere montaje en línea • Datos de calibración limitados. • Condición no-flujo debe existir para ponerlo en cero.

Tabla 2.11. Ventajas, desventajas y limitaciones de Medidor Target.

2.10 MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO.

2.10.1 MEDIDORES DIRECTOS

Se basan en el principio de desplazamiento positivo también conocidos como medidores directos, que consisten en separar físicamente el fluido en cantidades específicas, que posteriormente se cuentan y pasa al resto de la tubería. Al contar cantidades específicas del fluido realizando una medición del flujo total que pasa por la tubería. Hay que tener en cuenta que las partes mecánicas del instrumento se mueven aprovechando la energía del fluido y dan lugar a una pérdida de carga. Los medidores de desplazamiento positivo son de tipo mecánico usados principalmente para medir cantidades de fluido transferido o en procesos por lotes (batch). En operaciones de procesos batch usualmente se fijan cantidades usualmente alimentadas al proceso, cuando la cantidad predeterminada es cumplida el flujo automáticamente se cierra.

Para poder hacer este tipo de medición existen, dispositivos como el medidor Rotativo ya sea de engranaje ovalado o lobulado, pistón recíprocante y oscilante, y el medidor de disco oscilante.

2.10.1.1 Medidor Rotativo.

Son dos piñones que giran al paso del fluido, almacenando entre sus dientes un determinado volumen de éste, por lo tanto para cada vuelta de los piñones se obtiene una misma cantidad de flujo pasando a través de ellos. Al saber cuanta cantidad de flujo pasa por cada vuelta y al contar el número de éstas, se está determinando el flujo total. Puede ser construido en dos tipos de arreglos lobulado u ovalado Este principio de funcionamiento se puede observar en la Figura 2.28. En la Tabla 2.12 se mencionan algunas ventajas, desventajas y limitaciones que presenta este tipo de medidor de flujo.

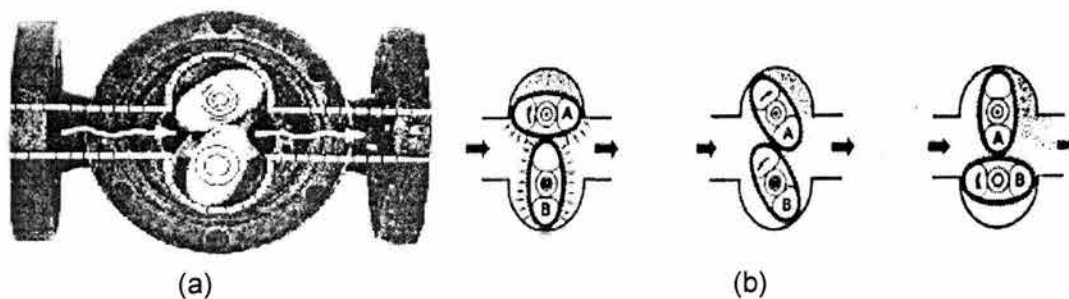


Figura 2.28. (a) Tipo lobulado de medidor rotatorio entrega un volumen exacto del fluido con cada rotación. (b) Operación de medidor rotatorio tipo ovalado.

Ventajas	Desventajas y Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Relativamente bajo costo. • Perdido de presión moderada. • Aplicable a sistemas de batch líquido. • Disponible en diversos materiales de construcción. 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitado para varias capacidades y tamaños de tubería. • Los fluidos deben ser limpios

Tabla 2.12. Ventajas, desventajas y limitaciones de Medidor Rotativo.

2.10.1.2 Medidor de Disco Oscilante.

Esta compuesto de un disco que está unido a un balín el cual le permite balancearse sobre un eje de rotación al pasar el fluido, este disco divide una cámara en dos compartimientos, uno encima y otro debajo de éste. Cada compartimiento contiene una cantidad fija del fluido, por lo tanto al producirse la oscilación del disco, el fluido contenido en cada compartimiento de la cámara es desplazado siempre en una misma cantidad hacia el exterior ver Figura 2.29. Al saber cuanta cantidad de flujo pasa por cada oscilación y al contar el número de éstas, se está determinando el flujo total. En la Tabla 2.13 se mencionan algunas ventajas, desventajas y limitaciones que presenta este tipo de medidor de flujo.

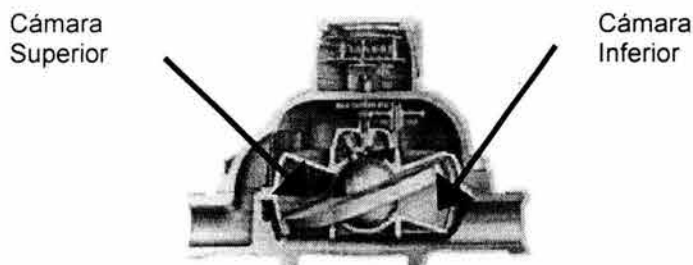


Figura 2.29. Medidor de disco oscilante.

La calibración es de acuerdo a la aplicación, lo que asegura una compatibilidad completa con su aplicación específica.

Algunas aplicaciones son; Medición de pinturas automotrices, medición de flujo de combustibles, medición de flujo de aceites vegetales, medición de flujo de melaza, medición de flujo de sosa al 50%, medición de flujo de tintas.

Ventajas	Desventajas y Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión y repetibilidad. • No tiene restricciones por requerimientos de tramos rectos antes y después del medidor. • Bajo mantenimiento. • Costo moderado • Solo tiene una pieza en movimiento dentro de la cámara de medición. • No hay contacto de metal a metal en la cámara de medición. • Poca caída de presión. • Un verdadero medidor de fluidos por gravedad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponible solamente en tamaños pequeños, normalmente 2 pulgadas o menos. • Energía limitada para el manejo de accesorios. • Los fluidos deben ser limpios.

Tabla 2.13. Ventajas, desventajas y limitaciones de Medidor de Disco Oscilante.

2.10.1.3 Medidor de Pistón Oscilante.

El medidor de pistón oscilante esta equipado con un valor de cerrado automático. Es muy similar en operación al disco oscilante excepto que el aparato de medición es un anillo divisor el cual oscila en un solo plano.

El ciclo operacional del medidor se muestra en la Figura 2.30. El líquido entra por la abertura A dentro de la cámara (ver posiciones 1 y 2) empujando el pistón C en un movimiento oscilante en sentido del reloj. Este se mueve por la fuerza del líquido en el espacio F para la descarga a través de la abertura E, como se muestra en la posición 2. El movimiento de la posición 2 a la posición 3, la entrada del líquido en el espacio entre el interior de la cámara y la pared interior del pistón da un movimiento parejo del pistón. El pistón es guiado en su movimiento oscilante por el diafragma D y por el huso P el cual rota en el canal entre el rodillo R y la pared interior de la cámara. Cada entrega de líquido es una medición de volumen muy precisa. En el caso de existir alguna fuga puede ocasionar un error apreciable a bajo flujo pero no en una proporción de flujo lleno. En la Tabla 2.14 se mencionan algunas ventajas, desventajas y limitaciones que presenta este tipo de medidor de flujo.

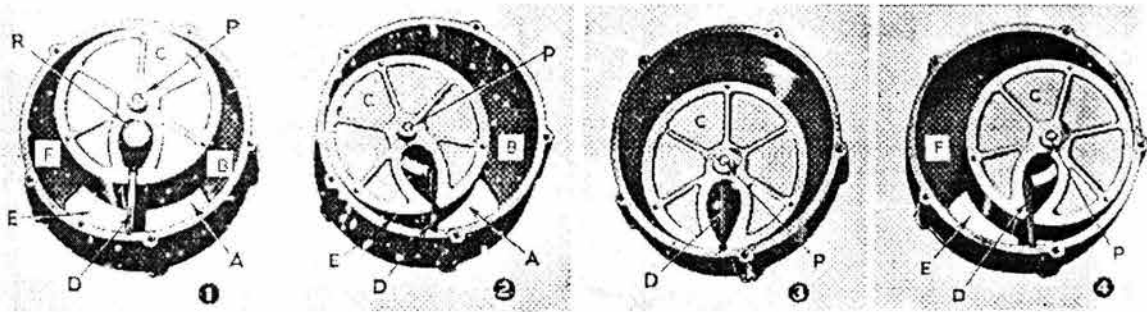


Figura 2.30. Vistas esquemáticas del movimiento de medidor de pistón oscilante.

Ventajas	Desventajas y Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión y repetibilidad. • No tiene restricciones por requerimientos de tramos rectos antes y después del medidor. • Bajo mantenimiento. • Costo moderado • Solo tiene una pieza en movimiento dentro de la cámara de medición. • No hay contacto de metal a metal en la cámara de medición. • Poca caída de presión. • Un verdadero medidor de fluidos por gravedad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponible solamente en tamaños pequeños, normalmente 2 inches o menos. • Energía limitada para el manejo de accesorios. • Los fluidos deben ser limpios.

Tabla 2.14. Ventajas, desventajas y limitaciones de Medidor de Pistón Oscilante.

2.10.1.4 Medidor de Pistón Reciprocante.

La construcción de tipo de pistón reciprocante se muestra en la Figura 2.31. El fluido se mide cuando entra del lado derecho del medidor forzando el movimiento del pistón hacia el lado izquierdo hasta que el cilindro esté lleno y el pistón este totalmente en el extremo izquierdo. En este punto una fuga no permitiría el deslizamiento para mover la válvula. El líquido después de entrar del lado izquierdo del cilindro forzando al pistón a su extremo derecho: Cuando el cilindro se llena, la válvula de deslizamiento se mueve y se repite el ciclo. El brazo externo que causa el movimiento de la válvula de deslizamiento solo maneja un contador el cual provee una cantidad de flujo total que ha pasado a través del medidor (ver Figura 2.31).

Este tipo de medidor se usa para medir gas de uso comercial y domestico. En la Tabla 2.15 se mencionan algunas ventajas, desventajas y limitaciones que presenta este tipo de medidor de flujo.

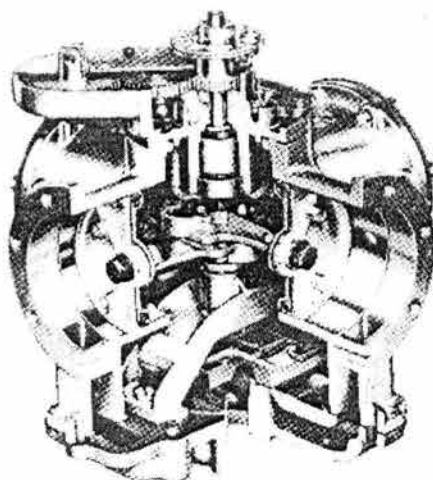


Figura 2.31. Medidor tipo Pistón Reciprocante.

Ventajas	Desventajas y Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Capaz de obtener una buena precisión. • Los materiales de construcción no están limitados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo relativamente alto. • Sujeto a una fuga. • Presenta problemas con fluidos sucios. • El mantenimiento puede ser costoso • Restringido para caudales moderados. • En medición de líquidos produce pulsaciones.

Tabla 2.15. Ventajas, desventajas y limitaciones de Medidor de Pistón Reciprocante.

2.11 MEDIDORES MÁSICOS.

2.11.1 Medidor másico térmico.

Consiste en aportar calor en un punto de la corriente y medir la Temperatura corriente arriba y corriente abajo. Si la velocidad del fluido fuese nula no habría diferencia de temperatura pero al existir velocidad la diferencia de temperatura es proporcional al flujo másico existente. Lo más común es el diseño en bypass. Tiene una precisión de 1%. Ver Figura 2.32.

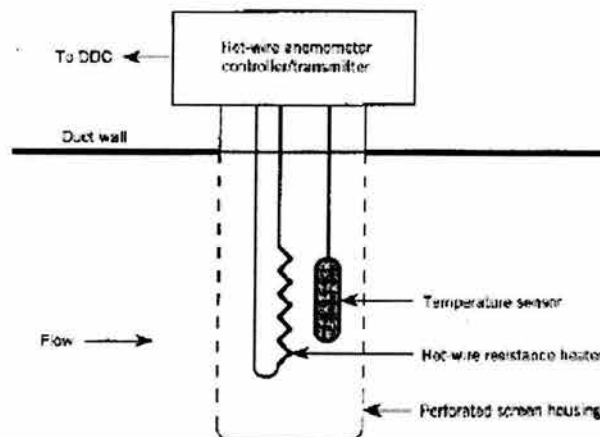


Figura 2.32. Medidor de incremento de temperatura.

2.11.2 Medidor de Coriolis.

El Medidor másico se basa en que la aceleración absoluta de un móvil, que es la resultante de la aceleración relativa, la de arrastre y la de Coriolis (Figura 2.33). Tres bobinas electromagnéticas forman el sensor. La bobina impulsora hace vibrar a los (dos) tubos, sometiéndolos a un movimiento oscilatorio de rotación alrededor del eje de una posición $0 - 0$, vibran a la frecuencia de resonancia (menos energía), 600-2000 Hz. Los 2 detectores electromagnéticos inducen corrientes eléctricas de forma senoidal, que están en fase si no circula fluido. El flujo atraviesa los (dos) tubos en forma de U, estando sometido a una velocidad lineal " v " y una velocidad angular " ω " de rotación alrededor de $0 - 0'$, por lo que sufre una aceleración de Coriolis de valor $a=2 \omega \times v$.

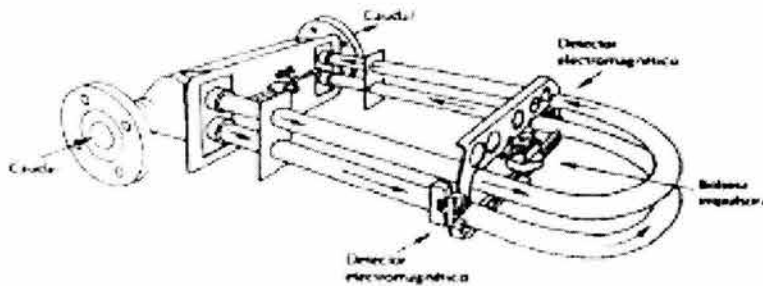
La fuerza ejercida sobre el fluido como consecuencia de la aceleración cambia de signo con " v ", por lo que se generan un par de fuerzas que producen una torsión de los tubos alrededor del eje RR' . La torsión alrededor del eje $R-R'$ produce un desfase de tiempo t ,

entre las corrientes inducidas por los detectores electromagnéticos, que es proporcional al par de fuerzas, ejercido sobre los tubos, y por tanto a la masa que circula por ellos.

Las ventajas son: alta precisión: (0.2 - 0.5%), la medida es independiente de la temperatura, presión, densidad, viscosidad y perfil de velocidades, el mantenimiento es casi nulo, lo que abarata su costo.

Se aplica a fluidos viscosos, sucios, corrosivos con temperatura extrema alta o baja, y con altas presiones.

Tubo sensor mostrando posición de los detectores y bobina impulsora.



Tubo sensor con los ejes de rotación.

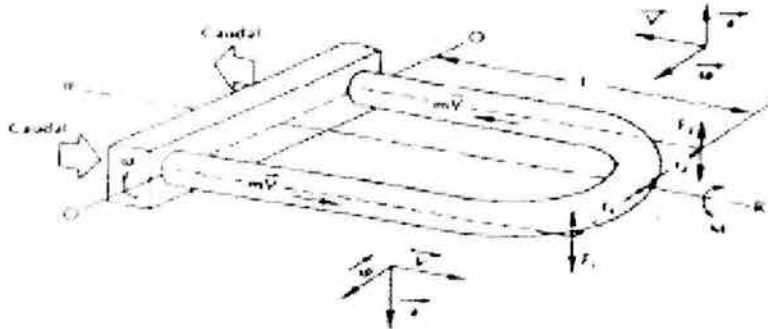


Figura 2.33. Medidor de Másico Coriolis.

CAPITULO III

3.0 CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE LÍQUIDOS TIPO PLACA DE ORIFICIO, TUBO VENTURI Y ROTÁMETRO.

3.1 Alcance.

- Este plan de calibración cubre el cálculo del caudal de manera directa e indirecta para medidores de flujo de presión diferencial y área variable.
- Este procedimiento puede ser aplicado a cualquier sistema de flujo de fluidos que cuente con un medidor de flujo, independientemente del tipo de tecnología que el medidor de flujo use para la medición del caudal.
- Se debe determinar la incertidumbre asociada a los resultados de las mediciones y los parámetros que sean considerados para la aplicación de este plan de calibración.
- Es responsabilidad del usuario establecer las medidas de seguridad apropiadas, para la realización de este plan de calibración.

3.2 Terminología.

Los términos y definiciones utilizados en el plan de calibración están referidos en el Apéndice A.

3.3 Método.

En este plan de calibración se utiliza el método gravimétrico para la medición de la masa del fluido entregado por un sistema en un intervalo de tiempo. Este método se explica detalladamente en el Apéndice A.7.1.1.

3.4 Aparatos.

A continuación se lista el equipo y material utilizado en la calibración:

1. Sistema de flujo.
2. Balanza comparadora (calibrada), Resolución 1/1000 g
3. Termómetro de 0 a 50°C (calibrado), Resolución 1°C
4. Cronómetro de 0 a 10 h, Resolución de 1/100 s.
5. Recipiente para almacenamiento de agua.
6. Tela de algodón (que no suelte pelusa)
7. Agua.

3.5 Operaciones previas

- a) Familiarizarse con el sistema de flujo de fluidos y especificar las siguientes características de la tubería: Cédula, material de construcción, el diámetro nominal (D_N) y diámetro interior (D_{INT}). En caso de no conocer el diámetro nominal (D_N) de la tubería, se puede medir con un vernier el diámetro exterior (D_{EXT}) y del Apéndice D.7, obtener el dato para el diámetro interior (D_{INT}).
- b) Realizar el inventario correspondiente para identificar accesorios, válvulas y variaciones de diámetros en el sistema. Se recomienda dividir y enumerar por tramos la tubería del sistema siguiendo la dirección del flujo desde el tanque de alimentación hasta el tanque receptor.

- c) Especificar los componentes del sistema: La forma, capacidad y una descripción general del tanque de alimentación y tanque receptor, así como el tipo y las características de la bomba del sistema (potencia, rpm, motor, etc).
- d) Realizar el balance de energía correspondiente desde la salida de borde del tanque de alimentación al tanque receptor o de destino (ver Capítulo I, Sección 1.8.2.2). Calcular las pérdidas por fricción por el método de longitudes equivalentes (Capítulo I. Sección 1.9.2.1).
- e) Asegurarse de que el recipiente en el cual se va recibir el líquido del sistema esté limpio y seco. Los objetivos de la limpieza son: que el líquido forme un menisco reproducible con un ángulo plano y una altura unificada, obtener una película fina y evitar que el líquido del sistema se contamine.
- f) Verificar que todas las válvulas del sistema, incluyendo las conexiones de los manómetros, de los medidores de flujo se encuentren cerradas.
- g) Verificar la existencia de alimentación de energía eléctrica.
- h) Revisar que la bomba este adecuadamente acoplada y conectarla al suministro de energía eléctrica.
- i) Llenar el tanque de alimentación con el líquido de proceso.
- j) La válvula de succión de la bomba deberá estar completamente abierta.
- k) Determinar el punto de calibración y abrir la válvula de descarga. La válvula de descarga de la bomba controla el caudal, por lo cual, es importante conocer el número de vueltas o posición de la válvula que ha sido abierta respecto a un punto de referencia conocido [1/8, 1/4, 1/2 , Totalmente abierta (T.A.)], para conocer el caudal que se esta trabajando en la calibración.
- l) Se recomienda seleccionar el punto más cercano al medidor de flujo que se este calibrando para tomar la muestra del líquido de proceso y así evitar pérdidas de energía.

3.6 Plan de calibración.

1. Pesar el recipiente seco, destinado para la toma de muestra del líquido de proceso. A esta medida de masa se denominará Masa del Recipiente Seco (MRS). Se deben realizar al menos cinco mediciones registrando para cada una de ellas la temperatura ambiente (T_{AMB}) y la temperatura del fluido de proceso (T_{FLUIDO}) al momento de realizar cada medición. Se recomienda registrar los datos obtenidos como indica la Tabla 3.1

Recipiente Seco (MRS)				
Medición No.	Masa (g)	Masa (kg)	T_{AMB} (°C)	T_{FLUIDO} (°C)

Tabla 3.1

2. Encender la bomba.

3. Ajustar el caudal requerido con la válvula de descarga de la bomba y registrar la cantidad de vueltas que ha sido abierta la válvula o la posición de la válvula (P. válvula).
4. Dejar que se estabilice el flujo por lo menos durante 1 min.
5. En caso de que los manómetros de los medidores cuenten con válvulas, abrirlas al mismo tiempo y esperar a que se estabilice la indicación del manómetro.
6. Ya realizados los pasos 1 al 4, tomar la muestra del líquido de proceso en el recipiente (paso No.1), cuidando de que el líquido no sea salpicado fuera del recipiente. Medir el tiempo de llenado (t), a un nivel seleccionado antes de su derrame y registrarlo en la Tabla 3.2.
7. Simultáneamente con la toma de la muestra registrar en la Tabla 3.2, la lectura de la altura manométrica (h) o la diferencia de presión indicada por el manómetro del medidor de flujo.
8. También se deberá registrar en la Tabla 3.2 la lectura de la Temperatura ambiente (T_{AMB}) y la Temperatura del fluido del proceso (T_{FLUIDO}).

Medición No.	P. Válvula	Volumen V (m^3)	Tiempo t (s)	h (mmHg)	T_{AMB} (°C)	T_{FLUIDO} (°C)	Caudal (m^3/s)

Tabla 3.2.

9. Pesar el recipiente con la muestra del líquido de proceso en una balanza calibrada, cuidando de que el líquido no sea derramado y registrar el resultado en la Tabla 3.3. A esta masa le denominaremos Masa del Recipiente Lleno (MRL).

Masa del Recipiente Lleno (MRL)				
Medición No.	Masa (g)	Masa (kg)	T_{AMB} (°C)	T_{FLUIDO} (°C)

Tabla 3.3.

10. Calcular la Masa Total de Fluido de proceso (MTF) colectada en el Recipiente, restando la Masa del Recipiente Lleno (MRL) y la Masa del Recipiente Seco (MRS), registrar los resultados en la Tabla 3.4.

Masa Total de Fluido (MTF)				
Medición No.	Masa (g)	Masa (kg)	T_{AMB} (°C)	T_{FLUIDO} (°C)

Tabla 3.4.

11. Apagar el sistema.

12. Calcular el caudal másico (w) mediante la división de Masa Total de Fluido de proceso (MTF) entre el tiempo que tardamos en tomar la muestra y registrarla en la Tabla 3.5. A este caudal se le denominará Caudal Másico Directo (CMD) dividiendo este entre la densidad del líquido de proceso a la temperatura que se está trabajando, obtendremos el Caudal Volumétrico Directo (CVD).

Medición	Masa	Tiempo t	T_{AMB}	T_{FLUIDO}	Caudal Másico Directo (CMD)	Caudal Volumétrico Directo (CVD)
No.	(kg)	(s)	(°C)	(°C)	(Kg/s)	(m ³ /s)

Tabla 3.5.

13. Realizar el balance de energía correspondiente. Calcular el caudal del medidor de flujo que se está calibrando con las ecuaciones descritas en el Capítulo II, sección 2.5, a este caudal le denominaremos Caudal Volumétrico Indirecto (CVI) y Caudal Másico Indirecto (CMI), Tabla 3.6.

Medidor	Caudal Volumétrico Indirecto	Caudal Másico Indirecto
Tipo	CVI	CMI

Tabla 3.6.

14. Repetir el procedimiento, hasta obtener mínimo cinco mediciones en cada apertura programada para la válvula de descarga de la bomba.
15. Realizar el cálculo de la incertidumbre asociada al medidor de flujo (Este inciso se detalla en el Capítulo IV).

3.7 APLICACIÓN DEL PLAN DE CALIBRACIÓN.

3.7.1 Operaciones previas.

- a) El sistema de flujo de fluidos del Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la U.N.A.M. tiene entre sus objetivos, introducir a los alumnos de ingeniería química por medio de la práctica, al manejo de los medidores de flujo (Placa de orificio, Venturi y Rotámetro), familiarizarlos con el sistema, y realizar el balance de energía correspondiente, entre otros.

Debido a que la tubería del sistema cuenta con una variación de diámetro se reportan los resultados para ambos diámetros:

Diámetro nominal (D_N)	2 ½ in	1 ½ in
Diámetro externo (D_{EXT})	2,875 in	1,900 in
Diámetro interno (D_{INT})	2,469 in	1,610 in
Material	Acero comercial	Acero comercial
Cédula	40	40

- b) Realizar el inventario. El sistema se dividió en tres tramos para identificar los accesorios y válvulas en cada uno de ellos, esto se hizo siguiendo la dirección del flujo desde el Tanque de alimentación (T_A) hasta el Tanque Receptor (T_R) (Ver diagrama 3.1). La división de los tramos de tubería se realizó de la siguiente manera:

Tramo 1. Desde la salida del borde del Tanque de alimentación (T_A) a la succión de la bomba.

Tramo 2. Desde la descarga de la bomba a la expansión (E).

Tramo 3. Desde la expansión al Tanque Receptor (T_R).

- c) Especificación de los componentes del sistema:

TANQUE DE ALIMENTACIÓN (T_A).

Forma: cilíndrica.

Posición: horizontal

Capacidad: 2100 L

Descripción: Tanque cerrado, cuenta con una tubería para alimentación de agua, venteo, medidor de nivel, tubería para descarga hacia el sistema y tubería para recircular el agua.

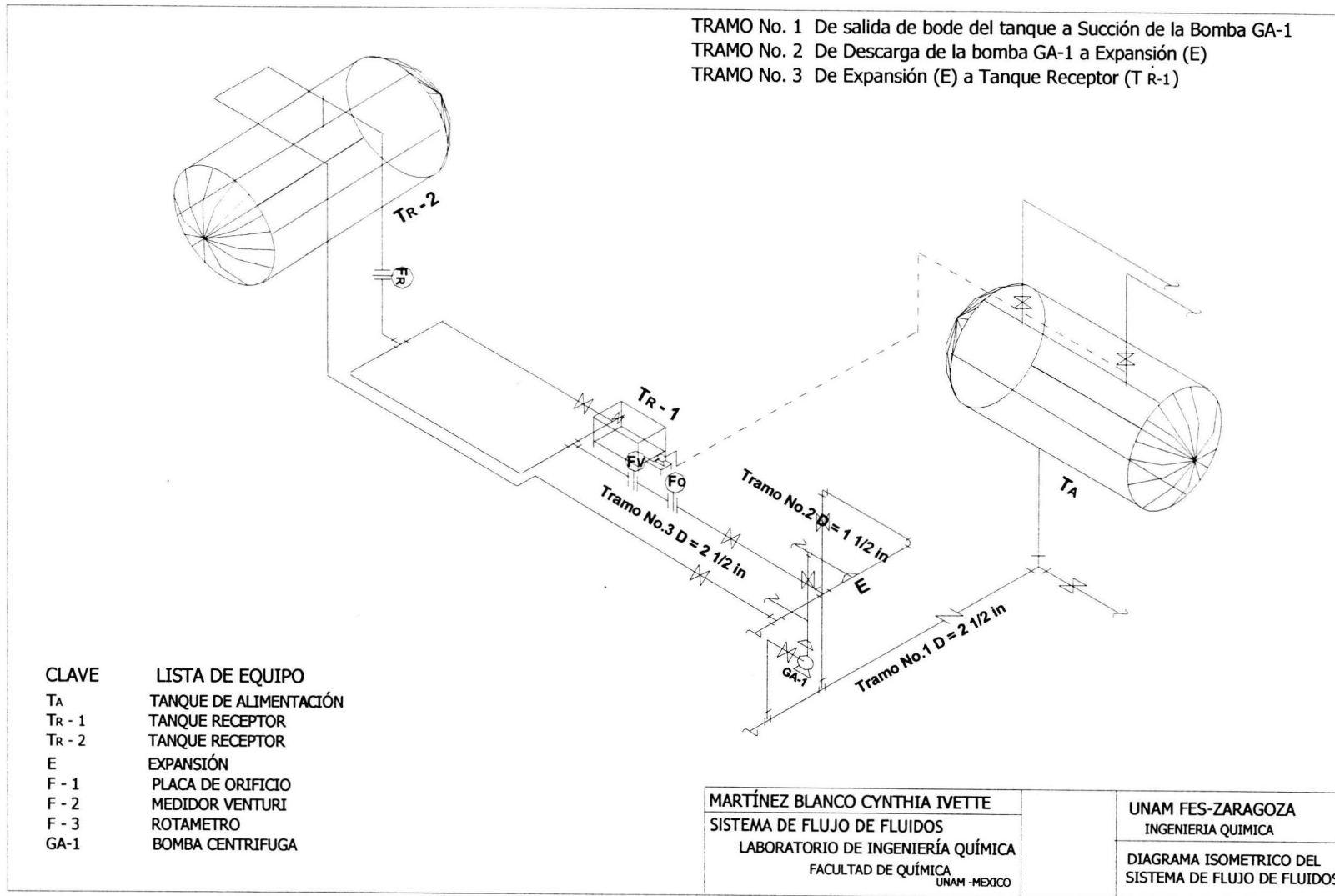
TANQUE RECEPTOR (T_R - 1)

Forma: cúbica

Posición: horizontal

Descripción: Se encuentra abierto a presión atmosférica, recibe el agua del sistema, cuenta con una bomba para recircular el agua al tanque de alimentación (T_A) con ayuda de una manguera flexible.

Diagrama 3.1



TANQUE RECEPTOR ($T_R - 2$)

Forma: cúbica
 Posición: horizontal
 Descripción: Se encuentra abierto a presión atmosférica, recibe el agua del sistema, puede recircular el agua al tanque de alimentación (T_A) por gravedad.

CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA (GA-1):

Tipo	Centrifuga
Ciclos	60
Volts	220/440
Potencia	1Hp
Amp	4/2
RPM	3475

d) Cálculo del Bernoulli de acuerdo a los procedimientos del Capítulo I, sección 1.8.2.2 y Sección 1.9.2.1.

d.1) Se realizó el inventario correspondiente al sistema de flujo y debido a que el sistema presenta cambios de diámetro de tubería se dividió en tres tramos. El cálculo de las pérdidas por fricción se realizó por el método de longitudes equivalentes obteniendo los siguientes resultados.

Tramo No. 1	D_N 2 ½ in	D_{EXT} 73 mm	D_{INT} 62,7 mm	D_{INT} 0,0627 m	
Accesorio	Cantidad (#)	L/D	$L/D * D_{INT} = L_{EI}$	$L_{EI} * \# = L_{ET}$ (m)	L_{TR} (m)
Salida de borde	1	55	3,449	3,449	0,84
Codo de esquina	1	57	3,574	3,574	0,92
Válvula Check	1	135	8,465	8,465	3,1
T de flujo recto	2	20	1,254	2,508	0,34
Codo 90°	1	30	1,881	1,881	0,27
VCTA	1	13	0,815	0,815	0,16
				$\Sigma L_{EI} = 20,691$	$\Sigma L_{TR} = 5,63$

$$L_{T1} = 20,691 \text{ m} + 5,63 \text{ m} = 26,321 \text{ m}$$

Tramo No. 2	D_N 1 ½ in	D_{EXT} 48,3 mm	D_{INT} 40,9 mm	D_{INT} 0,0409 m	
Accesorio	Cantidad (#)	L/D	$L/D * D_{INT} = L_{EI}$	$L_{EI} * \# = L_{ET}$ (m)	L_{TR} (m)
T de flujo recto	2	20	0,818	1,636	0,46
VCTA	1	13	0,532	0,532	0,23
Ensanchamiento 1 ½ " x 2 ½ "	1	25	1,023	1,023	0,16
				$\Sigma L_{EI} = 3,190$	$\Sigma L_{TR} = 0,85$

$$L_{T2} = 3,190 \text{ m} + 0,85 \text{ m} = 4,040 \text{ m}$$

Tramo No. 3	D_N 2 ½ in	D_{EXT} 73 mm	D_{INT} 62,7 mm	D_{INT} 0,0627 m	
Accesorio	Cantidad (#)	L/D	$L/D * D_{INT} = L_{Ei}$	$L_{Ei} * \# = L_{ET}$ (m)	L_{TR} (m)
T de flujo recto	4	20	1,254	5,016	0,87
VGTA	1	340	21,318	21,318	0,55
VBTA	1	150	9,405	9,405	6,9
Contracción 2"x1.5"	1	10	0,627	0,627	0,1
				$\Sigma L_{EIT} = 36,366$	$\Sigma L_{TR} = 8,42$

$$L_{T3} = 36,366 \text{ m} + 8,42 \text{ m} = 44,786 \text{ m}$$

Donde:

D_N = Diámetro nominal de la tubería.

D_{INT} = Diámetro interior de la tubería.

D_{EXT} = Diámetro exterior de la tubería.

L_{ET} = Longitud equivalente total.

L_{TRT} = Longitud de tramos rectos totales que componen el sistema de flujo.

L_T = Longitud equivalente total.

L/D = Relación longitud diámetro para cada accesorio presente en el sistema.

L_{Ei} = Longitud equivalente para cada accesorio.

= Cantidad de accesorios del mismo tipo presentes en el sistema.

d.2) Obteniendo los datos de las variables de la ecuación de Bernoulli, realizando las suposiciones correspondientes y calculando las pérdidas por fricción correspondiente se obtuvieron los siguientes resultados.

Suposiciones:

Se considerara el líquido del proceso como agua limpia.

El medidor de nivel del tanque de alimentación funciona correctamente.

Se considera que la tubería del sistema esta limpia.

Medidores de flujo en buen estado (sin corrosión).

Datos:

ρ = Densidad del agua @ 19°C = 998,36 kg/m³

μ = Viscosidad del agua @ 19°C = 1,03E-03 kg/m·s

ρ_m = Densidad del mercurio @ 19.5°C = 13577,696 kg/m³

ε = Rugosidad relativa = 0,00005 m

g = Gravedad local = 9,7792644 m/s²

g_c = Constante gravitacional local = 9,7792644 Kgm/kgf·s²

D1 = Diámetro tramo 1 = 0,0627 m

D2 = Diámetro tramo 2 = 0,0409 m

D3 = Diámetro tramo 3 = 0,0627 m

Cálculo del factor de fricción (f) de cada tramo por ecuación de Colebrook (1.18).

Tramo No.	1		2		3	
	f nuevo	f	f nuevo	f	f nuevo	f
	0,02	0,0246	0,02	0,0242	0,02	0,0246
	0,0246	0,0241	0,0242	0,0239	0,0246	0,0241
	0,0241	0,0242	0,0239	0,0239	0,0241	0,0242
	0,0242	0,0242	0,0239	0,0239	0,0242	0,0242

Tramo No.	L_T (m)	Hfs (kgf.m/kg)
1	26,258	0,2393
2	4,040	0,3089
3	44,786	0,4081

Cálculo de Hfs en los medidores de flujo por método simplificado [ecuación (1.27)].

Tipo de medidor	h medidor m	ΔP kgf/m ²	Hfs kgf.m/kg
ORIFICIO	0,109	1371,148	1,373
VENTURI	0,286	3597,690	3,604

Cálculo de Hfs_T Total para el Balance General.

Balance	Hfs _T kgf.m/kg
General	5,9334

Resultados del Balance de Energía.

Balance Tramo No.	A m ²	Q m ³ /s	v ₂ m/s	ΔZ m	Re	f	ΔP kg/m ²	Hfs _T kgf.m/kg
General	0,0031	0,0021	0,6801	0,3	4,13E+04	0,0242	849,32	5,9334
1	0,0031	0,0021	0,6801	0,52	4,13E+04	0,0242	849,32	0,2393
2	0,0013	0,0021	1,5984	0,82	6,32E+04	0,0239	849,32	0,3089
3	0,0031	0,0021	0,6801	0,82	4,13E+04	0,0242	849,32	0,4081

Balance Tramo No.	w kg / s	Wf kgf.m/kg	PH Kgf m/s	PH Hp
General	2,0966	10,4097	21,8244	0,29
1	2,0966	4,9356	10,3478	0,14
2	2,0966	9,7952	20,5361	0,27
3	2,0966	5,4044	11,3307	0,15

3.7.2 Plan de calibración.

Paso No.1. Masa del Recipiente Seco (MRS). Debido a las características y el caudal registrado por los sistemas se hizo uso de dos recipientes para tomar la muestra del líquido de proceso, una Probeta con capacidad de 0,002 m³ (MRS₁) y una Cubeta (nueva) con capacidad de 0,008 m³ (MRS₂) registrando las mediciones en las Tablas 3.1.1 y 3.1.2 respectivamente.

Masa de la Probeta Seca (MRS ₁)				
Medición No.	Masa (g)	Masa (kg)	T _{AMB} (°C)	T _{FLUIDO} (°C)
1	407,67	0,40767	19,5	19
2	407,66	0,40766	19,5	19
3	407,67	0,40767	19,5	19
4	407,66	0,40766	19,5	19
5	407,66	0,40766	19,5	19

Tabla 3.1.1. Peso de la probeta 0,002 m³.

Masa de la Cubeta Seca (MRS ₂)				
Medición No.	Masa (g)	Masa (kg)	T _{AMB} (°C)	T _{FLUIDO} (°C)
1	315,58	0,31558	19,5	19
2	315,55	0,31555	19,5	19
3	315,55	0,31555	19,5	19
4	315,57	0,31557	19,5	19
5	315,57	0,31557	19,5	19

Tabla 3.1.2 Peso de la cubeta 0,008 m³.

Siguiendo los pasos No. 2 al 8 con la válvula de descarga totalmente abierta (T.A.) de la bomba se obtuvieron los siguientes resultados:

Medición No.	P. Válvula	Volumen V (m ³)	Tiempo t (s)	h	h	T _{AMB} (°C)	T _{FLUIDO} (°C)	Caudal (m ³ /s)
				Placa de orificio (mmHg)	Medidor Venturi (mmHg)			
1	T.A.	0,006	2,19	109	285	19,5	19	2,739E-3
2	T.A.	0,006	2,26	109	286	19,5	19	2,654E-3
3	T.A.	0,006	2,2	109	286	19,5	19	2,727E-3
4	T.A.	0,006	2,19	109	286	19,5	19	2,739E-3
5	T.A.	0,006	2,2	109	286	19,5	19	2,727E-3

Tabla. 3.2.

Paso No. 9. El recipiente utilizado para la toma de las muestras del líquido de proceso, para posición de válvula totalmente abierta (T.A.), se utiliza una cubeta con capacidad de 0.008 m³, colectando 0.006 m³, la capacidad de la balanza que es de 5000 g, representa

una limitación, por lo tanto se dividió la muestra en tres partes denominadas (A, B, C) en una probeta con capacidad de 0,002 m³ para obtener la Masa del Recipiente Lleno (MRL). Por lo cual es necesario conocer masa de ambos recipientes húmedos para estimar las pérdidas del líquido para ambos recipientes que las denominaremos como Masa de la probeta húmeda (MRH₁) y Masa de la cubeta húmeda (MRH₂), siguiendo este procedimiento se obtuvieron los siguientes resultados:

Medición	MRL (Probeta)			MRH ₁		MRS ₁	MRH ₂	MRS ₂
	A	B	C	D	E		F	
No.	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
1	2,3434	2,3713	1,9548	0,41285	0,41363	0,40767	0,31802	0,31558
2	2,3636	2,3662	1,8992	0,41276	0,4134	0,40766	0,31797	0,31555
3	2,3595	2,3872	1,3013	0,41276	0,4134	0,40767	0,31797	0,31555
4	2,3505	2,3751	1,8306	0,41275	0,41351	0,40766	0,31762	0,31557
5	2,3715	2,3429	1,8502	0,41282	0,41391	0,40766	0,31723	0,31557

Tabla 3.3.

Paso No. 10, Masa Total del Fluido de proceso colectado (MTF). Por no contar con el equipo necesario la masa total de fluido para posición de válvula de descarga de la bomba totalmente abierta (T.A.) se cálculo de la siguiente manera:

$$M1 = A - MRS_1$$

$$M2 = (B - MRS_1) - (D - MRS_1)$$

$$M3 = (C - MRS_1) - (E - MRS_1)$$

$$M4 = F - MRS_2$$

Entonces la Masa Total del Fluido de proceso queda como:

$$MTF = M1 + M2 + M3 + M4$$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Medición No.	Masa Total del Fluido (MTF)			
	Masa (g)	Masa (kg)	T _{AMB} (°C)	T _{FLUIDO} (°C)
1	5437,82	5,43782	19,5	19
2	5397,61	5,39761	19,5	19
3	4816,55	4,81655	19,5	19
4	5324,4	5,3244	19,5	19
5	5331,79	5,33179	19,5	19

Tabla 3.4.

Paso No. 12, Caudal Másico Directo (CMD) y Caudal Volumétrico Directo (CVD).

Medición	Masa	Tiempo t	T_{AMB}	T_{FLUIDO}	Caudal Másico Directo (CMD)	Caudal Volumétrico Directo (CVD)
No.	(kg)	(s)	(°C)	(°C)	(Kg/s)	(m ³ /s)
1	5,4378	2,19	19,5	19	2,4830	0,0025
2	5,3976	2,26	19,5	19	2,3883	0,0024
3	4,8166	2,2	19,5	19	2,1893	0,0023
4	5,3244	2,19	19,5	19	2,4312	0,0024
5	5,3318	2,2	19,5	19	2,4235	0,0024
Promedio	5,2616	2,208	19,5	19	2,3831	0,0024

Tabla 3.5.

Paso No. 13, Cálculo del caudal Capítulo II, sección 2.5, para la Placa de Orificio ecuación (2.6), Medidor Venturi ecuación (2.11) y Rotámetro ecuación (2.17) se obtuvieron los siguientes resultados:

Medidor	Caudal Volumétrico Indirecto	Caudal Másico Indirecto
Tipo	CVI	CMI
Placa de Orificio	0,0018 m ³ /s	1,8249 kg/s
Venturi	0,0026 m ³ /s	2,5930 kg/s
Rotámetro	0,0027 m ³ /s	2,7449 kg/s

Tabla 3.6.

CAPITULO IV

4.1 Determinación de la incertidumbre en medidores de flujo.

Los factores que afectan de manera significativa el resultado de una medición de flujo se discutieron anteriormente, se propusieron posibles pasos remediales para disminuir la incertidumbre de la medición. Cuando se conoce la precisión de los instrumentos de medición para cada parámetro, como por ejemplo, el diámetro, la diferencia de presión, la temperatura, etc. , puede predecirse la incertidumbre del caudal asociada a cada medición. Este método de predicción esta basado en la relación teórica de cada parámetro para el caudal.

Existen diversos estándares para evaluar y estimar la contribución de la incertidumbre para cada parámetro de medición por ejemplo las normas ISO 9000 (ver Apéndice A). Cada termino en la ecuación de medición de flujo y su exponente define la magnitud de la incertidumbre, entre otros parámetros. El método de estimación esta definido matemáticamente y esta basado en teorías y análisis estadísticos (ver Apéndice A).

El calculo de incertidumbre incluido en este trabajo (Capitulo IV), se realizó con base en las recomendaciones de los siguientes documentos:

- “*Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*” (“Expresión de la incertidumbre de medida en las calibraciones”) de abril de 1997.
- Nota técnica 1297 de NIST: “*Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*” 1994 Edition; (“Recomendaciones para la evaluación y expresión de la incertidumbre de los resultados de las medidas realizadas”).
- Ambos documentos están en concordancia con la Guía 25 de ISO : “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*”, conocida como GUM; (“Guía para la expresión de la incertidumbre de medida”).

4.2 INCERTIDUMBRE DE LA PLACA DE ORIFICIO.

Ecuación para calcular el caudal volumétrico en medidor de flujo del tipo placa de orificio.

$$Q = C_D A_o \sqrt{\frac{2g_c \Delta P}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (4.1)$$

Donde:

- Q = Caudal volumétrico en el medidor en [m³/s].
- C_D = Coeficiente de descarga
- A_o = Área del orificio en [m²].
- g_c = Constante gravitacional en [kg·m / kgf·s].
- ρ = Densidad del fluido de proceso en [kg/m³].
- A₂ = Área del orificio en [m²].
- A₁ = Área de la tubería en [m²].
- ΔP = Presión diferencial en [kgf / m²].

De acuerdo a la ecuación (4.1) se puede ver que la función del caudal volumétrico (Q) está dado por los siguientes parámetros:

$$Q = Q(C_D, A_0, g_C, \Delta P, \rho, A_2, A_1)$$

De la aplicación del plan de calibración [Capítulo III, sección (3.7)] se obtuvieron los valores para los parámetros que intervienen en la ecuación (4.1) y se muestran en la siguiente tabla:

Parámetro de la ecuación (4.1)	Valor	Unidades
C_D = Coeficiente de Descarga	0,605	adimensional
β = Relación Beta	0,4242	adimensional
d = Diámetro del orificio	0,0266	m
D_t = Diámetro interno Tubería	0,0627	m
L_1 = Corrección dimensional para I_1	4,6352	adimensional
I_1 = Localización toma de presión corriente arriba	0,29	m
L_2 = Corrección dimensional para I_2	5,018	adimensional
I_2 = Localización toma de presión corriente abajo	0,314	m
Re = Número de Reynolds	4,93E04	adimensional
ρ = Densidad del fluido de proceso @ 19°C	998,36	kg/m ³
μ = Viscosidad del fluido de proceso @ 19°C	1,03E-03	kg/m·s
v = Velocidad de Flujo en la tubería	0,6801	m/s
A_t = Área de la tubería	0,0031	m ²
Q_t = Caudal en la tubería	0,0021	m ³ /s
V = Volumen registrado	0,1	m ³
t = Tiempo registrado	46,96	s
ΔP = Diferencia de presión	135,2288	kgf/m²
ρ_m = Densidad del líquido manométrico @ 19.5°C	13577,696	kg/m ³
g = Valor de la gravedad local	9,7792644	m/s ²
g_C = Constante gravitacional local	9,7792644	Kg·m/kgf·s ²
h = Altura Manométrica	0,109	m
Hfs = Pérdidas por Fricción	1,3595	kgf·m/kg
v_o = Velocidad de Flujo en el orificio	5,2421	m/s
A_o = Área del Orificio	0,0006	m ²
Q_o = Caudal Volumétrico registrado en la placa o.	0,0018	m³/s
w_o = Caudal Masico de la placa de orificio.	1,8249	kg/s

Tabla 4.1.

Con los valores mostrados en la Tabla 4.1 se realizaron los cálculos correspondientes para la determinación de la incertidumbre de medición de la ecuación (4.1).

“La incertidumbre de medición expandida informada fue calculada multiplicando la incertidumbre estándar combinada por un factor de cobertura $k=2$, lo que corresponde a un nivel aproximado de confianza del 95% bajo distribución normal”

Los valores de “t” de student se muestran en la Tabla A.1 del Apéndice A.

Evaluación de la incertidumbre de los componentes de la ecuación (4.1).

$$\frac{\partial Q}{\partial C_D} = A_0 \sqrt{\frac{2g_c \Delta P}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} = 0,0029 \frac{m^3}{s} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial A_0} = C_D \sqrt{\frac{2g_c \Delta P}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} = 3,1746 \frac{m}{s} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial g_c} = \frac{1}{2} C_D A_0 \sqrt{\frac{2\Delta P}{g_c \rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} = 9,02 \times 10^{-5} \frac{kgf \cdot s \cdot m^2}{kg} \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \Delta P} = \frac{1}{2} C_D A_0 \sqrt{\frac{2g_c}{\Delta P \rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} = 6,499 \times 10^{-7} \frac{m^5}{kgf \cdot s} \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \rho} = C_D A_0 \cdot \frac{g_c \Delta P}{\rho^2 \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{2g_c \Delta P}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}}} = 1,6856 \times 10^{-7} \frac{m^6}{kg \cdot s} \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial A_2} = C_D A_0 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1^2} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{2g_c \Delta P}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]^3}}} = -0,0506 \frac{m}{s} \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial A_1} = C_D A_0 \cdot \frac{1}{A_1^3} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{2g_c \Delta P}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]^3}}} = -58955,1858 \frac{m}{s} \quad (4.8)$$

4.2.1 Incertidumbre para el coeficiente de descarga C_D .

Una ecuación generalizada para evaluar el coeficiente de descarga de un medidor de flujo de orificio fue desarrollada por el científico Francés J. Stloz, y fue aceptada por la Organización Internacional de Normas (ISO) y ASME para tuberías de 2 in de diámetro en adelante, dicha ecuación se muestra enseguida:

$$C_D = 0.5959 + 0.0312 \cdot \beta^{2.1} - 0.1840 \cdot \beta^3 + \frac{0.0900 \cdot L_1 \cdot \beta^4}{(1 - \beta^4)} - 0.0337 \cdot L_2 \cdot \beta^3 + \frac{91.71 \cdot \beta^{2.5}}{Re^{0.75}} \quad (4.9)$$

donde:

β = relación entre el diámetro del orificio y el diámetro de la tubería (d/D).

L_1 = corrección dimensional para localización de las tomas de corriente arriba.

= l_1/D relación que existe entre la distancia de la toma de presión corriente arriba respecto a la placa de orificio.

L_2 = corrección dimensional para localización de las tomas de corriente abajo.

= l_2/D relación que existe entre la distancia de la toma de presión corriente abajo respecto a la placa de orificio.

Re = número de Reynolds.

De acuerdo a la ecuación (4.9) el coeficiente de descarga se encuentra en función de los siguientes parámetros:

$$C_D = f(\beta, L_1, L_2, Re)$$

de la ecuación (4.9).

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_D}{\partial \beta} &= (2.1 \cdot 0.0312 \cdot \beta^{1.1}) - (8.0 \cdot 0.184 \cdot \beta^7) - \left[(4 \cdot 0.09 \cdot L_1 \cdot \beta^3) \cdot (1 - \beta^4) + \left(\frac{4 \cdot \beta^3 \cdot 0.09 \cdot L_1 \cdot \beta^4}{(1 - \beta^4)^2} \right) \right] \\ &\quad - (3 \cdot 0.033 \cdot L_2 \cdot \beta^2) + \left(\frac{2.5 \cdot 91.71 \cdot \beta^{1.5}}{Re^{0.75}} \right) = -1.81E - 01 \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial C_D}{\partial L_1} = \frac{0.0900 \cdot \beta^4}{(1 - \beta^4)} = 0.0030 \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial C_D}{\partial L_2} = 0.033 \cdot \beta^3 = -0.0026 \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial C_D}{\partial Re} = -\frac{0.75 \cdot 91.71 \cdot \beta^{2.5}}{Re^{1.75}} = -6.66 \times 10^{-8} \quad (4.13)$$

Incertidumbre combinada asociada a la relación β .

$$\beta = \frac{d}{D_t} \quad (4.14)$$

donde:

d = diámetro del orificio.

D_t = diámetro de la tubería.

de la ecuación (4.14)

$$\frac{\partial \beta}{\partial d} = \frac{1}{D_t} = 15,949 \frac{1}{m} \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial D_t} = -\frac{d}{D_t^2} = -6,766 \frac{1}{m} \quad (4.16)$$

$$Ud = 0m$$

$$UD_t = 0m$$

$$U_c \beta = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial d}\right)^2 Ud^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial D_t}\right)^2 UD_t^2} = 0 \quad (4.17)$$

Incertidumbre combinada asociada a L_1 .

$$L_1 = l_1/D_t \quad (4.18)$$

donde:

l_1 = distancia desde la placa de orificio a la toma de presión corriente arriba.

D_t = diámetro de la tubería.

de la ecuación (4.18)

$$\frac{\partial L_1}{\partial l_1} = \frac{1}{D_t} = 15,949 \frac{1}{m} \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial L_1}{\partial D_t} = -\frac{l_1}{D_t^2} = -73,767 \frac{1}{m} \quad (4.20)$$

$$Ul_1 = 2,8868 \times 10^{-3} m$$

$$UD_t = 0m$$

$$U_{CL_1} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial L_1}{\partial l_1}\right)^2 UI_1^2 + \left(\frac{\partial L_1}{\partial D_t}\right)^2 UD_t^2} = \pm 4,604 \times 10^{-2} \quad (4.21)$$

Incertidumbre expandida para L_1 .

$$U_{EL_1} = \pm k \cdot U_{CL_1} = \pm (2 * 4,604 \times 10^{-2}) = \pm 0,092 m^3$$

Incertidumbre combinada asociada a L_2 .

$$L_2 = l_2 / D_t \quad (4.22)$$

donde:

l_2 = distancia desde la placa de orificio a la toma de presión corriente abajo.
 D_t = diámetro de la tubería.

de la ecuación (4.22)

$$\frac{\partial L_2}{\partial l_2} = \frac{1}{D_t} = 15,949 \frac{1}{m} \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial D_t} = -\frac{l_2}{D_t^2} = -79,872 \frac{1}{m} \quad (4.24)$$

$$UI_2 = 2,8868 \times 10^{-3} m$$

$$UD_t = 0 m$$

$$U_{CL_2} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial L_2}{\partial l_2}\right)^2 UI_2^2 + \left(\frac{\partial L_2}{\partial D_t}\right)^2 UD_t^2} = \pm 4,604 \times 10^{-2} \quad (4.25)$$

Incertidumbre expandida para L_2 .

$$U_{EL_2} = \pm k \cdot U_{CL_2} = \pm (2 * 4,604 \times 10^{-2}) = \pm 0,092 m^3$$

Incertidumbre combinada asociada al Número de Reynolds (Re).

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} \quad (4.26)$$

donde:

- ρ = densidad del fluido de proceso.
- v = velocidad del fluido del proceso.
- μ = viscosidad del fluido del proceso.
- D = diámetro de la tubería.

De acuerdo a la ecuación (4.26) el número de Reynolds se encuentra en función de los siguientes parámetros:

$$\text{Re} = f(\rho, D, v, \mu)$$

de la ecuación (4.26)

$$\frac{\partial \text{Re}}{\partial \rho} = \frac{vD_t}{\mu} = 41,6535 \frac{m^3}{kg} \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial \text{Re}}{\partial D_t} = \frac{\rho v}{\mu} = 66324,37 \frac{1}{m} \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial \text{Re}}{\partial \mu} = -\frac{\rho D_t v}{\mu^2} = -40295769,3 \frac{m \cdot s}{kg} \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial \text{Re}}{\partial v} = \frac{\rho D_t}{\mu} = 60656,174 \frac{s}{m} \quad (4.30)$$

$$U_\rho = 0 \frac{kg}{m^3}$$

$$U_{D_t} = 0 m$$

$$U_\mu = 0 \frac{kg}{m \cdot s}$$

$$U_C \text{Re} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial \rho}\right)^2 U_\rho^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial D_t}\right)^2 U_{D_t}^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial v}\right)^2 U_v^2 + \left(\frac{\partial \text{Re}}{\partial \mu}\right)^2 U_\mu^2} = \pm 1,2 \times 10^4 \quad (4.31)$$

Incertidumbre expandida para Re.

$$U_E \text{Re} = \pm k \cdot U_C \text{Re} = \pm (2 * 1,2 \times 10^4) = \pm 2,402 \times 10^4$$

Incertidumbre asociada a la velocidad (v) para el Número de Reynolds.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (4.32)$$

donde:

Q = caudal volumétrico en la tubería m^3/s .

A_o = Área de la tubería m^2 .

De la ecuación (4.32)

$$\frac{\partial v}{\partial Q_t} = \frac{1}{A_t} = -4,48 \times 10^{-5} \frac{1}{m^2} \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial v}{\partial A_t} = -\frac{Q}{A_t^2} = 0,021 \frac{m}{s} \quad (4.34)$$

Incertidumbre asociada al caudal en la tubería (Qt).

El caudal de la tubería se midió tomando como referencia el medidor de nivel del tanque de alimentación, y el tiempo de descarga cada $0,1 m^3$ con un cronometro, los resultados obtenidos son los siguientes:

MEDIDA No.	VOLUMEN (V) m^3	TIEMPO (t) s	CAUDAL (Q t) m^3/s
1	0,1	47,25	0,00211
2	0,1	47,99	0,00208
3	0,1	46,46	0,00215
4	0,1	47,02	0,00213
5	0,1	46,07	0,00217
Xpromedio	0,1	46,96	0,00213
S_m	0	0,74	$3,319 \times 10^{-3}$

Tabla 4.2.

como:

$$Qt = \frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}} \quad (4.35)$$

de la ecuación (4.35)

$$\frac{\partial Qt}{\partial V} = \frac{1}{t} = 0,0212 \frac{1}{s} \quad (4.36)$$

$$\frac{\partial Qt}{\partial t} = -\frac{V}{t^2} = -4,5 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s^2} \quad (4.37)$$

Incertidumbre tipo A del volumen del caudal en la tubería.

La incertidumbre tipo A del volumen (V) de la Tabla 4.2 está dada por la siguiente ecuación:

$$U_A V = \pm \frac{S_V}{n} \cdot "t"$$

$$"t" = 1,11$$

$$S_V = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [V_i - V]^2} = 0m^3$$

$$U_A V = \pm \frac{0m^3}{\sqrt{5}} \cdot 1,11 = 0m^3$$

Incertidumbre tipo B del volumen del caudal de la tubería.

El caudal de la tubería se midió tomando como referencia el medidor de nivel del tanque de alimentación que tiene una resolución de $0,1 m^3$ y no cuenta con informe de calibraciones anteriores ni con información del fabricante

Con estos datos se puede obtener las siguientes incertidumbres tipo B:

Incertidumbre por resolución:

$$U_{BR} V = \pm \frac{0,1m^3}{2\sqrt{3}} = \pm 0,0289m^3$$

Incertidumbre combinada del volumen para el caudal en la tubería.

$$U_C V = \pm \sqrt{U_A^2 V + U_{BR}^2 V}$$

$$U_C V = \pm \sqrt{(0m^3)^2 + (0,0289m^3)^2} = \pm 0,029m^3 \quad (4.38)$$

Incertidumbre expandida del volumen para calcular el caudal en la tubería.

$$U_E V = \pm k \cdot U_C V = \pm (2 * 0,029m^3) = \pm 0,0577m^3$$

Incertidumbre tipo A del tiempo de descarga para calcular el caudal en la tubería.

La incertidumbre tipo A del tiempo (t) de la Tabla 4.2 está dada por la siguiente ecuación:

$$U_{At} = \pm \frac{S_t}{n} \cdot "t"$$

$$"t" = 1,11$$

$$S_t = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [t_i - t]^2} = 0,74s$$

$$U_{At} = \pm \frac{0,74s}{\sqrt{5}} \cdot 1,11 = \pm 0,367s$$

Incertidumbre tipo B del tiempo del caudal de la tubería.

El tiempo de descarga se midió con un cronometro de marca SC-Sport Chronomete Robotic con una resolución de 0,01s, no hay información del fabricante.

Con estos datos se puede obtener las siguientes incertidumbres tipo B:

Incertidumbre por resolución:

$$U_{BRt} = \pm \frac{0,01s}{2\sqrt{3}} = \pm 0,0058s$$

Incertidumbre combinada del tiempo para el caudal en la tubería.

$$U_{Ct} = \pm \sqrt{U_{At}^2 + U_{BRt}^2}$$

$$U_{Ct} = \pm \sqrt{(0,74s)^2 + (0,0058s)^2} = \pm 3,67 \times 10^{-1} s \quad (4.39)$$

Incertidumbre expandida del tiempo para calcular el caudal en la tubería.

$$U_{Et} = \mp k \cdot U_{Ct} = \pm (2 * 3,67 \times 10^{-1} s) = \pm 7,35 \times 10^{-1} s$$

Incertidumbre combinada asociada a la velocidad para el número de Reynolds es:

$$U_{Cv} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial Q}\right)^2 U_{Q^2} + \left(\frac{\partial v}{\partial A_t}\right)^2 U_{A_t}^2} = \pm 2,89 \times 10^{-2} \frac{m}{s} \quad (4.40)$$

Incertidumbre expandida de la velocidad para el número de Reynolds.

$$U_{Ev} = \pm k \cdot U_{Cv} = \pm(2 * 2,89 \times 10^{-2}) = \pm 5,77 \times 10^{-2} \frac{m}{s}$$

Por lo tanto la Incertidumbre combinada asociada al caudal volumétrico en la tubería (Qt).

$$U_{CQt} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial Qt}{\partial v}\right)^2 U_v^2 + \left(\frac{\partial Qt}{\partial t}\right)^2 U_t^2} = \pm 6,113 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s} \quad (4.41)$$

Incertidumbre expandida del caudal volumétrico en la tubería (Qt).

$$U_{EQt} = \pm k \cdot U_{CQt} = \pm(2 * 6,11 \times 10^{-4}) = \pm 1,22 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}$$

Incertidumbre combinada asociada al coeficiente de descarga C_D .

Ya calculados los parámetros involucrados en el coeficiente de descarga se calcula la incertidumbre con la siguiente ecuación:

$$U_{CC_D} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial C_D}{\partial \beta}\right)^2 U_{\beta^2} + \left(\frac{\partial C_D}{\partial L_1}\right)^2 U_{L_1^2} + \left(\frac{\partial C_D}{\partial L_2}\right)^2 U_{L_2^2} + \left(\frac{\partial C_D}{\partial Re}\right)^2 U_{Re^2}} = \pm 8,2 \times 10^{-4} \quad (4.42)$$

Incertidumbre expandida para el coeficiente de descarga C_D .

$$U_{EC_D} = \pm k \cdot U_{CC_D} = \pm(2 * 8,2 \times 10^{-4}) = \pm 1,64 \times 10^{-3}$$

4.2.2 Incertidumbre para el área del orificio A_o .

Para calcular el área del orificio se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_o = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (4.43)$$

donde:

d = diámetro del orificio.

de la ecuación (4.43).

$$\frac{\partial A_o}{\partial d} = \frac{\pi \cdot d}{2} = 0,0418m \quad (4.44)$$

$$U_d = 0m$$

Incertidumbre combinada asociada al área del orificio A_o .

$$U_{cA_o} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial A_o}{\partial d}\right)^2} U_d^2 = 0 \quad (4.45)$$

4.2.3 Incertidumbre del valor local de la gravedad (g).

El proceso de calibración se realizó en el laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM, en donde el Instituto de Geofísica de la misma dependencia, determinó una gravedad local de:

$$g = 9,7792644 \pm 1 \times 10^{-7} \frac{m}{s^2}$$

Como no se dispone de otro tipo de información, se asumirá que la incertidumbre que reporta el Instituto de Geofísica es una incertidumbre expandida con un factor de cobertura de 2. Por lo tanto la incertidumbre asociada al valor de la gravedad será de tipo B como se muestra a continuación:

$$U_{Bg} = \pm \frac{1 \times 10^{-7} \frac{m}{s^2}}{2} = \pm 5 \times 10^{-8} \frac{m}{s^2}$$

Por lo tanto

$$U_g = \pm 5 \times 10^{-8} \frac{m}{s^2}$$

$$U_{g_c} = \pm 5 \times 10^{-8} \frac{kg \cdot m}{kgf \cdot s^2}$$

4.2.4 Incertidumbre asociada a la diferencia de presión (ΔP) del medidor de flujo.

La diferencia de presión ocasionada por la placa de orificio se midió mediante un manómetro tipo U. Las lecturas obtenidas son los siguientes:

MEDIDA No.	h mm	h m	ΔP kgf / m ²
1	109	0,109	1357,228
2	109	0,109	1357,228
3	109	0,109	1357,228
4	109	0,109	1357,228
5	109	0,109	1357,228
Xpromedio	109	0,109	1357,228
S _m	0	0	0

Tabla 4.3.

Incertidumbre asociada a la diferencia de presión (ΔP).

$$\Delta P = h(\rho_m - \rho) \frac{g}{g_c} \quad (4.46)$$

donde:

h = altura manométrica.

ρ = densidad del fluido de proceso.

ρ_m = densidad del líquido manométrico.

g = valor de la gravedad local.

g_c = constante gravitacional

De acuerdo a la ecuación (4.46) la diferencia de presión se encuentra en función de los siguientes parámetros:

$$\Delta P = f(\rho_m, \rho, h, g, g_c)$$

de la ecuación (4.46)

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial \rho} = h \frac{g}{g_c} = 0,109 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}} \quad (4.47)$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial \rho_m} = -h \frac{g}{g_c} = -0,109 \frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg}} \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial h} = (\rho_m - \rho) \frac{g}{g_c} = -12451,64 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial g} = h(\rho_m - \rho) \frac{1}{g_c} = -138,7864 \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \quad (4.50)$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial g_c} = h(\rho_m - \rho) \frac{g}{g_c^2} = -138,7864 \frac{\text{kgf}^2 \cdot \text{s}^2}{\text{kg} \cdot \text{m}^3} \quad (4.51)$$

$$U_\rho = 0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$U_{\rho_m} = 0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$U_g = 5,00 \times 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$U_{g_c} = 5,00 \times 10^{-8} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}$$

Incertidumbre tipo A de la altura manométrica (h).

La incertidumbre tipo A de la altura manométrica (h) de la Tabla 4.3 está dada por la siguiente ecuación:

$$U_A h = \pm \frac{S_h}{\sqrt{n}} \cdot t$$

$$t = 1,11$$

$$S_h = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [h_i - h]^2} = 0m$$

$$U_h = \pm \frac{0m}{\sqrt{5}} \cdot 1,11 = 0m$$

Incertidumbre tipo B de la altura manométrica.

La altura manométrica se midió con un manómetro tipo U conectado a las tomas de presión de la placa de orificio, no hay información del fabricante o de calibraciones anteriores. Utiliza un papel milimétrico visiblemente dañado y el líquido manométrico (Hg) se encuentra contaminado.

Con estos datos se puede obtener la siguiente incertidumbres tipo B:

Incertidumbre por resolución:

$$U_{BR} h = \pm \frac{0,001m}{2\sqrt{3}} = \pm 0,0003m$$

Incertidumbre combinada la altura manométrica.

$$U_C h = \pm \sqrt{U_A^2 h + U_{BR}^2 h}$$

$$U_C h = \pm \sqrt{(0m)^2 + (0,0003m)^2} = \pm 0,0003m \quad (4.52)$$

Incertidumbre expandida del volumen para la altura manométrica.

$$U_E h = k \cdot U_C h = \pm 2 \cdot 0,0003m = \pm 0,0006m$$

Incertidumbre combinada asociada a la diferencia de presión (ΔP).

$$U_{C\Delta P} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta P}{\partial \rho}\right)^2 U_{\rho^2} + \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial h}\right)^2 U_{h^2} + \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial \rho_m}\right)^2 U_{\rho_m^2} + \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial g}\right)^2 U_g^2 + \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial g_c}\right)^2 U_{g_c^2}} = \pm 3,59 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} \quad (4.53)$$

Incertidumbre expandida para la diferencia de presión (ΔP).

$$U_E \Delta P = \pm k \cdot U_{C\Delta P} = \pm (2 * 3,5945) = \pm 7,1890 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

4.2.5 Incertidumbre para el área A_2 .

Para calcular el área 2 se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (4.54)$$

donde:

D = diámetro del área 2 (orificio).

de la ecuación (4.54).

$$\frac{\partial A_2}{\partial D} = \frac{\pi \cdot D}{2} = 0,0418m \quad (4.55)$$

$$UD = 0m$$

Incertidumbre combinada asociada al área A_2 .

$$U_{CA_2} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial A_2}{\partial D}\right)^2 UD^2} = 0 \quad (4.56)$$

4.2.6 Incertidumbre para el área A_1 (tubería).

Para calcular el área de la tubería se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (4.57)$$

donde:

D = diámetro de la tubería.

de la ecuación (4.57).

$$\frac{\partial A_1}{\partial D} = \frac{\pi \cdot D}{2} = 0,0985m \quad (4.58)$$

$$UD = 0m$$

Incertidumbre combinada asociada al área A_1 .

$$UA_1 = \pm \left(\frac{\partial A_1}{\partial D} \right)^2 UD^2 = 0 \quad (4.59)$$

4.2.7. Incertidumbre combinada para el caudal de la placa de orificio.

La incertidumbre combinada para el caudal de la placa de orificio después de realizar los cálculos necesarios para cada parámetro se obtiene con la suma cuadrática de las contribuciones individuales de cada variable asociada a el y obteniendo la raíz cuadrada:

$$U_{CQ} = \pm \left[\left(\frac{\partial Q}{\partial C_D} \right)^2 UC_D^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial A_0} \right)^2 UA_0^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial g_c} \right)^2 Ug_c^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \Delta P} \right)^2 U_{\Delta P}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \rho} \right)^2 U\rho^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial A_2} \right)^2 UA_2^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial A_1} \right)^2 UA_1^2 \right]^{1/2} \quad (4.60)$$

$$U_{CQ_0} = \pm 3,3 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

Incertidumbre expandida para el caudal de la placa de orificio.

$$U_E Q_0 = \pm k \cdot U_{CQ_0} = \pm (2 * 3,3 \times 10^{-6}) = \pm 6,7 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

4.2.8. Incertidumbre para el caudal másico en la placa de orificio.

$$w_o = Q_o \cdot \rho \quad (4.61)$$

donde:

Q_o = Caudal volumétrico en la placa de orificio en $[m^3/s]$.

ρ = Densidad del fluido de proceso en $[kg/m^3]$.

de la ecuación (4.61)

$$\frac{\partial w_o}{\partial Q_o} = \rho = 998,36 \frac{kg}{m^3} \quad (4.62)$$

$$\frac{\partial w_o}{\partial \rho} = Q_o = 0,0018 \frac{m^3}{s} \quad (4.63)$$

$$U_{Q_0} = 3,3 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

$$U\rho = 0 \frac{kg}{m^3}$$

Incertidumbre combinada asociada al caudal másico en la placa de orificio.

$$U_{Cw_o} = \pm \left[\left(\frac{\partial w}{\partial Q_o} \right)^2 U_{Q_o}^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial \rho} \right)^2 U_{\rho}^2 \right] = \pm 0,0033 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.64)$$

Incertidumbre expandida para el caudal másico en la placa de orificio.

$$U_{Ew_o} = \pm k \cdot U_{Cw_o} = \pm (2 * 0,0033) = \pm 0,0066 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Cuadro de incertidumbre para los parámetros de la ecuación (4.1)

Parámetro	Valor	Incetidumbre	Unidades
C_D	0,605	$\pm 1,640E-03$	adimensional
β	0,4242	-----	adimensional
d	0,0266	-----	m
D_t	0,0627	-----	m
L_1	4,6352	$\pm 0,092$	adimensional
l_1	0,29	$\pm 5,77E-03$	m
L_2	5,018	$\pm 0,092$	adimensional
l_2	0,314	$\pm 5,77E-03$	m
Re	4,93E04	$\pm 2,402E04$	adimensional
ρ @ 19°C	998,36	-----	kg/m ³
μ @ 19°C	1,03E-03	-----	kg/m·s
v	0,6801	$\pm 3,6E-01$	m/s
A_t	0,0031	-----	m ²
Q_t	0,0021	$\pm 1,22E-03$	m ³ /s
V	0,1	$\pm 5,77E-02$	m ³
t	46,96	$\pm 7,35E-01$	s
ΔP	135,2288	$\pm 7,189$	kgf/m²
ρ_m @ 19.5°C	13577,696	-----	kg/m ³
g	9,7792644	$\pm 1,0E-07$	m/s ²
g_c	9,7792644	$\pm 1,0E-07$	Kg·m/kgf·s ²
h	0,109	$\pm 6,0E-04$	m
v_o	5,2421	-----	m/s
A_o	0,0006	-----	m ²
Q_o	0,0018	$\pm 6,7E-06$	m³/s
w_o	1,8249	$\pm 0,0066$	kg/s

4.3 Incertidumbre asociada al caudal másico de los medidores de flujo Placa de Orificio y Venturi obtenido directamente aplicando el método gravimétrico.

$$w = \frac{\text{Masa}}{\text{tiempo}} = \frac{m}{t} \quad (4.65)$$

Incertidumbre asociada al caudal másico para los medidores de flujo.

El caudal másico de la tubería se obtuvo mediante el seguimiento del plan de calibración [Capítulo III, sección 3.7], utilizando la cubeta con capacidad de 0.0080 m³, una probeta de 0,002 m³ y el tiempo con un cronometro, los resultados obtenidos son los siguientes:

Medición	Masa m	Tiempo t	T _{AMB}	T _{FLUIDO}	Caudal Másico Directo (CMD)	Caudal Volumétrico Directo (CVD)
No.	(kg)	(s)	(°C)	(°C)	(Kg/s)	(m ³ /s)
1	5,4378	2,19	19,5	19	2,4830	0,0025
2	5,3976	2,26	19,5	19	2,3883	0,0024
3	4,8166	2,20	19,5	19	2,1893	0,0023
4	5,3244	2,19	19,5	19	2,4312	0,0024
5	5,3318	2,20	19,5	19	2,4235	0,0024
Promedio	5,2616	2,21	19,5	19	2,3831	0,0024
S_m	0,2532	0,0295	---	----	0,1135	0,001

Tabla 4.4.

de la ecuación (4.65)

$$\frac{\partial w}{\partial m} = \frac{1}{t} = 0,45 \frac{1}{s} \quad (4.66)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{m}{t^2} = -1,08 \frac{kg}{s^2} \quad (4.67)$$

Incertidumbre tipo A del volumen del caudal másico para los medidores de flujo.

La incertidumbre tipo A de la masa (m) en [kg] de la Tabla 4.4 está dada por la siguiente ecuación:

$$U_A m = \pm \frac{S_m}{\sqrt{n}} \cdot t$$

$$t = 1,11$$

$$S_m = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [m_i - m]^2} = \pm 0,2532 \text{ kg}$$

$$U_A m = \pm \frac{0,2532 \text{ kg}}{\sqrt{5}} \cdot 1,11 = \pm 0,1257 \text{ Kg}$$

Incertidumbre tipo B de la masa para el caudal másico.

La masa se obtuvo mediante una balanza Setra electrónica de capacidad de 5000 g que tiene una resolución de 0,0001g y no cuenta con informe de calibraciones anteriores ni con información del fabricante.

Con estos datos se puede obtener las siguientes incertidumbres tipo B:

Incertidumbre por resolución:

$$U_{BR} m = \pm \frac{0,0001 \text{ g}}{2\sqrt{3}} = \pm 2,89 \times 10^{-5} \text{ g} = \pm 2,89 \times 10^{-8} \text{ kg}$$

Incertidumbre combinada de la masa para el caudal másico.

$$U_C m = \pm \sqrt{U_A^2 m + U_{BR}^2 m}$$

$$U_C m = \pm \sqrt{(0,1257 \text{ kg})^2 + (2,89 \times 10^{-8} \text{ kg})^2} = \pm 0,1257 \text{ kg} \quad (4.68)$$

Incertidumbre expandida de la masa para el caudal másico.

$$U_E m = \pm k \cdot U_C m = \pm (2 \cdot 0,1257 \text{ kg}) = \pm 0,2514 \text{ kg}$$

Incertidumbre tipo A del tiempo de toma de muestra para el caudal másico.

La incertidumbre tipo A del tiempo (t) de la Tabla 4.4 está dada por la siguiente ecuación:

$$U_A t = \pm \frac{S_t}{\sqrt{n}} \cdot "t"$$

$$"t" = 1,11$$

$$S_t = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [t_i - t]^2} = 0,0295 \text{ s}$$

$$U_A t = \pm \frac{0,0295 \text{ s}}{\sqrt{5}} \cdot 1,11 = \pm 0,0146 \text{ s}$$

Incertidumbre tipo B del tiempo de toma de muestra para el caudal másico.

El tiempo de descarga se midió con un cronometro de marca SC-Sport Chronomete Robotic con una división mínima de 0,01s, no hay información del fabricante.

Con estos datos se pueden obtener las siguientes incertidumbres tipo B:

Incertidumbre por resolución:

$$U_{BRt} = \pm \frac{0,01s}{2\sqrt{3}} = \pm 0,0029s$$

Incertidumbre combinada del tiempo para el caudal másico.

$$U_{Ct} = \pm \sqrt{U_{At}^2 + U_{BRt}^2}$$

$$U_{Ct} = \pm \sqrt{(0,0146s)^2 + (0,0029s)^2} = \pm 0,0149s \quad (4.69)$$

Incertidumbre expandida del tiempo para el caudal másico.

$$U_{Et} = \pm k \cdot U_{Ct} = \pm (2 * 0,0149s) = \pm 0,0298s$$

Por lo tanto la Incertidumbre combinada asociada al caudal másico (w).

$$U_{Cw} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial w}{\partial m}\right)^2 Um^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)^2 Ut^2} = \pm 0,0591 \frac{kg}{s} \quad (4.70)$$

Incertidumbre expandida del caudal másico (w).

$$U_{Ew} = \pm k \cdot U_{Cw} = \pm (2 * 0,0591) = \pm 0,1182 \frac{kg}{s}$$

Cuadro de incertidumbre para los parámetros de la ecuación (4.70)

Parámetro	Valor	Incertidumbre	Unidades
m	5,2616	± 0,251	kg
t	2,21	± 0,0298	s
w	2,3831	± 0,1820	kg/s

4.4 Incertidumbre asociada al caudal volumétrico de los medidores de flujo Placa de Orificio y Venturi obtenido directamente.

$$Q = \frac{w}{\rho} \quad (4.71)$$

Cuadro de incertidumbre para los parámetros de la ecuación (4.71).

Parámetro	Valor	Incertidumbre	Unidades
w	2,3831	± 0,1820	kg/s
ρ	998,36	-----	kg/m ³
Q	2,3831	± 0,0002	kg/s

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados que se muestran a continuación se obtuvieron siguiendo el Plan de calibración (Capítulo III), aplicado a el sistema de flujo de fluidos del Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la U.N.A.M. con diferentes posiciones de la válvula de descarga de la bomba de dicho sistema. También se muestra la Incertidumbre asociada al caudal másico de los medidores de flujo Placa de Orificio y Venturi obtenido directamente [Capítulo IV (Sección 4.3)].

Medición No.	P. Válvula	Volumen V (m ³)	Tiempo t (s)	h Placa de orificio (mmHg)	h Medidor Venturi (mmHg)	T _{AMB} (°C)	T _{FLUIDO} (°C)	Caudal (m ³ /s)
1	1/8	0,1	2,33	37	73	19,5	19	0,0429
2	1/8	0,1	1,98	36	72	19,5	19	0,0505
3	1/8	0,1	2,05	38	73	19,5	19	0,0488
4	1/8	0,1	2,08	37	73	19,5	19	0,0481
5	1/8	0,1	1,95	36	73	19,5	19	0,0513

Tabla 1

Medición No.	P. Válvula	MRS (kg)	MRL (kg)	MRH (kg)	MTF (Kg)	Caudal masico w (Kg / s)
1	1/8	0,40767	2,3447	0,4149	1,9370	0,8313
2	1/8	0,40766	2,3443	0,4129	1,9367	0,9781
3	1/8	0,40767	2,3481	0,4113	1,9404	0,9465
4	1/8	0,40766	2,3504	0,4124	1,9428	0,9340
5	1/8	0,40766	2,3441	0,4118	1,9365	0,9931

Tabla 2

Coeficientes de sensibilidad	Valor	Parámetro	U _C	U _E
			Valor	Valor
$\partial w / \partial m$	0,48	Um	± 1,4E-03	± 2,8E-03
$\partial w / \partial t$	-0,45	Ut	± 7,5E-02	± 1,5E-01
		Uw	± 3,4E-02	± 6,7E-02

Tabla 3

Cuadro de incertidumbre para los parámetros de la ecuación (4.70) y (4.71) para posición de válvula 1/8.

Parámetro	Valor	Incertidumbre	Unidades
m	1,9387	± 2,8E-03	kg
t	2,08	± 1,5E-01	s
w	0,9366	± 6,7E-02	kg/s
Q	0,0009	± 1,0E-04	m³/s

Tabla 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para posición de válvula 1/4 se obtuvieron los siguientes resultados:

Medición No.	P. Válvula	Volumen V (m ³)	Tiempo t (s)	h Placa de orificio (mmHg)	h Medidor Venturi (mmHg)	T _{AMB} (°C)	T _{FLUIDO} (°C)	Caudal (m ³ /s)
1	1/4	0,1	1,69	54	127	19,5	19	0,0592
2	1/4	0,1	1,71	54	127	19,5	19	0,0585
3	1/4	0,1	1,51	53	127	19,5	19	0,0662
4	1/4	0,1	1,74	53	126	19,5	19	0,0575
5	1/4	0,1	1,63	54	126	19,5	19	0,0613

Tabla 5

Medición No.	P. Válvula	MRS (kg)	MRL (kg)	MRH (kg)	MTF (Kg)	Caudal masico w (Kg / s)
1	1/4	0,40767	2,3416	0,4125	1,9339	1,1443
2	1/4	0,40766	2,3420	0,4127	1,9343	1,1312
3	1/4	0,40767	2,3419	0,4124	1,9343	1,2810
4	1/4	0,40766	2,3416	0,4129	1,9339	1,1114
5	1/4	0,40766	2,3447	0,4118	1,9370	1,1884

Tabla 6

Coeficientes de sensibilidad	Valor	Parámetro	U _C	U _E
			Valor	Valor
$\partial w / \partial m$	0,60	U _m	± 6,5E-04	± 1,3E-03
$\partial w / \partial t$	-0,71	U _t	± 4,5E-02	± 9,1E-01
		U _w	± 3,2E-02	± 6,4E-02

Tabla 7

Cuadro de incertidumbre para los parámetros de la ecuación (4.70) y (4.71) para posición de válvula 1/4.

Parámetro	Valor	Incertidumbre	Unidades
m	1,9347	± 1,3E-03	kg
t	1,66	± 9,1E-01	s
w	1,1713	± 6,4E-02	kg/s
Q	0,0012	± 1,0E-04	m ³ /s

Tabla 8.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para posición de válvula 1/2 se obtuvieron los siguientes resultados:

Medición	P. Válvula	Volumen V	Tiempo t	h Placa de orificio	h Medidor Venturi	T _{AMB}	T _{FLUIDO}	Caudal
No.		(m ³)	(s)	(mmHg)	(mmHg)	(°C)	(°C)	(m ³ /s)
1	1/2	0,5	2,09	90	240	19,5	19	0,2392
2	1/2	0,5	2,17	90	244	19,5	19	0,2304
3	1/2	0,5	1,84	91	243	19,5	19	0,2717
4	1/2	0,5	2,08	91	244	19,5	19	0,2404
5	1/2	0,5	1,9	91	243	19,5	19	0,2632

Tabla 9

Medición	P. Válvula	MRS	MRL	MRH	MTF	Caudal masico w
No.		kg	kg	kg	Kg	Kg / s
1	1/2	0,40767	1,9780	0,3815	4,7024	2,2499
2	1/2	0,40766	1,7390	0,3887	3,9848	1,8363
3	1/2	0,40767	2,2232	0,3881	5,4392	2,9561
4	1/2	0,40766	2,0426	0,3888	4,8957	2,3537
5	1/2	0,40766	1,9206	0,3890	4,5282	2,3833

Tabla 10

Coeficientes de sensibilidad	Valor	Parámetro	U _c	U _E
			Valor	Valor
$\partial w/\partial m$	0,50	U _m	$\pm 2,6E-01$	$\pm 5,3E-01$
$\partial w/\partial t$	-1,16	U _t	$\pm 6,9E-02$	$\pm 1,4E-01$
		U _w	$\pm 1,5E-01$	$\pm 3,1E-01$

Tabla 11

Cuadro de incertidumbre para los parámetros de la ecuación (4.70) y (4.71) para posición de válvula 1/2.

Parámetro	Valor	Incertidumbre	Unidades
m	4,7101	$\pm 5,3E-01$	kg
t	2,02	$\pm 1,4E-01$	s
w	2,3559	$\pm 3,1E-01$	kg/s
Q	0,0024	$\pm 3,0E-04$	m ³ /s

Tabla 12

Incertidumbre asociada al caudal volumétrico y másico obtenido indirectamente para posición de válvula Totalmente Abierta (T.A).

Para conocer los resultados obtenidos para el caudal masico y volumétrico obtenido directamente con posición de válvula Totalmente Abierta (T.A.) referirse al Capitulo IV, Sección 4.3.

Cálculo de Incertidumbre para el Caudal Volumétrico Indirecto.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para el cálculo del caudal volumétrico de manera indirecta para los medidores de flujo Placa de orificio, Venturi y Rotámetro por medio de la ecuación correspondiente a cada medidor de flujo.

En la Tabla 13 se muestran los valores utilizados para los parámetros involucrados en cada ecuación, para calcular el caudal volumétrico y la incertidumbre correspondiente a cada medidor de flujo. Cabe mencionar que estos valores se obtuvieron a una posición de válvula de descarga de la bomba Totalmente Abierta (T.A.).

MEDIDOR	PLACA DE ORIFICIO Ecuación (2.6)	VENTURI Ecuación (2.11)	ROTAMETRO Ecuación (2.17)	
Parámetro	Valor	Valor	Valor	Unidades
C _D	0,605	0,985	0,98	adimensional
β	0,4242	0,3190	1,1538	adimensional
d	0,0266	0,02	0,065	m
D _t	0,0627	0,0627	0,075	m
L ₁	4,6352	-----	-----	adimensional
l ₁	0,29	-----	-----	m
L ₂	5,018	-----	-----	adimensional
l ₂	0,314	-----	-----	m
Re	4,93E04	4,93E04	4,93E04	adimensional
ρ	998,36	998,36	998,36	kg/m ³
μ	1,03E-03	1,03E-03	1,03E-03	kg/m·s
v	0,6801	0,6801	0,6801	m/s
A _t	0,0031	0,0031	0,0031	m ²
Q _t	0,0021	0,0021	0,0021	m ³ /s
V	0,1	0,1	-----	m ³
t	46,96	46,96	-----	s
ΔP	135,2288	3561,169	311,7192	kgf/m ²
ρ _m	13577,696	-----	-----	kg/m ³
g	9,7792644	9,7792644	9,7792644	m/s ²
g _c	9,7792644	9,7792644	9,7792644	Kg·m/kgf·s ²
h	0,109	0,286	-----	m
H _{fs}	1,3595	3,604	0,31	kgf·m/kg
v	5,2421	8,3962	2,5515	m/s
A	0,0006	0,0003	0,0011	m ²
Q	0,0018	0,0026	0,0027	m ³ /s
w	1,8249	2,5930	2,7449	kg/s

Tabla 13

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Siguiendo el procedimiento del Capítulo IV para el cálculo de la incertidumbre se obtienen los siguientes resultados para cada medidor:

	PLACA DE ORIFICIO	VENTURI	ROTAMETRO	
Coefficiente de sensibilidad	Valor	Valor	Valor	Unidades
$\partial Q/\partial C_D$	0,0029	0,0026	0,0041	m ³ /s
$\partial C_D/\partial \beta$	-1,81E-01	-1,62E-02	-----	adimensional
$\partial \beta/\partial d$	15,949	15,949	13,333	1/m
$\partial \beta/\partial D_t$	-6,7662	-5,0874	-11,556	1/m
$\partial C_D/\partial L_1$	0,0030	-----	-----	1/m
$\partial L_1/\partial l_1$	15,949	-----	-----	m/m
$\partial L_1/\partial D_t$	-79,872	-----	-----	m/m
$\partial C_D/\partial L_2$	-0,0026	-----	-----	1/m
$\partial L_2/\partial l_2$	15,949	-----	-----	m/m
$\partial L_2/\partial D_t$	-79,8720	-----	-----	m/m
$\partial C_D/\partial Re$	-6,66E-08	-----	-----	adimensional
$\partial Re/\partial \rho$	41,6535	-----	-----	m ³ /kg
$\partial Re/\partial D_t$	663241,37	-----	-----	1/m
$\partial Re/\partial \mu$	-40295769,27	-----	-----	m-s/kg
$\partial Re/\partial v$	60656,1744	-----	-----	s/m
$\partial v/\partial A_1$	-222,0435	-----	-----	1/m ²
$\partial v/\partial Qt$	323,87	-----	-----	m/s
$\partial Qt/\partial V$	0,0212	-----	-----	1/s
$\partial Qt/\partial t$	-4,48E-05	-----	-----	m ³ /s
$\partial Q/\partial A_o$	3,1746	8,2673	2,5005	m
$\partial Q/\partial g_c$	9,02E-05	1,33E-04	2,062E-04	kgf · s · m ² /kg
$\partial Q/\partial \Delta P$	6,499E-07	3,65E-07	6,47E-06	m ⁵ /kgf · s
$\partial \Delta P/\partial h$	-12451,64	-12451,64	-----	kgf/m ³
$\partial \Delta P/\partial \rho$	0,109	0,286	-----	kgf · m/kg
$\partial \Delta P/\partial \rho_m$	-0,109	-0,286	-----	kgf · m/kg
$\partial \Delta P/\partial g$	-138,7864	-364,1551	-----	kgf · s/ m ³
$\partial \Delta P/\partial g_c$	138,7864	364,1551	-----	Kgf ² · s ² / kg · m ³
$\partial Q/\partial A_2$	-0,0506	-0,0426	-0,2499	m/s
$\partial A_2/\partial d$	0,0418	0,0314	0,1021	m/m
$\partial Q/\partial A_1$	-58955,185	-87776,375	-34094,89	m/s
$\partial A_1/\partial D_t$	0,0985	0,0985	0,1178	m/m
$\partial Q/\partial \rho$	1,6855E-07	1,5492E-07	5,3967E-07	m ⁶ /kg · s
$\partial w/\partial Q$	998,36	998,36	998,36	Kg/m ³
$\partial w/\partial \rho$	0,0018	0,0026	0,002	m ³ /s

Tabla 14. Valores de los coeficientes de sensibilidad.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Incertidumbre combinada asociada a cada parámetro para cada medidor de flujo.

Parámetro	PLACA DE ORIFICIO U_c	VENTURI U_c	ROTAMETRO U_c	Unidades
U _D	± 8,2E-04	-----	-----	adimensional
β	-----	-----	-----	adimensional
d	-----	-----	-----	m
D _t	-----	-----	-----	m
L ₁	± 4,604E-02	-----	-----	adimensional
l ₁	± 2,89E-03	-----	-----	m
L ₂	± 4.6041E-02	-----	-----	adimensional
l ₂	± 2.89E-03	-----	-----	m
Re	± 1,20E04	-----	-----	adimensional
ρ	-----	-----	-----	kg/m ³
μ	-----	-----	-----	kg/m·s
v	± 1,98E-01	-----	-----	m/s
At	-----	-----	-----	m ²
Qt	± 6,113E-04	-----	-----	m ³ /s
V	± 2,89E-02	-----	-----	m ³
t	± 3,67E-01	-----	-----	s
ΔP	± 3,5945	± 3,5945	-----	kgf/m ²
ρ _m	-----	-----	-----	kg/m ³
g	± 5,00E-08	± 5,00E-08	± 5,00E-08	m/s ²
g _c	± 5,00E-08	± 5,00E-08	± 5,00E-08	Kg·m/kgf·s ²
h	± 2,89E-04	± 2,89E-04	-----	m
A	-----	-----	-----	m ²
Q	± 3,3E-06	± 1,3E-06	± 7,3E-12	m ³ /s
w	± 0,0033	± 0,0013	± 7,28E-12	kg/s

Tabla 15. Incertidumbres combinadas asociadas a cada parámetro.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Valores de cada parámetro con su incertidumbre correspondiente.

Parámetro	PLACA DE ORIFICIO		VENTURI		ROTAMETRO		Unidades
	Valor	U_E	Valor	U_E	Valor	U_E	
C_D	0,605	$\pm 1,64E-03$	0,985	-----	0,98	-----	adimensional
β	0,4242	-----	0,3190	-----	1,1538	-----	adimensional
d	0,0266	-----	0,02	-----	0,065	-----	m
D_t	0,0627	-----	0,0627	-----	0,075	-----	m
L_1	4,6352	$\pm 0,0921$	-----	-----	-----	-----	adimensional
l_1	0,29	$\pm 5,77E-03$	-----	-----	-----	-----	m
L_2	5,018	$\pm 0,0921$	-----	-----	-----	-----	adimensional
l_2	0,314	$\pm 5,77E-03$	-----	-----	-----	-----	m
Re	4,93E04	$\pm 2,40E04$	4,93E04	-----	4,93E04	-----	adimensional
ρ	998,36	-----	998,36	-----	998,36	-----	kg/m ³
μ	1,03E-03	-----	1,03E-03	-----	1,03E-03	-----	kg/m·s
v	0,6801	$\pm 3,96E-01$	0,6801	$\pm 3,96E-01$	0,6801	$\pm 3,96E-01$	m/s
At	0,0031	-----	0,0031	-----	0,0031	-----	m ²
Qt	0,0021	$\pm 1,22E-03$	0,0021	$\pm 1,22E-03$	0,0021	$\pm 1,22E-03$	m ³ /s
V	0,1	$\pm 5,77E-02$	0,1	$\pm 5,77E-02$	-----	-----	m ³
t	46,96	$\pm 7,35E-01$	46,96	-----	-----	-----	s
ΔP	135,2288	$\pm 7,189$	3561,169	$\pm 7,189$	311,7192	-----	kgf/m ²
ρ_m	13577,696	-----	13577,696	-----	-----	-----	kg/m ³
g	9,7792644	$\pm 1,00E-07$	9,7792644	$\pm 1,00E-07$	9,7792644	$\pm 1,00E-07$	m/s ²
g_c	9,7792644	$\pm 1,00E-07$	9,7792644	$\pm 1,00E-07$	9,7792644	$\pm 1,00E-07$	Kg·m/kgf·s ²
h	0,109	$\pm 5,77E-04$	0,286	$\pm 5,77E-04$	-----	-----	m
A	0,0006	-----	0,0003	-----	0,0011	-----	m ²
Q	0,0018	$\pm 6,7E-06$	0,0026	$\pm 2,6E-06$	0,0027	$\pm 1,46E-11$	m ³ /s
w	1,8249	$\pm 0,0067$	2,5930	$\pm 0,0026$	2,7449	$\pm 1,46E-11$	kg/s

Tabla 14. Cuadro de incertidumbres.

Cuadro comparativo de incertidumbres asociadas al Caudal Másico y Volumétrico medidos directa e indirectamente.

Parámetro	Valor	Incertidumbre	Unidades
Caudal Másico Directo (CMD)	2,3831	$\pm 0,1820$	kg/s
Caudal Másico Indirecto (CMI)	1,8249	$\pm 6,7E-03$	kg/s
Caudal Volumétrico Directo (CVD)	0,0024	$\pm 2,0E-04$	m ³ /s
Caudal Volumétrico Indirecto (CVI)	0,0018	$\pm 6,7E-06$	m ³ /s

Tabla 15. Cuadro de incertidumbres

CONCLUSIONES

En el presente trabajo hemos abordado uno de los diferentes métodos existentes de calibración directa de equipos o instrumentos de medida, la calibración por el método de gravimétrico y hemos desarrollado un ejemplo de este tipo de calibración de medidores de flujo. Una de las particularidades de este método de calibración es la ausencia de un patrón de referencia de la misma magnitud que se desea calibrar (paso que suele ser crucial en la mayoría de calibraciones de equipos o instrumentos de medida físicos), ya que en este ejemplo en concreto el valor de referencia se obtiene calculando el valor de la magnitud deseada (volumen) a partir del valor de otra magnitud (masa) y de una relación entre ellas (densidad). Sin embargo, para el correcto establecimiento de la magnitud de masa, generalmente se deberán utilizar patrones en el proceso de calibración de la balanza utilizada para la medida de masa. Para completar el proceso de calibración, se realizó el cálculo de la incertidumbre asociada al medidor de flujo.

De los resultados obtenidos para el ejercicio numérico propuesto para la obtención de la incertidumbre asociada a cada parámetro de las ecuaciones correspondientes a cada medidor de flujo (placa de orificio, tubo venturi y rotámetro), se puede concluir que las contribuciones debidas a la incertidumbre en el valor de las fuentes de incertidumbre de mayor preponderancia son: el coeficiente de descarga, la presión diferencial a través del orificio, la densidad del fluido, el diámetro interno de la placa de orificio, la garganta del venturi, el área anular entre el flotador y el tubo en el caso del rotámetro y el diámetro de la tubería.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 15, podemos concluir que se obtiene un valor mayor en la incertidumbre asociada al medidor de flujo cuando se mide el caudal masico y volumétrico de manera directa. Este valor de incertidumbre obtenido en este trabajo se asocia a los siguientes factores: Limitaciones del equipo disponible para la realización del plan de calibración (capacidad de la balanza y capacidad de los recipientes designado para tomar la muestra del líquido de proceso), desgaste del sistema de flujo de fluidos y de los medidores de flujo (placa de orificio y venturi), ensuciamiento del líquido manométrico, mal estado del papel milimétrico utilizado para medir la altura manométrica y que el agua que maneja el sistema no se encuentra totalmente limpia.

Cabe mencionar que debido a las limitaciones antes mencionadas no se pudo obtener el caudal masico directamente para el medidor de flujo Rotámetro, sin embargo, como los medidores de placa de orificio y tubo venturi se encuentran en la misma línea del sistema de flujo se consideraron como medidores Master. Un medidor Master es aquel que ha sido calibrado mediante el método gravimétrico para la obtención del caudal másico. Tomando en cuenta esto y considerando que el Rotámetro fue instalado en el sistema recientemente, podemos concluir que la incertidumbre asociada a este medidor con valor de $\pm 1,46E-11$ es poco significativa y que las mediciones obtenidas son confiables y reproducibles.

Sin embargo, el principal objetivo de este trabajo es proponer un plan de calibración utilizando el método gravimétrico para la obtención de la magnitud masa, del cual podemos concluir que es uno de los métodos que obtiene resultados confiables y reproducibles para la calibración de medidores de flujo de presión diferencial y área variable.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones para disminuir la incertidumbre en la medición del caudal y de acuerdo con los modelos matemáticos expresados con anterioridad, las variables que contribuyen a la incertidumbre de medición del flujo másico por medio de medidores de presión diferencial y área variable son las siguientes⁽²³⁾:

Coefficiente de descarga, C_D : El valor del coeficiente de descarga se puede obtener de alguna norma de referencia en este caso de la norma ISO, o bien mediante la calibración del medidor de flujo contra algún sistema de referencia de medición de flujo de fluidos. Las contribuciones dominantes a la incertidumbre del coeficiente de C_D siguen distribuciones normales, y debido al teorema del límite central, es razonable atribuir a esta variable C_D una distribución de probabilidad normal.

Diámetro del orificio, d : El diámetro del orificio debe ser estimado a partir de varias mediciones, realizadas con algún instrumento con trazabilidad. Un valor de incertidumbre típico para el diámetro del orificio es del orden de 0,05 %, para niveles de confianza del orden de 95 %. De acuerdo con la norma ISO 5167, la incertidumbre no debe exceder 0,07 %.

Diámetro de la tubería, D_t : El diámetro de la tubería debe ser estimado a partir de varias mediciones, realizadas con algún instrumento con trazabilidad. Un valor de incertidumbre típico para el diámetro de la tubería adyacente es del orden de 0,25 %, para niveles de confianza del orden de 95 %. De acuerdo con la norma ISO 5167, la incertidumbre no debe exceder 0,4 %.

Presión diferencial a través del medidor de flujo, ΔP : Para esta contribución deben tomarse en cuenta la calibración del sistema de medición de presión diferencial, además de la dispersión de los datos por mediciones sucesivas. Típicamente, un medidor de presión diferencial de aplicación industrial puede medir presión diferencial con incertidumbre del orden de 0,5% a un nivel de confianza de 95% cuando es calibrado con un sensor de referencia con trazabilidad.

Temperatura de trabajo, T : Para esta contribución deben tomarse en cuenta la calibración del sistema de medición de temperatura (termómetros o sensores de temperatura), además de la dispersión de los datos por mediciones sucesivas. Típicamente, un sistema de medición de temperatura instalado en campo, e integrado transmisor y dispositivo indicador puede lograr valores de incertidumbre del orden de 0,1 °C (incertidumbre expandida, $k=2$) cuando es calibrado con un sistema de referencia apropiado.

Presión del fluido aguas arriba, P_1 : La presión del fluido aguas arriba del medidor de flujo contribuye a la incertidumbre del flujo másico de fluido debido a dos razones: a) su calibración contra algún patrón de referencia y b) la dispersión en mediciones repetitivas.

Densidad del fluido, ρ : La densidad puede ser obtenida de alguna ecuación de estado para el fluido o bien puede ser medida. Cualquiera que sea el caso, debe incorporarse la incertidumbre estándar al cálculo de la incertidumbre estándar combinada para el flujo másico. Si la densidad es obtenida de tablas o de alguna ecuación de estado entonces debe también tomarse en cuenta la influencia de la temperatura y la presión.

Viscosidad dinámica del fluido, η : El valor de viscosidad puede obtenerse de tablas o de algún modelo matemático específico; o bien por medio de algún instrumento de medición en línea. En cualquier caso, es necesario estimar el valor de incertidumbre estándar asociado.

Las recomendaciones para la disminuir la incertidumbre en el sistema de flujo de fluidos del Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la U.N.A.M., son:

- Cambiar el mercurio de los manómetros.
- Purgar y limpiar el sistema y utilizar agua limpia.
- Cambiar el papel milimétrico de los manómetros.
- Cambiar las mangueras de los manómetros.
- Establecer un programa de calibración para los medidores de flujo.

APÉNDICE A

A.1 Conceptos y términos metrológicos.

Metrología

La Metrología, es la disciplina científica y tecnológica que se ocupa del estudio sistemático de todo lo relacionado con el proceso de medición.

El vocabulario técnico de la metrología tiene significados muy precisos, hace uso de palabras que en el lenguaje común no necesariamente se emplean con el mismo propósito. Palabras como *precisión*, *exactitud* y *error* son empleadas frecuentemente de manera inadecuada desde el punto de vista de la terminología reconocida internacionalmente. Aún en los medios técnicos existía una falta de consenso sobre el significado de los términos empleados en metrología hasta la publicación, en 1993, del "International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology", publicado por la ISO a nombre de siete organizaciones internacionales y traducido por el CENAM al español en 1994.

Con el fin de acotar el alcance de nuestro trabajo, es útil recordar las siguientes definiciones:

Medición: Conjunto de operaciones que tiene por objeto determinar el valor de una magnitud.

Magnitud: Atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente.

Mensurando: Magnitud particular sujeta a medición. En otras palabras, el ámbito de operación de la metrología se circunscribe a la determinación de atributos físicos o químicos de fenómenos naturales.

Una definición completa del mensurando incluye especificaciones sobre las magnitudes de entrada relevantes. Por similitud con la GUM, en este trabajo el término "magnitud de entrada" se usa para denotar también magnitudes de influencia. El resultado de una medición incluye la mejor estimación del valor del mensurando y una estimación de la incertidumbre sobre ese valor. La incertidumbre se compone de contribuciones de diversas fuentes, algunas de ellas descritas por las magnitudes de entrada respectivas. Algunas contribuciones son inevitables por la definición del propio mensurando, mientras otras pueden depender del principio de medición, del método y del procedimiento seleccionados para la medición.

El **principio de medición** es el fundamento científico usado para realizar una medición. El conocimiento del principio de medición permite al metrólogo dominar la medición, esto es, modificarla, diseñar otra, evaluar su conveniencia, etc., además es indispensable para estimar la incertidumbre de la medición.

A.2 Proceso de medición.

Una medición generalmente sigue un proceso como el que se ilustra en la Figura A.1.

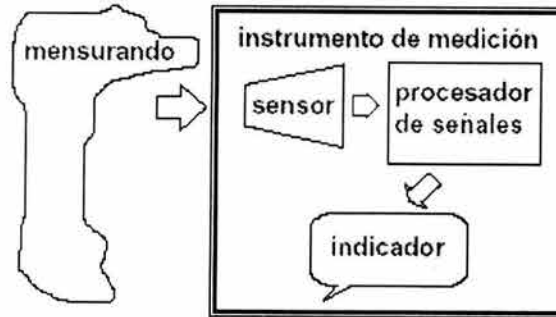


Figura A.1.

Existen una serie de conceptos asociados a la medición que se pueden entender más fácilmente con la ayuda de una ilustración como la que se presenta en la Figura A.2.

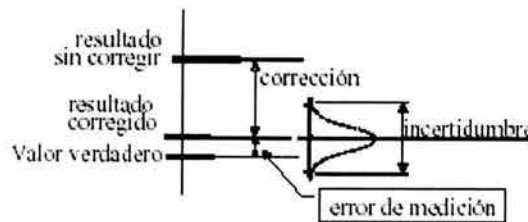


Figura A.2.

Una medición arroja el valor indicado como “resultado sin corregir.” De acuerdo a la discusión anterior, este valor corresponde a la lectura del indicador, la cual sólo es una aproximación del valor verdadero (y desconocido) del mensurando. Es posible obtener una mejor estimación del valor del mensurando si analizamos los factores de influencia en la medición y tratamos de corregir el resultado con la información disponible. Por ejemplo, si se cuenta con un certificado de calibración, conocemos la diferencia de los valores que arroja nuestro instrumento contra los de un patrón de mayor exactitud. El valor de este patrón razonablemente se encuentra más cerca del valor verdadero por lo que es conveniente modificar el resultado de la medición con la diferencia indicada en el certificado y así obtener el “resultado corregido”, el cual constituye nuestra mejor estimación del valor del mensurando.

Aún así, casi en todos los casos permanecerá un error de medición remanente, que no es posible conocer pues desconocemos el valor verdadero del mensurando.

Adicionalmente, -y éste tal vez es el paso más importante- es necesario estimar la incertidumbre de la medición.

A.3 Incertidumbre de la medición.

La incertidumbre de una medición es la estimación del intervalo de valores dentro del cual se encuentra con un nivel de confianza conocido el valor verdadero de la magnitud

medida. La incertidumbre de medición, se expresa por los valores límites del intervalo, respecto del valor convencionalmente verdadero o la mejor estimación del mensurando. Cualquiera que sea el medio por el cual hayamos hecho una medición, el resultado final deberá ser un intervalo que representa los límites dentro de los que se encuentra el valor deseado. Aunque el único resultado de un proceso de medición consiste en un intervalo o segmento, con frecuencia es deseable, para propósitos de descripción al resultado de la medición, y , se le asocia un intervalo $\pm U$ que representa la estimación de su incertidumbre.

A.4 Error en una Medida.

La diferencia entre el valor observado de una cantidad física y su valor verdadero se denomina *error de observación*.

$$e_i = x_i - x_v \quad (A.1)$$

Siendo: e_i = el error de observación

x_i = los diferentes valores que toma la magnitud física

x_v = el valor verdadero de la cantidad física medida.

También se pueden expresar como error de observación, aquellos aspectos o defectos que desvirtúan la calidad de una medición.

A.4.1 Clasificación de los Errores.

Los errores se clasifican en sistemáticos y aleatorios o casuales.

Errores Sistemáticos

El tipo de incertidumbre que hemos considerado surge de una insuficiencia que ocurre naturalmente en el proceso de medición. Hay un tipo de error diferente que puede aparecer cuando algo afecta todas las lecturas igual o consistente. Contribuye a que la *exactitud* sea baja o alta. Por ejemplo, instrumentos mal calibrados, condiciones experimentales inadecuadas, método experimental incorrecto o que no es el más adecuado, la falta de definición (conocimiento) de la magnitud estudiada, etc. Se logra disminuir los errores sistemáticos siendo cuidadosos al montar y ejecutar una experiencia, o, al identificar su naturaleza y corregirla.

Errores Casuales

Son aquéllos que aparecen sin aparente causa o fortuitamente y se escapan del control experimental. Tienen un comportamiento aleatorio, varían en magnitud, son desordenados (al azar) y oscilan alrededor de un valor medio. Contribuyen a la *imprecisión* de las medidas. Por lo general, son inevitables y difíciles de precisar. Entre éstos se encuentran: las pequeñas alteraciones ambientales, descuidos momentáneos del observador. Usualmente, se disminuyen al repetir muchas veces la medida de la magnitud estudiada. Los errores casuales contribuyen a la dispersión.

A.5 Exactitud y Precisión.

Exactitud

Se refiere a la cercanía de los valores medidos al valor verdadero. Está relacionada con la apreciación de los instrumentos de medición y con los errores sistemáticos.

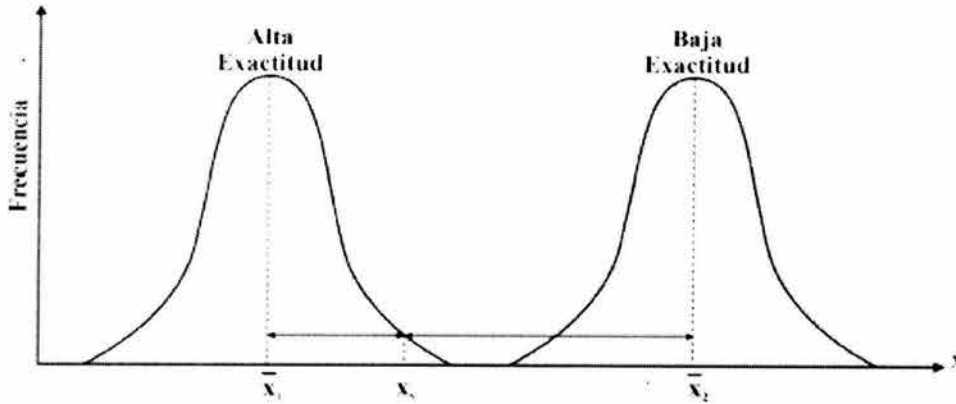


Figura A.3.

Precisión

Se refiere a la cercanía de los valores medidos entre sí. Es independiente de los errores sistemáticos y está relacionada con los errores casuales.

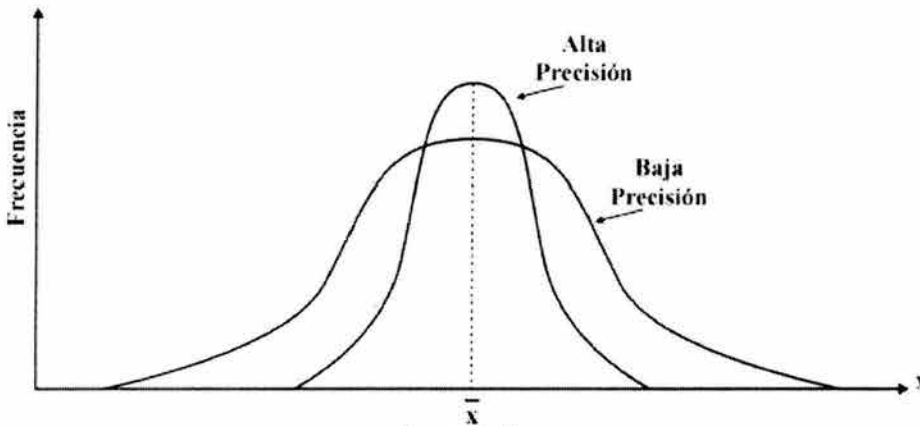


Figura A.4.

A.6 Los equipos de medida para procesos industriales.

Los equipos de medida se encargan de realizar mediciones sobre las variables involucradas en los procesos industriales. A partir de ellos, se observa y se controla el proceso. Dichas mediciones deben ser fiables, seguras y de gran exactitud, y en general permitir la visualización continua del proceso. Es de gran importancia saber en cada aplicación qué necesidades de medida son requeridas, y por tanto, realizar una elección que las cumpla, pero sin excederlas.

Por una parte, se tienen aquellas características que definen el equipo de medida y su aplicación:

- **Rango de medida** : define los valores mínimo y máximo de lectura para los cuales el equipo ha sido diseñado.
- **Alcance**: es la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de la variable de entrada del instrumento de medida.
- **Sensibilidad de la medida**: mide la pendiente o derivada de la recta que relaciona el mensurando con la medida.

Junto a éstas, se tienen aquéllas que determinan la capacidad de medida del equipo, y que deben ser decisivas a la hora de realizar la elección del equipo. Entre otras cabe destacar:

- **Exactitud**: es la capacidad de un equipo de medida de dar indicaciones que se aproximen al verdadero valor de la magnitud medida.
- **Fidelidad**: es la cualidad que caracteriza la capacidad del instrumento de medida para dar el mismo valor de magnitud al medir varias veces en unas mismas condiciones.

Ligada a la fidelidad, se deben definir los conceptos de:

- **Repetibilidad** : describe la característica que posee un medidor para indicar valores próximos entre sí para un flujo dado bajo las mismas condiciones de medición. Estas incluyen: 1. mismo procedimiento de medición, 2. mismo observador, 3. el mismo equipo de medición, utilizando bajo las mismas condiciones, 4. el mismo lugar y 5. repetición en un periodo corto.
- **Reproducibilidad** : cuando se puede aplicar el procedimiento de medición usado y obtener resultados similares a los obtenidos anteriormente.
- **Desplazamiento**: se produce cuando existe un error constante sobre todo el rango de medida.
- **Linealidad**: indica el grado de proporcionalidad entre la magnitud física y la medida.
- **Sensibilidad ante perturbaciones**: mide la variación máxima de la medida en relación con una variación unitaria de una condición ambiental.
- **Histéresis**: es la propiedad presente en algunos instrumentos de medida que provoca que la curva de medida difiera según las lecturas se hagan de forma ascendente o en sentido descendente.
- **Zona muerta**: se define como el rango de entrada para el cual no se obtiene lectura en la salida.
- **Umbral** : es el nivel mínimo necesario para que cuando la entrada del instrumento aumente de forma progresiva desde cero, tenga lugar a la salida un cambio suficientemente grande como para ser detectado.
- **Resolución**: es el nivel mínimo de cambio en la entrada para que produzca un cambio observable en la salida.

Por último, es necesario hacer distinción entre los errores de un equipo de medida de naturaleza aleatoria, que precisan de un tratamiento estadístico, y que difícilmente pueden ser atenuados, y los errores de tipo sistemático, que normalmente son causados por una fuente que puede ser fácilmente detectada, y permiten su corrección o reducción por un procedimiento de ajuste.

A.7 Conceptos básicos asociados a la calibración.

La calibración y todos los conceptos asociados a ésta, han sido determinados a lo largo de los años por los organismos metrológicos y de normalización internacionales. En un principio fueron fijados básicamente con miras a su empleo desde dentro de los laboratorios de calibración, ensayo, etc. Sin embargo, hoy día el personal técnico de una empresa en la que se desea mantener un Sistema de Confirmación Metrológica (garantizar el correcto funcionamiento de los equipos de medida que afectan a la calidad) se ve enfrentado con toda esta terminología, conceptos y definiciones, que le resultan ajenos y de difícil aprehensión.

Calibración se define como la operación de comparar la salida de un equipo de medida frente a la salida de un patrón de exactitud conocida cuando la misma entrada (*variable medida*) es aplicada a ambos instrumentos.

Durante el proceso de calibración el equipo es verificado para un conjunto de puntos representativos de todo su rango de medida. De aquí se pasa al concepto de **trazabilidad**, como cadena de calibración donde cada equipo es calibrado frente a otro de mayor exactitud, denominado **patrón**. Esta cadena termina sobre un patrón nacional o internacional. Es necesario definir los siguientes patrones:

- **Patrón primario:** aquella realización de la unidad del Sistema Internacional de acuerdo con su definición.
- **Patrón de referencia:** el que se emplea como último término de comparación en un ámbito dado, sea éste una industria dada, un hospital o un laboratorio.
- **Patrón de transferencia:** el que sirve para comparar entre sí diferentes sistemas de medida que no pueden ser transportados para situarlos en un mismo ámbito y hacer la comparación directamente.
- **Patrón de trabajo:** el que se usa de forma habitual para calibrar patrones e instrumentos de medida, por ejemplo, dentro de una planta de una industria.
- **Patrón internacional:** es aquel que es reconocido por acuerdo internacional para servir como base para asignar valores a otros patrones de una magnitud en cuestión. El único patrón internacional que existe de forma materializada, es el kilogramo patrón, actualmente en el Bureau Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), en Sevres, Francia. Existen una serie de países que poseen duplicados de este patrón internacional, y que son patrones nacionales.
- **Patrones nacionales:** son aquellos que, por decisión oficial, son reconocidos para servir de base en un país para la fijación de los valores de todos los otros patrones (referencia, trabajo, etc.) de las distintas magnitudes básicas establecidas por el SI. En cada país, existen Institutos o Centros científicos de metrología, que a través del desarrollo de equipos y procedimientos de medición requeridos para cada magnitud, tienen la responsabilidad de diseminar los patrones a "usuarios" de las ciencias y la industria de un país. Actividad ésta que realiza a través de laboratorios que prestan servicios de calibración a éstos, mediante patrones de referencia.

Trazabilidad

La Trazabilidad es el proceso de referir resultados de una medición a patrones nacionales, a través de una cadena ininterrumpida de calibraciones, que son ejecutadas por entidades técnicamente competentes, documentados, evaluados y cuyas incertidumbres de medición son conocidas.

Se puede dar una lista de los elementos esenciales de la trazabilidad obtenida mediante la calibración de cada uno de los instrumentos que intervienen en un sistema de aseguramiento de la calidad:

- que la cadena de calibraciones no se interrumpa y que termine en un patrón nacional o internacional;
- la incertidumbre de medida de cada comparación en la cadena de trazabilidad debe haber sido calculada por métodos bien definidos y expresada de modo que se pueda calcular la incertidumbre procedente del conjunto de la cadena completa;
- cada paso de la cadena de calibraciones debe estar realizado mediante un procedimiento aceptado por la comunidad científico-técnica y perfectamente documentado;
- los resultados también tienen que estar documentados;
- los laboratorios o entidades que realicen cada calibración en la cadena deben haber demostrado su competencia técnica: por ejemplo, estar acreditados por un organismo reconocido;
- todas las referencias deben hacerse a unidades del Sistema Internacional (SI);
- los patrones apropiados deben ser realizaciones de estas unidades.

El concepto de trazabilidad puede ser también extendido a casos en los cuales no intervenga directamente la calibración, como puede ser por comparación de resultados o materiales de referencia. Estos casos se dan principalmente en el ámbito de la industrial química y textil.

En cuanto a los laboratorios de calibración industrial, se consideran como tales aquellos que han sido acreditados para poder extender certificados de calibración de ciertas magnitudes físicas, con una trazabilidad determinada por la capacidad de medida del laboratorio.

A.7.1 Calibración por el método de reproducción de la definición de la magnitud.

Dentro de los procesos de calibración de instrumentos o equipos que miden magnitudes físicas, los procesos de calibración directos son aquellos en los que el valor conocido o generado (generalmente a partir de un patrón físico o de un material de referencia certificado) se expresa en la misma magnitud que mide el equipo, y pueden clasificarse en diversos tipos. Uno de estos métodos es el método gravimétrico.

A.7.1.1 Método Gravimétrico.

En este método, se reproduce la magnitud que mide el equipo o instrumento de medida a través de patrones apropiados en los que se calculan los valores de la magnitud deseada a través de los valores de otras magnitudes. Un ejemplo de estos métodos, que va a ser el que vamos a desarrollar en este trabajo, la calibración de medidores de flujo mediante pesada y utilización de la densidad. En este caso no se va a utilizar directamente ningún patrón de la magnitud que se desea medir en el proceso de calibración, sino que se va a

medir una magnitud (volumen) a través de la medida de otra magnitud (masa) y de una relación entre las dos (densidad). En concreto, se va a determinar el volumen contenido en un recipiente (a temperatura ambiental) a partir de la pesada del volumen de agua del sistema, contenida en dicho recipiente. Es importante puntualizar que, aunque no se va a utilizar ningún patrón de la magnitud que se desea medir (volumen), somos trazables al sistema internacional de unidades ya que la medida de peso que nos servirá para calcular la medida de volumen debe obtenerse con una balanza calibrada con pesas certificadas. Este método se utiliza para verificar capacidades, por ejemplo cuando el medidor de flujo es nuevo. La metodología es aplicable a todos los medidores de flujo en general. Este procedimiento es muy exacto, sin embargo, por su costo y limitaciones físicas, es difícil de realizar.

A.8 Cálculo de la incertidumbre de medida en las calibraciones.

El resultado de cualquier medida es sólo una aproximación o estimación del verdadero valor de la cantidad sometida a medición (el mensurado). El resultado de una medición incluye la mejor estimación del valor del mensurado y una estimación de la incertidumbre sobre ese valor. De esta forma, la expresión del resultado de una medida es completa únicamente si va acompañado del valor de la incertidumbre asociada a dicha medida. La incertidumbre se compone de contribuciones de diversas fuentes, algunas de ellas descritas por las magnitudes de entrada (magnitud medida) respectivas.

Generalmente la calibración de un equipo de medida para procesos industriales consiste en comparar la respuesta del equipo frente a la respuesta de un patrón de exactitud e incertidumbre conocida cuando el mismo valor de entrada es aplicada a ambos instrumentos. Todo procedimiento de calibración se puede considerar como un estudio del comportamiento del instrumento, respecto al del patrón, un proceso de medida del error que comete un equipo.

Por lo tanto, y puesto que cualquier proceso de medida lleva asociado una incertidumbre, en las calibraciones se deben tener en cuenta todas las fuentes significativas de incertidumbre asociadas al proceso de medida del error que se lleva a cabo.

A.8.1 Modelo físico.

Un modelo físico de la medición consiste en el conjunto de suposiciones sobre el propio mensurado y las variables físicas o químicas relevantes para la medición. Estas suposiciones usualmente incluyen:

- a) relaciones fenomenológicas entre variables;
- b) consideraciones sobre el fenómeno como conservación de cantidades, comportamiento temporal, comportamiento espacial, simetrías;
- c) consideraciones sobre propiedades de la sustancia como homogeneidad e isotropía.

Una medición física, por simple que sea, tiene asociado un modelo que sólo aproxima el proceso real.

A.8.2 Modelo matemático.

El modelo físico se representa por un modelo descrito con lenguaje matemático. El modelo matemático supone aproximaciones originadas por la representación imperfecta o limitada de las relaciones entre las variables involucradas. Considerando a la medición como un proceso, se identifican magnitudes de entrada denotadas por el conjunto $\{X_i\}$ expresión en la cual el subíndice i toma valores entre 1 y el número de magnitudes de entrada N .

La relación entre las magnitudes de entrada y el mensurando Y dada por la magnitud de salida se representa como una función

$$Y = f(\{X_i\}) = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (\text{A.1})$$

representada por una tabla de valores correspondientes, una gráfica o una ecuación, en cuyo caso y para los fines de este documento se hará referencia a una relación funcional. En este trabajo se denota con x_i al mejor estimado de las magnitudes de entrada X_i . Los valores de las magnitudes de entrada pueden ser resultados de mediciones recientes realizadas por el usuario o tomados de fuentes como certificados, literatura, manuales, etc. El mejor estimado del valor del mensurando es el resultado de calcular el valor de la función f evaluada en el mejor estimado de cada magnitud de entrada,

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (\text{A.2})$$

En algunas ocasiones se toma el mejor estimado de Y como el promedio de varios valores y_j del mensurando obtenidos a partir de diversos conjuntos de valores $\{X_i\}$ de las magnitudes de entrada.

A.9 Identificación de las fuentes de incertidumbre

Una vez determinados el mensurando, el principio, el método y el procedimiento de medición, se identifican las posibles fuentes de incertidumbre. Éstas provienen de los diversos factores involucrados en la medición, por ejemplo,

- los resultados de la calibración del instrumento;
- la incertidumbre del patrón o del material de referencia;
- la repetibilidad de las lecturas;
- la reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos;
- características del propio instrumento, como resolución, histéresis, deriva, etc.;
- variaciones de las condiciones ambientales;
- la definición del propio mensurando;
- el modelo particular de la medición;
- variaciones en las magnitudes de influencia.

No es recomendable desechar alguna de las fuentes de incertidumbre por la suposición de que es poco significativa sin una cuantificación previa de su contribución, comparada con las demás, apoyada en mediciones. Es preferible la inclusión de un exceso de fuentes que ignorar algunas entre las cuales pudiera descartarse alguna importante.

A.10 Identificación y Cálculo de la Incertidumbre.

La incertidumbre puede clasificarse en:

- **Tipo A:** Aquellas que pueden estimarse a partir de cálculos estadísticos obtenidos de las muestras recogidas en el proceso de medida.
- **Tipo B:** Aquellas que únicamente están basadas en la experiencia o en otras informaciones.

A.11 Representación de los componentes de la incertidumbre.

A.11.1 Incertidumbre estándar.

Cada componente de incertidumbre evaluada está representada por una desviación estándar estimada, término incertidumbre estándar con el símbolo sugerido U_i , e igual a la raíz cuadrada de la varianza estimada U_i^2 .

A.11.2 Evaluación tipo A.

La incertidumbre de una magnitud de entrada X_i obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima con base en la dispersión de los resultados individuales.

Si X_i se determina por n mediciones independientes, resultando en valores q_1, q_2, \dots, q_n , el mejor estimado x_i para el valor de X_i es la media de los resultados individuales:

$$x_i = \bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (\text{A.3})$$

La dispersión de los resultados de la medición q_1, q_2, \dots, q_n para la magnitud de entrada X_i se expresa por su desviación estándar experimental:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (\text{A.4})$$

La incertidumbre estándar $U(x_i)$ de X_i se obtiene finalmente mediante el cálculo de la desviación estándar experimental de la media:

$$U(x_i) = s(q) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.5})$$

Así que resulta para la incertidumbre estándar de X_i :

$$U(x_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (\text{A.6})$$

Para una medición que se realiza por un método bien caracterizado y bajo condiciones controladas, es razonable suponer que la distribución (dispersión) de los q_j no cambia, o sea se mantiene prácticamente igual para mediciones realizadas en diferentes días, por distintos metrólogos, etc. (esto es, la medición está bajo control estadístico). En este caso esta componente de la incertidumbre puede ser más confiablemente estimada con la desviación estándar s_p **obtenida de un solo experimento anterior**, que con la desviación estándar experimental $s(q)$ obtenida por un número n de mediciones, casi siempre pequeño, según la ecuación. (A.3).

La incertidumbre estándar de la media se estima en este caso por:

$$U(x_i) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.7})$$

Cabe mencionar que n es el número de mediciones repetidas para evaluar $x_i = \bar{q}$, según la ecuación (A.3), mientras s_p se determinó por un número distinto (y grande) de mediciones.

No se puede dar una recomendación general para el número ideal de las repeticiones n , ya que éste depende de las condiciones y exigencias (meta para la incertidumbre) de cada medición específica. Hay que considerar que:

- Aumentar el número de repeticiones resulta en una reducción de la incertidumbre tipo A, la cual es proporcional a $1/\sqrt{n}$.
- Un número grande de repeticiones aumenta el tiempo de medición, que puede ser contraproducente, si las condiciones ambientales u otras magnitudes de entrada no se mantienen constantes en este tiempo.
- En pocos casos se recomienda o se requiere n mayor de 10. Por ejemplo cuando se caracterizan instrumentos o patrones, o se hacen mediciones o calibraciones de alta exactitud.
- Para determinar el impacto que tiene n en la incertidumbre expandida hay que estimar su influencia en el número de grados efectivos de libertad.
- Otras fuentes de incertidumbre que se evalúan con este método son la reproducibilidad y las obtenidas al hacer una regresión lineal.

A.11.3 Evaluación tipo B.

Las fuentes de incertidumbre tipo B son cuantificadas usando información externa U obtenida por experiencia. Estas fuentes de información pueden ser:

- Certificados de calibración.
- Manuales del instrumento de medición, especificaciones del instrumento.
- Normas o literatura.
- Valores de mediciones anteriores.
- Conocimiento sobre las características o el comportamiento del sistema de medición.

A.12 Distribuciones de probabilidad.

La cuantificación de una fuente de incertidumbre incluye la determinación del mejor valor estimado asignado de un valor y la determinación de la distribución a la cual se refiere

este valor. Por lo general, el resultado de una medición corresponde algún tipo de distribución.

Las distribuciones que aparecen más frecuentemente son:

- Distribución normal:** Los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal. También la incertidumbre indicada en certificados de calibración se refiere generalmente a una distribución normal. [Figura A.5 (a)].
- Distribución rectangular:** En una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad, o sea la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo. Ejemplos típicos son la resolución de un instrumento digital o la información técnica sobre tolerancias de un instrumento. En general, cuando exclusivamente hay conocimiento de los límites superior e inferior del intervalo de variabilidad de la magnitud de entrada, lo más conservador es suponer una distribución rectangular. [Figura A.5 (b)].
- Distribución triangular:** Si además del conocimiento de los límites superior e inferior hay evidencia de que la probabilidad es más alta para valores en el centro del intervalo y se reduce hacia los límites, puede ser más adecuado basar la estimación de la incertidumbre en una distribución triangular. [Figura A.5 (c)].

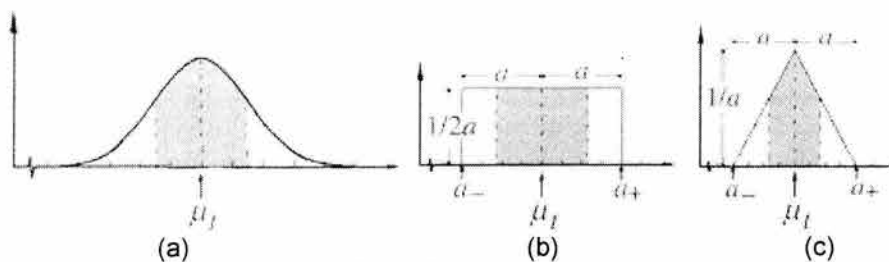


Figura A.5.

Pueden encontrarse también distribuciones como la U , en la cual los extremos del intervalo presentan los valores con probabilidad máxima, típicamente cuando hay comportamientos oscilatorios subyacentes. También se encuentran distribuciones triangulares con el valor máximo en un extremo como en las asociadas a “errores de coseno”.

A.13 Reducción.

Antes de comparar y combinar contribuciones de la incertidumbre que tienen distribuciones diferentes, es necesario representar los valores de las incertidumbres originales como incertidumbres estándar. Para ello se determina la desviación estándar de la distribución asignada a cada fuente.

- Distribución normal:** La desviación estándar experimental de la media calculada a partir de los resultados de una medición repetida según la ecuación (A.6) ya representa la incertidumbre estándar. Cuando se dispone de valores de una incertidumbre expandida U_E , como los presentados por ejemplo en certificados de

calibración, se divide U_E entre el factor de cobertura k , obtenido ya sea directamente o a partir de un nivel de confianza dado (ver Sección A.17.1):

$$U(x_i) = \frac{U_E}{k} \quad (\text{A.8})$$

b) *Distribución rectangular*: Si la magnitud de entrada X_i tiene una distribución rectangular con el límite superior a_+ y el límite inferior a_- , el mejor estimado para el valor de X_i está dado por:

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad (\text{A.9})$$

y la incertidumbre estándar se calcula por:

$$U(x_i) = \frac{a_+ + a_-}{\sqrt{12}} \quad (\text{A.10})$$

o por

$$U(x_i) = \frac{a/2}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.11})$$

donde $a/2$ es el semiancho del intervalo a con

$$a = a_+ - a_- \quad (\text{A.12})$$

Una aplicación típica es la resolución de un instrumento digital. También la incertidumbre relacionada con el número finito de cifras significativas de datos tomados de la literatura puede ser tratada con esta distribución (siempre y cuando no haya indicios que la incertidumbre en realidad es mayor que la incertidumbre relacionada con la última cifra significativa). Si se aplica a la resolución o a datos tomados de la literatura, a corresponde al último dígito significativo o a la última cifra significativa respectivamente.

c) *Distribución triangular*: Como en una distribución rectangular, para una magnitud de entrada X_i que tiene una distribución triangular con los límites a_+ y a_- [Figura A.5(c)], el mejor estimado para el valor de X_i está dado por:

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad (\text{A.13})$$

La incertidumbre estándar se calcula en este caso por:

$$U(x_i) = \frac{a_+ + a_-}{\sqrt{24}} = \frac{a/2}{\sqrt{6}} \quad (\text{A.14})$$

con a definido por la ecuación (A.12).

A.14 Combinación.

Combinación de las incertidumbre tipo A y B se realiza cuando la magnitud a medir depende de otra o varias magnitudes (medidas indirectas), por lo que la incertidumbre de la variable a medir depende de la de otro parámetro ya medido de forma directa o indirecta. Para que sea aplicable la teoría que va a exponerse, es necesario que todas las medidas se realicen con las mismas condiciones, por lo que debe utilizarse el mismo instrumento y escala para medir una magnitud dentro de todo el proceso experimental, igualmente en lo posible mantener las condiciones ambientales estables, así como, cualquier otro factor que pueda afectar la medición.

El resultado de la combinación de las contribuciones de todas las fuentes es la incertidumbre estándar combinada $U_c(y)$, la cual contiene toda la información esencial sobre la incertidumbre del mensurando Y . La contribución $U_i(y)$ de cada fuente a la incertidumbre combinada depende de la incertidumbre estándar $U(x_i)$ de la propia fuente y del impacto de la fuente sobre el mensurando. Es posible encontrar que una pequeña variación de alguna de las magnitudes de influencia tenga un impacto importante en el mensurando, y viceversa.

Se determina $U_i(y)$ por el producto de $U(x_i)$ y su coeficiente de sensibilidad c_i (o factor de sensibilidad):

$$U_i(y) = c_i \cdot U(x_i) \quad (\text{A.15})$$

A.15 Coeficiente de sensibilidad.

El coeficiente de sensibilidad describe, qué tan sensible es el mensurando con respecto a variaciones de la magnitud de entrada correspondiente. Para su determinación existen dos métodos:

- a) *Determinación a partir de una relación funcional:* Si el modelo matemático para el mensurando $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ describe la influencia de la magnitud de entrada X_i suficientemente bien mediante una relación funcional, el coeficiente de sensibilidad c_i se calcula por la derivada parcial de f con respecto a X_i :

$$c_i = \left. \frac{\partial f(x_1, \dots, x_N)}{\partial x_i} \right|_{x_1=x_1, x_N=x_N} \quad (\text{A.16})$$

- b) *Otros métodos de determinación:* Si la influencia de la magnitud de entrada X_i en el mensurando Y no está representada por una relación funcional, se determina el coeficiente de sensibilidad c_i por una estimación del impacto de una variación de X_i en Y según:

$$c_i = \frac{\Delta Y}{\Delta X_i} \quad (\text{A.17})$$

Esto es, manteniendo constantes las demás magnitudes de entrada, se determina el cambio de Y producido por un cambio en X_i por una medición o a partir de la información disponible (como una gráfica o una tabla).

A.15.1 Propagación de la incertidumbre para magnitudes de entrada no correlacionadas.

En el caso de magnitudes de entrada no correlacionadas, la incertidumbre combinada $U_C(y)$ se calcula por la suma geométrica de las contribuciones particulares:

$$U_C^2(y) = \sum_{i=1}^N U_i^2(y) \quad (\text{A.18})$$

Considerando (A.15) y (A.16) resulta finalmente:

$$U_C(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i \cdot U_i(x_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial X_i} \cdot U(x_i) \right]^2} \quad (\text{A.19})$$

La regla presentada en ecuación (A.19) es llamada *ley de propagación de incertidumbre*. Note que la última expresión en esta ecuación se aplica cuando se dispone de la relación funcional entre Y y $\{X_i\}$.

A.15.2 Magnitudes de entrada relacionadas con más de una fuente de incertidumbre.

En la mayoría de los casos una magnitud de entrada X_i es afectada por varias fuentes de incertidumbre, que pueden ser por ejemplo la resolución del instrumento, la dispersión de datos obtenidas por mediciones repetidas y la incertidumbre de la calibración del instrumento. En este caso hay dos maneras (equivalentes) de calcular la incertidumbre combinada.

- a) Como primera alternativa, se calcula la incertidumbre total (combinada) relacionada con cada magnitud de entrada X_i por la suma geométrica de las incertidumbres individuales:

$$U_C(x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^N [U_j(x_i)]^2} \quad (\text{A.20})$$

donde $U_j(x_i)$ es la incertidumbre estándar de la fuente de incertidumbre número j de las M_j fuentes relacionadas con la magnitud de entrada X_i . Después se introducen los valores de $U(x_i)$ la ecuación (A.19).

- b) Si se está interesado en ver el efecto particular que tiene cada una de las fuentes en la incertidumbre combinada $U_C(y)$, cada fuente puede entrar individualmente en la ecuación (A.19) sustituyendo el número de magnitudes de entrada N en la suma por el número total de fuentes de incertidumbre. Cabe mencionar que el coeficiente de sensibilidad c_i es igual para todas las fuentes de incertidumbre relacionadas con la misma magnitud de entrada X_i .

$$U_C(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 \sum_{j=1}^{M_j} [U_j(x_i)]^2} \quad (\text{A.21})$$

Cuando el coeficiente de sensibilidad c_i es cero o cuando la función no admite una representación lineal adecuada (únicamente con la primera derivada) en el intervalo $\pm U(x_i)$ es conveniente y aun indispensable considerar términos de segundo orden (que dependen de las segundas derivadas). Es posible mejorar la aproximación anterior y realizar el cálculo riguroso para combinar las contribuciones, el cual, sin embargo, puede ser más o menos laborioso dependiendo del modelo matemático.

A.16 Correlación.

A menudo los resultados de mediciones de dos magnitudes de entrada están ligados, ya sea porque existe una tercera magnitud que influye sobre ambas, porque se usa el mismo instrumento para medir o el mismo patrón para calibrar, o por alguna otra razón. *Por ejemplo, en la calibración gravimétrica de medidores de volumen son magnitudes de entrada las temperaturas del agua y del ambiente. Estas temperaturas están relacionadas aun cuando sus valores puedan ser diferentes. La temperatura del agua será más alta cuando la temperatura ambiente lo sea y bajará cuando lo haga la temperatura ambiente, es decir existe una correlación entre estas magnitudes.* Desde el punto de vista estadístico, dos variables son independientes cuando la probabilidad asociada a una de ellas no depende de la otra, esto es, si q y w son dos variables aleatorias independientes, la probabilidad conjunta se expresa como el producto de las probabilidades de las variables respectivas

$$p(q, w) = p(q) \cdot p(w) \quad (\text{A.22})$$

Frecuentemente, se encuentran magnitudes de entrada que no son independientes. La independencia lineal de dos variables puede estimarse estadísticamente con el coeficiente de correlación

$$r(q, w) = \frac{U(q, w)}{U(q) \cdot U(w)} \quad (\text{A.23})$$

En el denominador aparecen las incertidumbres estándar de las variables aludidas y en el numerador la covarianza de las mismas. La covarianza puede ser estimada:

- a) por medio de las relaciones funcionales entre ambas variables y la tercera que influye sobre ellas,
- b) a partir de un conjunto de n valores de q y w según la ecuación:

$$U(q, w) = \frac{1}{n(n-1)} \cdot \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q}) \cdot (w_k - \bar{w}) \quad (\text{A.24})$$

A.17 Incertidumbre expandida.

La forma de expresar la incertidumbre como parte de los resultados de la medición depende de la conveniencia del usuario. A veces se comunica simplemente como la incertidumbre estándar combinada, otras ocasiones como un cierto número de veces tal incertidumbre, algunos casos requieren se exprese en términos de un nivel de confianza dado, etc. En cualquier caso, es indispensable comunicar sin ambigüedades la manera en que la incertidumbre está expresada.

A.17.1 Factor de cobertura y nivel de confianza.

La incertidumbre estándar U_c representa un intervalo centrado en el mejor estimado del mensurando que contiene el valor verdadero con una probabilidad p de 68% aproximadamente, bajo la suposición de que los posibles valores del mensurando siguen una distribución normal.

Generalmente se desea una probabilidad mayor, lo que se obtiene expandiendo el intervalo de incertidumbre por un factor k , llamado factor de cobertura. El resultado se llama incertidumbre expandida U_E .

$$U_E = K \cdot U_C \quad (\text{A.25})$$

La incertidumbre expandida U_E indica entonces un intervalo que representa una fracción p de los valores que puede probablemente tomar el mensurando. El valor de p es llamado el nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia.

En el medio industrial, a menudo se elige el nivel de confianza de manera tal que corresponda a un factor de cobertura como un número entero de desviaciones estándar en una distribución normal.

Por ejemplo, en una distribución normal, $k=1$ corresponde a $p=68,27\%$, $k=2$ a $p=95,45\%$. En una distribución rectangular $p=57,7\%$ si $k=1$.

Cuando es necesaria una estimación más rigurosa de la incertidumbre expandida se consideran las Secs. A.17.4 hasta A.17.5; cuando no son necesarias estimaciones muy rigurosas de la incertidumbre, como en mediciones de baja exactitud, entonces es suficiente seguir con la Sec. A.10.4.

A.17.2 Distribución “t” de Student.

Frecuentemente, los valores del mensurando siguen una distribución normal. Sin embargo, el mejor estimado del mensurando, la media (obtenida por muestreos de n mediciones repetidas) dividida entre su desviación estándar, sigue una distribución llamada t de Student, la cual refleja las limitaciones de la información disponible debidas al número finito de mediciones. Esta distribución coincide con la distribución normal en el límite cuando n tiende a infinito, pero difiere considerablemente de ella cuando n es pequeño.

La distribución t de Student es caracterizada por un parámetro ν llamado número de grados de libertad.

Considerando lo anterior, es necesario ampliar el intervalo correspondiente al nivel de confianza p , por lo que la ecuación A.10.1 se transforma a

$$U_E = t_p(\nu) \cdot U_C \quad (\text{A.26})$$

El factor $t_p(\nu)$ indica los límites del intervalo correspondiente al nivel de confianza p de la distribución y su valor siempre es mayor o igual que el factor k (tomado de la distribución normal). Sus valores se encuentran en la Tabla A.1.

Cuando se combinan varias fuentes de incertidumbre con sus respectivas distribuciones para obtener la incertidumbre combinada U_C del mensurando, el Teorema del Límite Central permite aproximar la distribución resultante a una distribución normal. La aproximación será mejor mientras más grande sea el número de fuentes y sus contribuciones sean similares, independientemente de la forma particular de sus distribuciones.

Nuevamente, la disponibilidad limitada de información hace necesario el uso de la distribución "t" de Student para determinar la incertidumbre expandida de manera rigurosa (con la suposición de que los valores del mensurando obedecen una distribución normal). El número efectivo de grados de libertad ν_{ef} para esta situación se discute en la Sección A.10.3. Cuando sólo es relevante la contribución de una fuente cuya distribución no sea normal, lo más conveniente es estimar la incertidumbre expandida directamente de los parámetros de la distribución.

Grados de libertad $\nu = n - 1$	Fracción p en por ciento nivel de confianza					
	68,27 ^(a)	90,00	95,00	95,45 ^(a)	99,00	99,73 ^(a)
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,96
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	1,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,43
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

(a) La fracción $p = 68,27; 95,45$ y $99,73$ % de la distribución corresponden al factor de cobertura $k = 1, 2$ y 3 respectivamente.

Tabla A.1. Valores de $t_p(\nu)$ de la distribución t para ν grados de libertad.

Por ejemplo, cuando las lecturas obtenidas con un instrumento de baja exactitud son idénticas debido a la resolución del instrumento y las otras fuentes de incertidumbre son insignificantes, es plausible suponer que los valores razonables del mensurando siguen una distribución rectangular cuyos límites están determinados por el valor de la escala del instrumento, al que se le ha asignado una cierta incertidumbre, entonces puede estimarse directamente el ancho del intervalo que contiene la fracción p de los valores que pueden atribuirse razonablemente al mensurando.

A.17.3 Grados de libertad.

De cierta manera el número ν de grados de libertad asociado a una distribución de una magnitud (X_i o Y) puede considerarse una medida de incertidumbre de la incertidumbre de esa magnitud. Entre mayor sea n la estimación de la incertidumbre será más confiable.

El número efectivo de grados de libertad ν_{ef} del mensurando considera el número de grados de libertad ν_i de cada fuente de incertidumbre.

En las incertidumbres tipo A, no dependen directamente del número de datos considerados y disminuye conforme el número de parámetros estimados a partir de los mismos datos.

La repetibilidad de una medición, estimada por la desviación estándar experimental de n lecturas tiene $n-1$ grados de libertad. Una regresión lineal de M puntos mediante una ecuación de m parámetros tiene $M-m$ grados de libertad.

La determinación del número de grados de libertad de una incertidumbre tipo B implica el criterio del metrólogo soportado por su experiencia, aun cuando sea subjetiva, para determinar la incertidumbre relativa de la propia incertidumbre, y calcular el número de grados de libertad para esa fuente específica i con la ecuación:

$$\nu_i \approx \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\Delta U(x_i)}{U(x_i)} \right]^{-2} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{U(x_i)}{\Delta U(x_i)} \right]^2 \tag{A.27}$$

Donde la cantidad $\Delta U(x_i)$ es una estimación de la incertidumbre de la incertidumbre $U(x_i)$ de la fuente i cuantificada por el metrólogo. Es recomendable aproximar el resultado del cálculo con la ecuación anterior al entero cercano más bajo.

Se observa también que un valor mayor de $U(x_i)$, al ser una estimación más conservadora, puede traer consigo un menor valor de $\Delta U(x_i)$ y por consiguiente un mayor número de grados de libertad.

Siguiendo, el número efectivo de grados de libertad se calcula según la ecuación de Welch-Satterthwaite, aun cuando existan observaciones sobre su validez merecedoras de atención, la cual puede escribirse en términos de la relación entre la contribución de la fuente i y la incertidumbre combinada como:

$$\frac{1}{\nu_{ef}} = \sum_{i=1}^N \frac{\left(\frac{U_i(y)}{U_c(y)} \right)^4}{\nu_i} \tag{A.28}$$

Si el valor de ν_{ef} resultante no es entero, generalmente se considera ν_{ef} como el entero menor más próximo.

Un análisis de la ecuación anterior muestra el dominio de las fuentes con pocos grados de libertad en el cálculo de v_{ef} , sobre todo de aquellas cuyas contribuciones son grandes a la incertidumbre combinada. De hecho una fuente cuya contribución es alta y con pocos grados de libertad, es determinante del valor de v_{ef} .

A.17.4 Incertidumbre expandida.

Resumiendo, de manera rigurosa la incertidumbre expandida se calcula de acuerdo a la ecuación (A.26) como:

$$U_E = U_C \cdot t_p(v_{ef}) \tag{A.29}$$

donde $t_p(v_{ef})$ es el factor derivado de la distribución t de Student a un nivel de confianza p y v_{ef} grados de libertad y obtenido de tablas. Comparando la ecuación (A.25) con la ecuación (A.29) es evidente que el factor de cobertura k de la ecuación (A.25) corresponde al valor de $t_p(v_{ef})$.

Frecuentemente, cuando v_{ef} es suficientemente grande, no se encuentra diferencia significativa en los resultados numéricos obtenidos con la ecuación (A.29) para un p dado de aquéllos obtenidos con la ecuación (A.25) tomando k de la distribución normal para el mismo p. Una buena práctica es realizar el cálculo riguroso con la ecuación (A.29) y entonces decidir sobre la conveniencia de usar simplemente la ecuación (A.25).

A.17.5. Expresión de la incertidumbre

En el CENAM, la política es expresar los resultados de sus mediciones con un nivel de confianza no menor al 95%, en vista de la costumbre en laboratorios similares. Es difícil asegurar un valor preciso de la incertidumbre debido a las múltiples aproximaciones realizadas durante su estimación.

Por ello, generalmente los valores de $t_p(v_{ef})$ para $p = 95\%$ se aproximan por los que corresponden a $t_p(v_{ef})$ para $p = 95,45\%$ con el fin de obtener un valor de $k = 2,00$ en el límite de una distribución normal.

Los valores de $t_p(v_{ef})$ para $p = 95,45\%$ se muestran en la siguiente tabla 3:

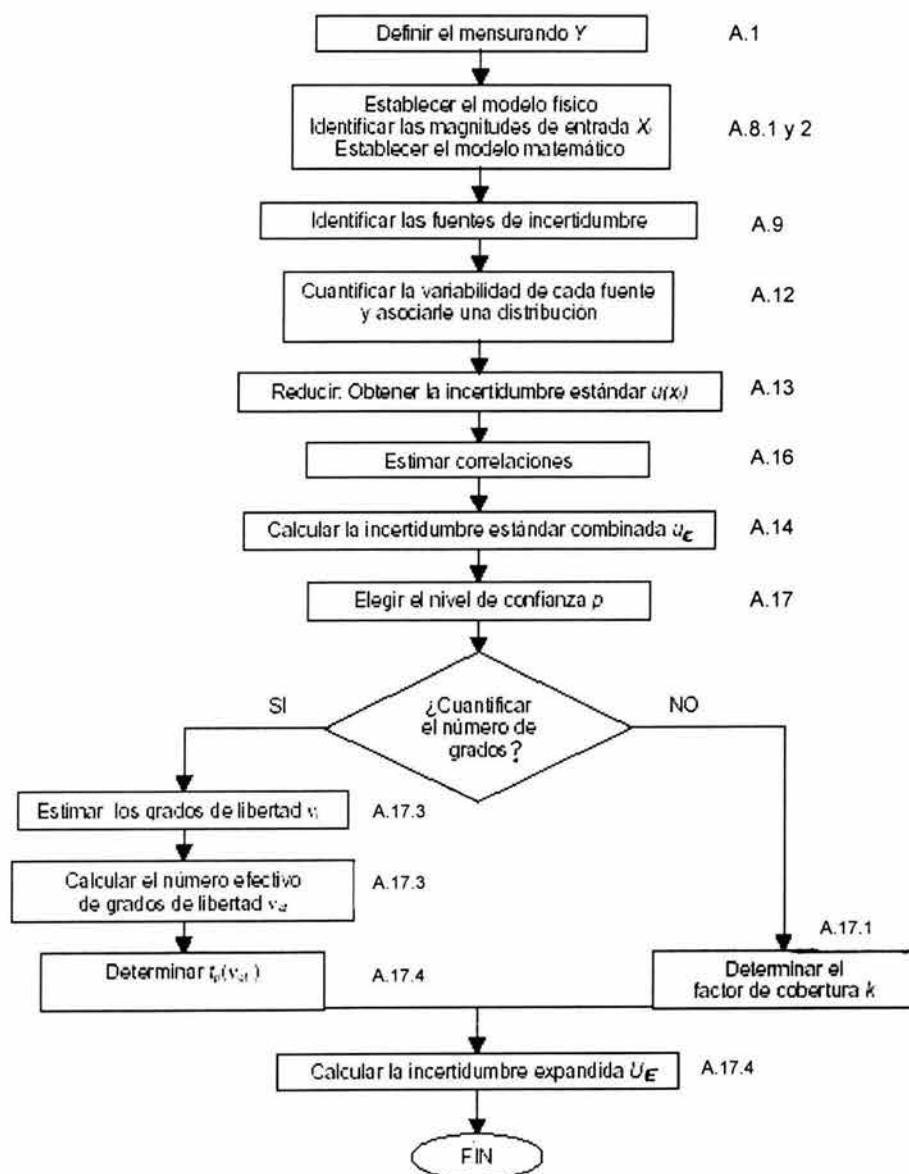
v	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	50	100	∞
$t_p(v_{ef})$	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52	2.43	2.37	2.32	2.28	2.13	2.05	2.025	2.000

La expresión de la incertidumbre expandida U_E incluye su indicación como un intervalo centrado en el mejor estimado y del mensurando, la afirmación de que p es del 95% (o el valor elegido) aproximadamente y el número efectivo de grados de libertad, cuando sea requerido. Una manera de expresar el resultado de la medición es

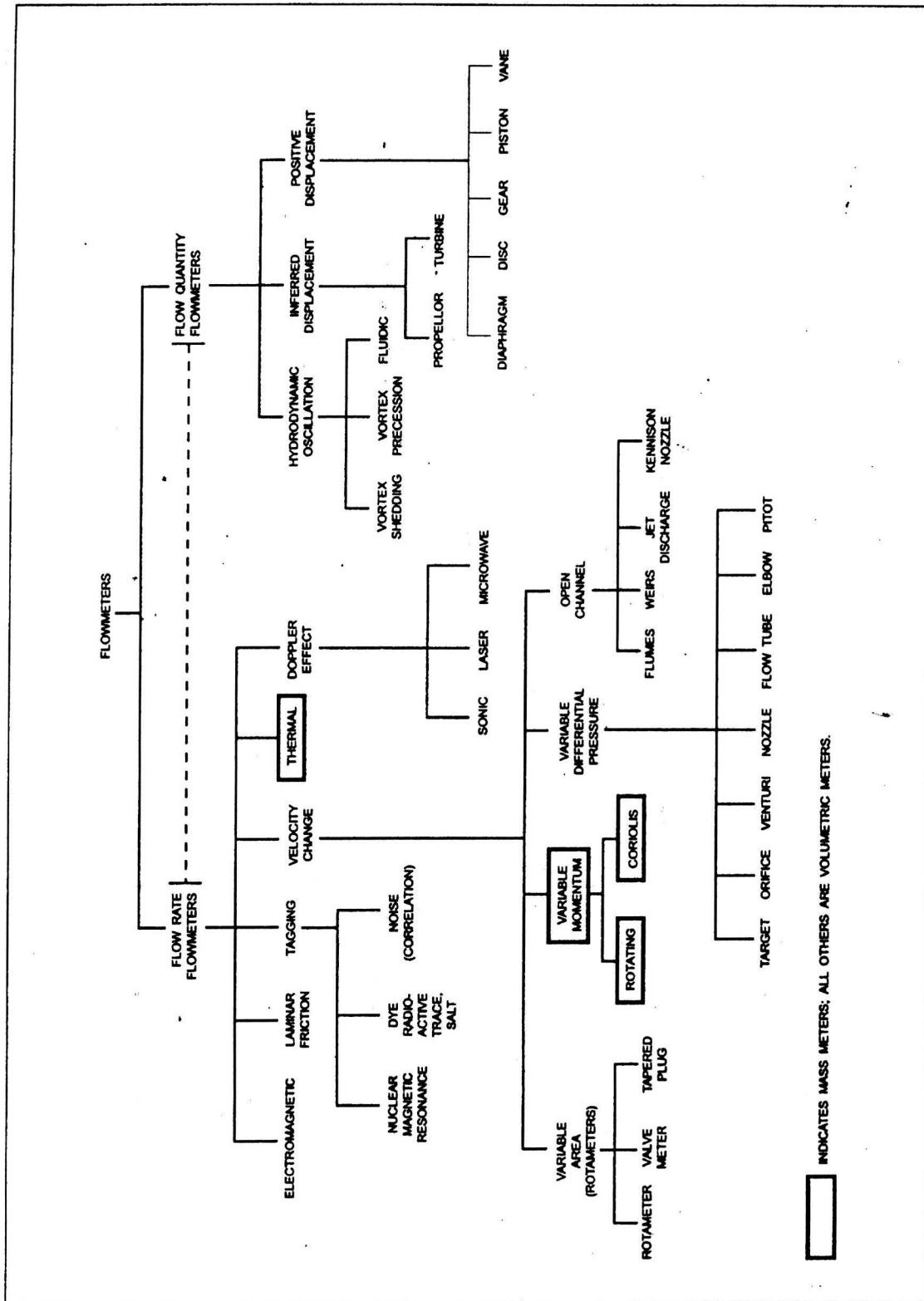
$$Y = y \pm U_E \tag{A.30}$$

El número de cifras significativas en la expresión de la incertidumbre es generalmente uno, o dos cuando la exactitud es alta (si la primera cifra significativa es uno o dos, cabe la posibilidad de usar un dígito más para evitar la pérdida de información útil). Además debe asegurarse que el número de cifras significativas del valor del mensurando sea consistente con el de la incertidumbre.

A.18 Diagrama para la estimación de la incertidumbre.



APÉNDICE B







INDICATES MASS METERS; ALL OTHERS ARE VOLUMETRIC METERS.

Apéndice B.1. Árbol familiar de medidores de flujo.

Flowmeter Application	Clean Liquids	Dirty Liquids	Corrosive Liquids	Viscous Liquids	Abrasive Slurries	Fibrous Slurries	Low Velocity Flows	Vapor or Gas	Hi Temp. Service	Cryogenic Service	Seam-Filled Pipes	Non-Newtonians	Open Channel
1 DIFFERENTIAL PRESSURE	ORIFICE	VENTURI	FLOW NOZZLES AND TUBES	PITOT TUBES	ELBOW								
2 MAGNETIC													
3 MASS	CORIOLIS	THERMAL											
4 OSCILLATORY	VORTEX SHEDDING	FLUIDIC	VORTEX PRECESSION										
5 POSITIVE DISPLACEMENT													
6 TARGET													
7 TURBINE													
8 ULTRASONIC	TRANSIT TIME	DOPPLER											
9 VARIABLE AREA													
10 WEIRS AND FLUMES													




FLOWMETER APPLICATIONS

-  DESIGNED FOR THIS SERVICE
-  APPLICABLE FOR THIS SERVICE UNDER CERTAIN CONDITIONS. CONSULT MANUFACTURER
-  NORMALLY APPLICABLE FOR THIS SERVICE
-  NOT APPLICABLE FOR THIS SERVICE

Apéndice B.2. Guía de medidores de flujo.

METER PRINCIPLE		PIPING REQUIREMENTS (NOTE 1)														ANCILLARY EQUIPMENT REQUIREMENTS (SEE PIPING DIAGRAM)									
		UPSTREAM PIPE LENGTH	DOWNSTREAM PIPE LENGTH	PIPE MATERIAL	PIPE WALL THICKNESS	CONDITION OF PIPE ID	CONCENTRICITY OF METER ID WITH PIPE ID	METER ORIENTATION			BY-PASS PIPING	SUPPORT		FLOW CONDITONERS		STRAINER OR FILTER	AIR ELIMINATOR	BLOCK VALVES	TRANSMITTER LOCATION	SENSING PIPING	ISOLATION MANIFOLD				
NO.	TYPE	NOTE 2	NOTE 2	NOTE 3	NOTE 3	NOTE 4	NOTE 5	NOTE 6	NOTE 7	NOTE 8	NOTE 9	NOTE 10	NOTE 11	NOTE 12	NOTE 13	NOTE 14									
1	DP	ORIFICE																							
		VENTURI																							
		FLOW NOZZLE																							
		FLOW TUBE																							
		ELBOW																							
2		PITOT																							
		AVERAGING PITOT																							
		CORIOLIS																							
		THERMAL INSERT.																							
3		THERM. METER BODY																							
		FLUIDIC																							
		VORTEX PRECESS.																							
4		VORTEX SHEDDING																							
		AC EXCITED																							
5		PULSE DC EXCITED																							
		TURBINE																							
6		DOP. CLAMP-ON																							
		DOP. METER BODY																							
		ToF CLAMP-ON																							
		ToF METER BODY																							
7		TARGET																							
		PD																							

LEGEND:

-  INSTALLATION REQUIREMENTS ESSENTIAL TO GOOD MEASUREMENT.
-  INSTALLATION REQUIREMENTS RECOMMENDED FOR GOOD MEASUREMENT.
-  CONSULT MANUFACTURER.
-  NOT A FACTOR.

Apéndice B.3. Guía para instalación de medidores de flujo.

FLOWMETER	PIPE SIZE, in (mm)	GASES (VAPORS)		LIQUIDS						TEMPERATURE, °F (°C)	PRESSURE, psig (MPa)	ACCURACY, UNCALIBRATED (INCLUDING TRANSMITTER)	REYNOLDS NUMBER	
		CLEAN	DIRTY	CLEAN	DIRTY	DIRTY	CORROSIVE	FIBROUS	ABL-RES					ABL-RES
SQUARE ROOT SCALE: MAXIMUM SINGLE RANGE 4:1														
ORIFICE														
SQUARE-EDGED	>1.5 (40)													R _D >2000
HONED METER RUN FOXBORO (FOA)	0.5-1.5 (12-40)													R _D >1000
INTEGRAL	<0.5 (12)													R _D >100
QUADRANT/CONIC EDGE	>1.5 (40)													R _D >200
ECCENTRIC	>2 (50)													R _D >10,000
SEGMENTAL	>4 (100)													R _D >10,000
ANNULAR	>4 (100)													R _D >10,000
TARGET	>0.5-4 (12-100)													R _D >100
VENTURI	>2 (50)													R _D >75,000
FLOW NOZZLE	>2 (50)													R _D >10,000
LO-LOSS	>3 (75)													R _D >12,500
PITOT	>3 (75)													NO LIMIT
MULTIPOINT AVERAGING	>1 (25)													R _D >10,000
ELBOW	>2 (50)													R _D >10,000
LINEAR SCALE: TYPICAL RANGE 10:1														
MAGNETIC	0.1-72 (25-1800)													±0.5% OF RATE TO ±1% URV
MASS FLOWMETER CORIOLIS														±0.2% TO ±1% OF RATE
POSITIVE DISPLACEMENT	<12 (300)													GASES: ±1% URV LIQUIDS: ±0.5% OF RATE
TURBINE	0.25-24 (6-600)													GASES: ±0.5% OF RATE LIQUIDS: ±1% OF RATE
ULTRASONIC														
TIME-OF-FLIGHT	>0.5 (12)													±1% OF RATE TO ±5% URV
DOPPLER	>0.5 (12)													±5% URV
VARIABLE AREA	≥ 3 (75)													±0.5% OF RATE TO ±1% URV
VORTEX	0.5-16 (12-400)													±0.5-1.5% OF RATE

*URV = UPPER RANGE VALUE OF THE FLOW RATE. FORMERLY FULL SCALE FLOW RATE.

- = DESIGNED FOR THIS APPLICATION;
- = NORMALLY APPLICABLE;
- = NOT DESIGNED FOR THIS APPLICATION

Apéndice B.4. Selección de medidores de flujo.

	APPLICATIONS								FEATURES										
	CLEAN LIQUID	DIRTY LIQUID	VISCOUS LIQUID	CORROSIVE	SLURRIES	CLEAN GAS	DIRTY GAS	STEAM	SIZES AVAILABLE	ACCURACY	RANGEABILITY	REYNOLDS NUMBERS	VISCOSITY EFFECTS	PRESSURE LOSS	RELATIVE COST	PIPING REQUIRED UPSTREAM	INSTALLATION	MAINTENANCE	TYPE OF OUTPUT
ORIFICE PLATE	●					●		●	> 1"	3/4%	3/1	> 30,000	H	H	L	10-300	M-H	M-H	√
INTEGRAL ORIFICE	●					●		●	1", 1.5"	2%	3/1	> 10,000	H	H	L	10-300	L	M-H	√
WEDGE™	●	●	●	○	●	●	●	●	> .5"	1/2%	3/1	> 500	H	M	H	10-300	L	L	√
FLOW NOZZLE	●	○	○	○	○	●	○	○	> 2"	1-1/2%	3/1	> 75,000	H	M	M	10-300	M	L	√
VENTURI TUBE	●	○	○	○	○	●	○	○	> 2"	1%	3/1	> 75,000	H	L	H	5-100	M	L	√
ELBOW	●	○	○	○	○	●	○	○	> 2"	5%	3/1	> 10,000	H	L	L	NONE	M	L	√
PITOT-VENTURI	○					●			> 6"	3%	3/1	> 100,000	H	L	L	20-300	M	L	√
PITOT	●	○	○	○	○	●	○	○	> 3"	3%	3/1	> 100,000	H	L	L	20-300	M	L	√
FLOBAR™	●	○	○	○	○	●	○	○	> .5"	1%	3/1	> 40,000	H	L	L	10-200	L	L	√
MAGNETIC	●	●	●	●	●	●	●	●	> .1"	1/2%	10/1	NONE	N	L	H	5D	H	M	LINEAR
ROTAMETER	●	●	●	○	○	●	○	○	≤ 3"	2%	10/1	NONE	M	M	L	NONE	L	L	LINEAR
TURBINE	●	●	●	○	○	●	●	●	> .25"	1/2%	10/1 TO 50/1	≤ 2-15 cSt	H	H	M	10-200	L	M-H	LINEAR
POSITIVE DISPLACEMENT	●	○	○	○	○	●	○	○	< 12"	1%	20/1	≤ 8000 cSt	N	H	H	NONE	H	H	LINEAR
VORTEX SHEDDING	●	○	○	○	○	●	○	○	> 1"	1%	20/1	> 10,000	N	M	M	15-250	M	M	LINEAR
DOPPLER	○	○	○	○	○	○	○	○	> .5"	2-5%	10/1	NONE	N	L	M	5-200	L	L	LINEAR
TRANSIT TIME	●	○	○	○	○	○	○	○	> .5"	2-5%	10/1	NONE	N	L	M	5-200	L	L	LINEAR
MASS	●	●	●	○	○	●	○	○	< 6"	1/4%	25/1	NONE	N	M	H	NONE	H	L-M	LINEAR
TARGET	●	●	●	○	○	●	○	○	> .5" - 4"	1-1/2 - 5%	10/1	> 100	M	M	L	10-200	L	M	√

● — RECOMMENDED
 ○ — LIMITED APPLICABILITY
 □ — NOT RECOMMENDED
 N — NONE
 L — LOW
 M — MEDIUM
 H — HIGH

Apéndice B.5. Guía de selección de medidores de flujo.

APÉNDICE C

Temperatura (°C)	Peso Especifico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad Dinámica μ (Pa•s) o (N•s/m ²)	Viscosidad Cinemática ν (m ² /s)
0	9.81	1000	1.75 X 10 ⁻³	1.75 x 10 ⁻⁶
5	9.81	1000	1.52 X 10 ⁻³	1.52 x 10 ⁻⁶
10	9.81	1000	1.30 X 10 ⁻³	1.30 x 10 ⁻⁶
15	9.81	1000	1.15 X 10 ⁻³	1.15 x 10 ⁻⁶
20	9.79	998	1.02 X 10 ⁻³	1.02 x 10 ⁻⁶
25	9.78	997	8.91 X 10 ⁻⁴	8.94 x 10 ⁻⁷
30	9.77	996	8.00 X 10 ⁻⁴	8.03 x 10 ⁻⁷
35	9.75	994	7.18 X 10 ⁻⁴	7.22 x 10 ⁻⁷
40	9.73	992	6.51 X 10 ⁻⁴	6.56 x 10 ⁻⁷
45	9.71	990	5.94 X 10 ⁻⁴	6.00 x 10 ⁻⁷
50	9.69	988	5.41 X 10 ⁻⁴	5.48 x 10 ⁻⁷
55	9.67	986	4.98 X 10 ⁻⁴	5.05 x 10 ⁻⁷
60	9.65	984	4.60 X 10 ⁻⁴	4.67 x 10 ⁻⁷

Tabla C.1 Propiedades del agua en SI de unidades.

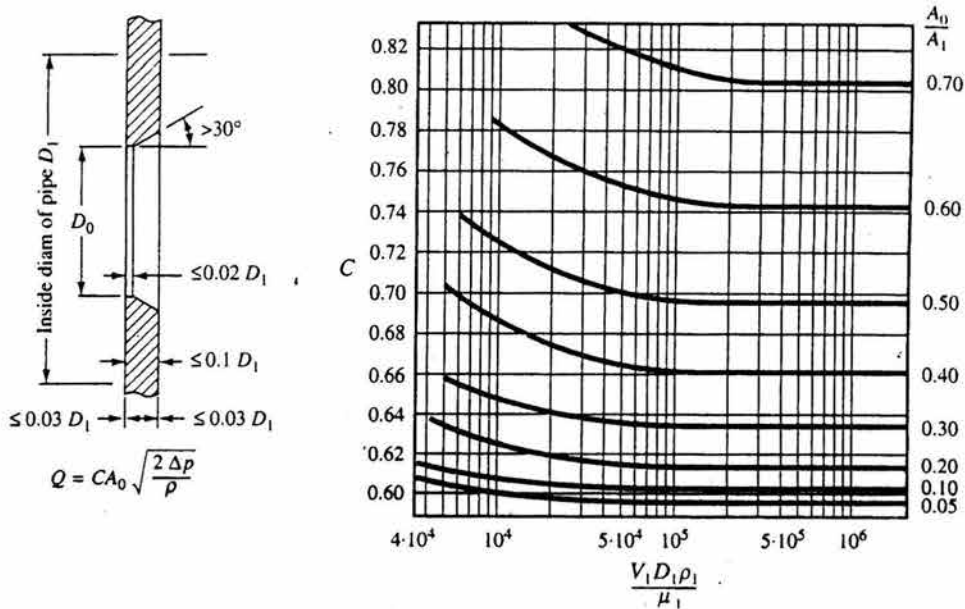
Temperatura (°C)	Densidad ρ (kg/m ³)
0	13595.2
5	13582.8
10	13570.5
15	846.41
20	845.90
25	844.87
30	844.10
35	843.33

Tabla C.2 Densidad del mercurio en SI de unidades

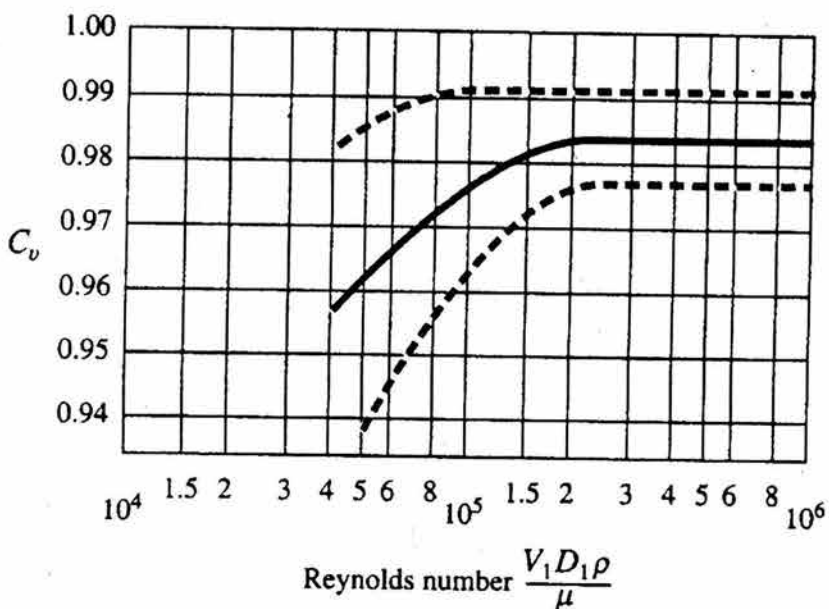
APÉNDICE D

Material	ε	
	pie	mm
Acero remachado	0.003-0.03	0.9-9.0
Hormigón	0.001-0.01	0.3-3.0
Duela de madera	0.0006-0.003	0.18-0.9
Hierro fundido	0.00085	0.26
Hierro galvanizado	0.0005	0.15
Hierro fundido revestido de asfalto	0.0004	0.12
Acero comercial o hierro forjado	0.00015	0.046
Tubería estirada	0.000005	0.0015
Vidrio, plástico	Liso	liso

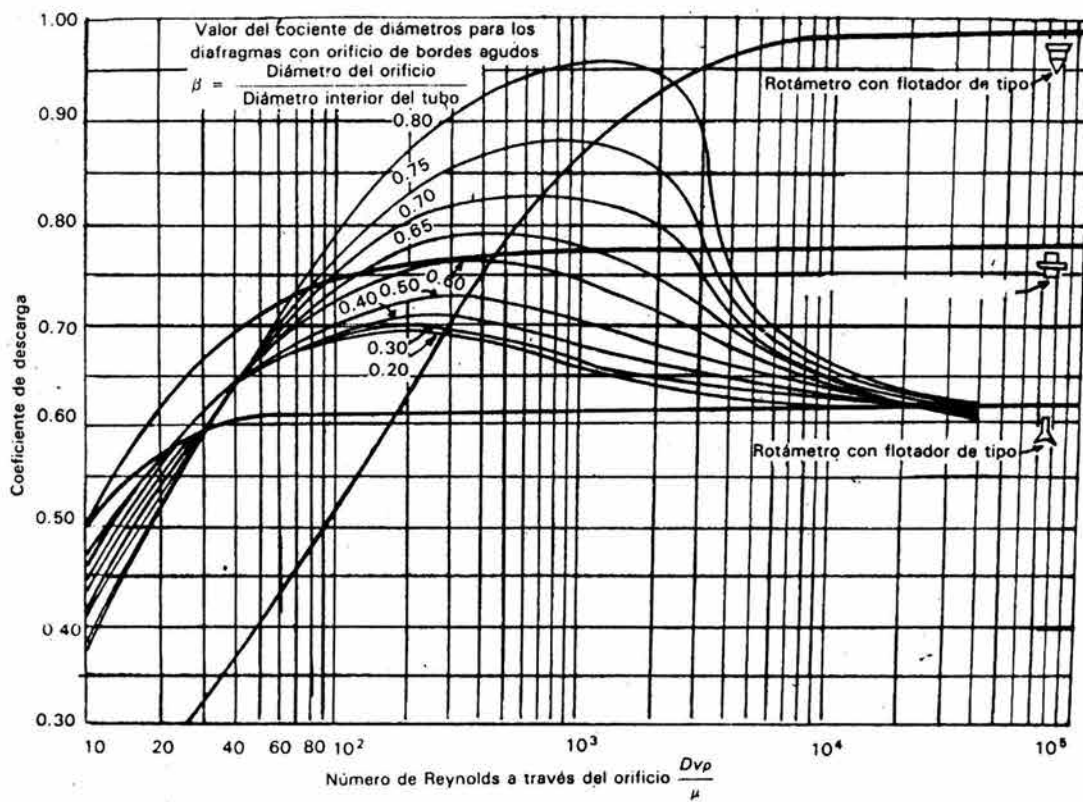
Apéndice D.1. Rugosidad absoluta de materiales para tuberías nuevas.



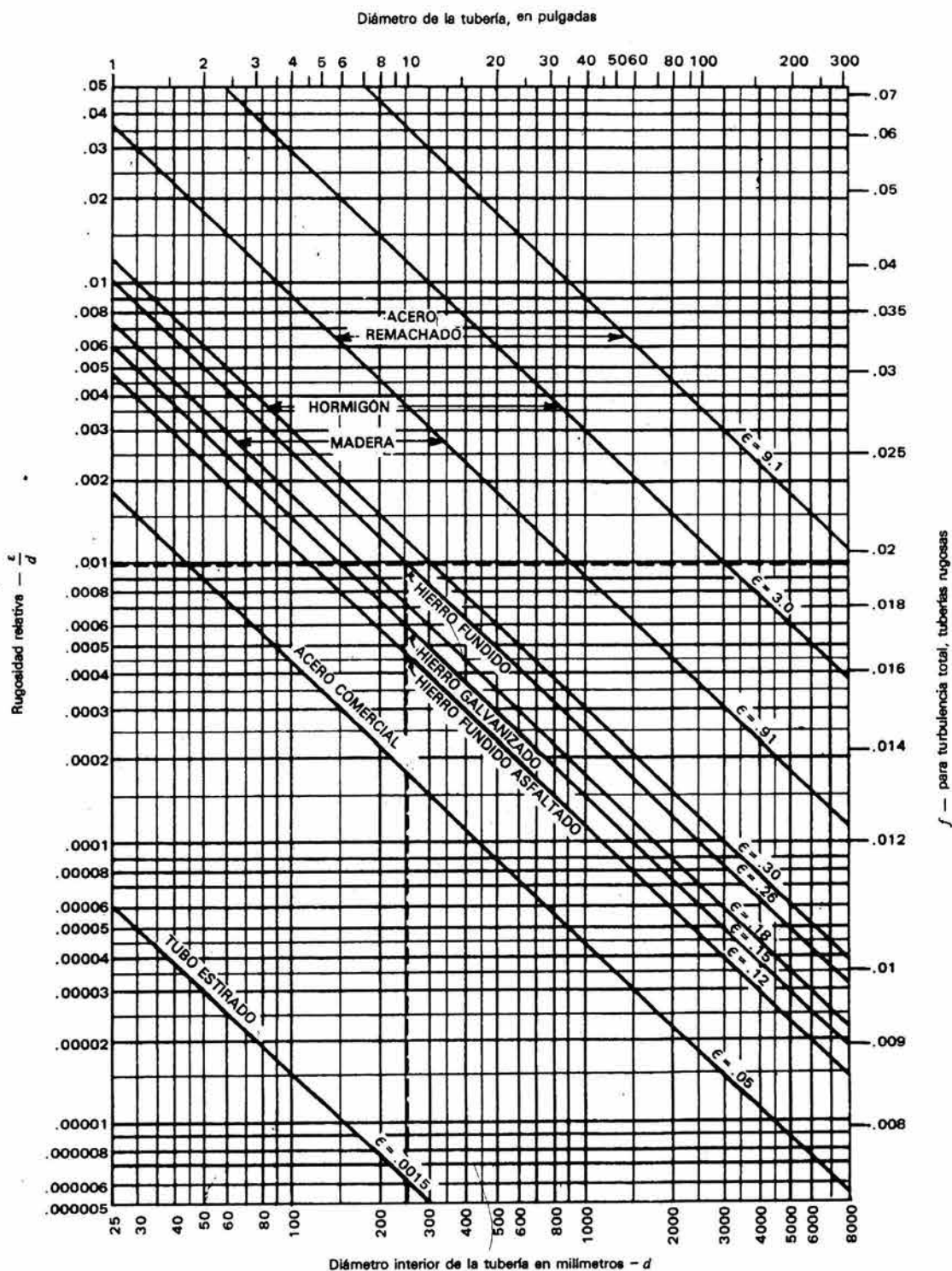
Apéndice D.2a. Coeficiente de descarga para Placa de Orificio.



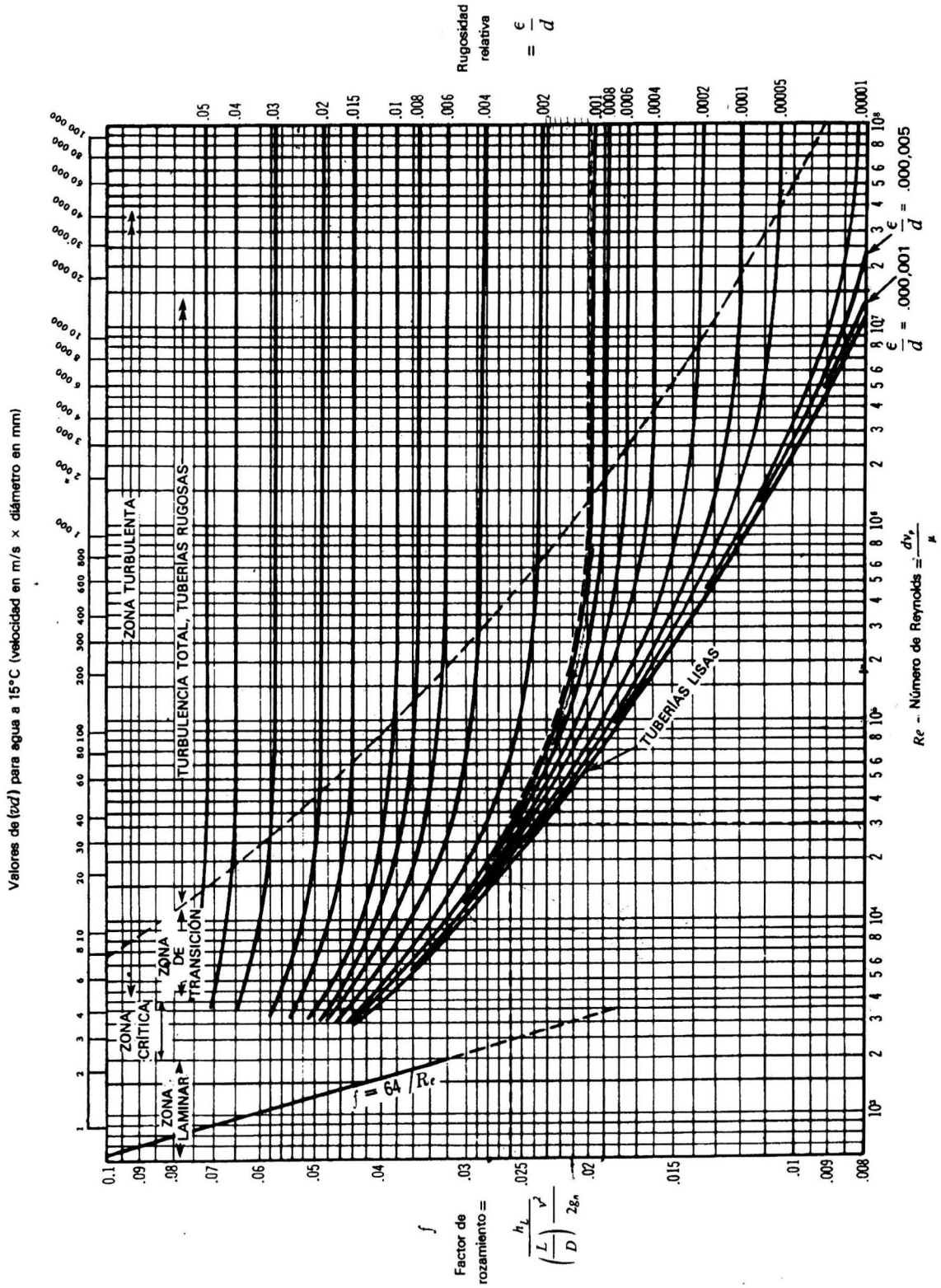
Apéndice D.2b. Coeficiente de descarga para Tubo Venturi.



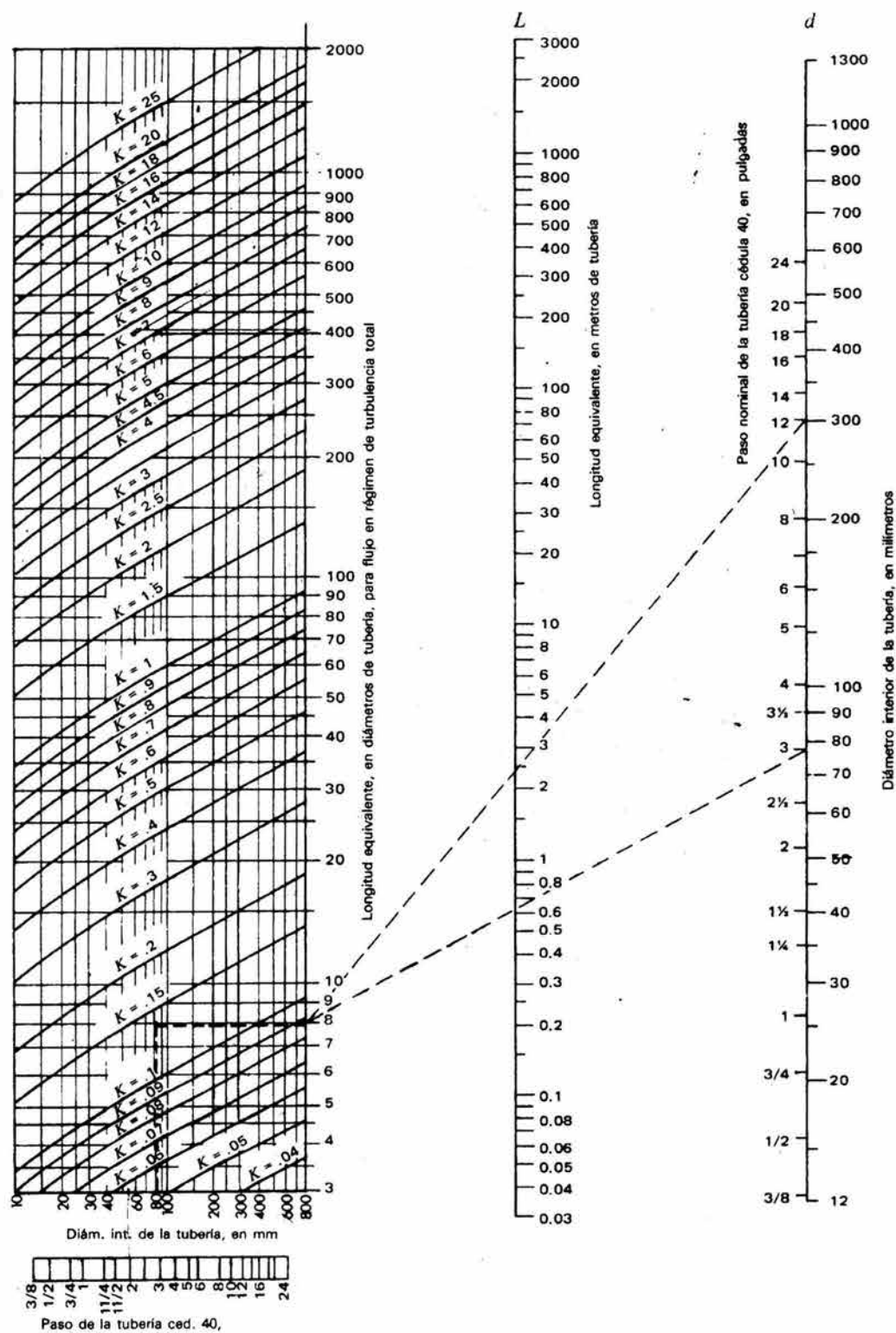
Apéndice D.2c. Coeficiente de descarga para Tubo Venturi.



Apéndice D.3. Rugosidad relativa de los materiales de tuberías y factor de fricción para flujo en régimen de turbulencia total.



Apéndice D.4. Factores de fricción para cualquier tipo de tubería comercial.



Apéndice D.5. longitudes equivalentes L y L/D , nomograma del coeficiente de resistencia K .

Descripción	Longitud equivalente en diámetros de tubo (L/D)
Válvulas de globo	
Convencional	
Sin obstrucción con asiento plano, biselado o de obturador —totalmente abierta	340
Con disco accionado con vástagos o mariposa —totalmente abierta	450
Modelo en Y	
(Sin obstrucción en asiento plano, biselado o de obturador)	
Con vástago de 60° desde la corrida de tubería —totalmente abierta	175
Con vástago de 45° desde la corrida de tubería —totalmente abierta	145
Válvulas de ángulo	
Convencional	
Sin obstrucción en el asiento plano, biselado o de obturador —totalmente abierta	145
Con disco accionado con vástagos o mariposa —totalmente abierta	200
Válvulas de compuerta	
Convencional de disco de cuña, disco doble o disco obturador	
Totalmente abierta	13
Abierta a tres cuartos	35
Abierta a la mitad	160
Abierta a un cuarto	900
Válvula para pastas o pulpas	
Totalmente abierta	17
Abierta a tres cuartos	50
Abierta a la mitad	260
Abierta a un cuarto	1200
Tubería de cañería —totalmente abierta	3 ^a
Válvulas de retención	
Oscilación convencional 0.5° —totalmente abierta	135
Oscilación de paso libre 0.5° —totalmente abierta	50
globo ascendente o paro —2.0°—totalmente abierta	Igual que de globo
Angulo ascendente o paro —2.0° —totalmente abierta	Igual que de ángulo
Bola en línea —2.5 vertical y 0.25 horizontal ^a —totalmente abierta	150
Válvulas de pie con filtro	
Con válvula de disco de tipo ascendente —0.3° —totalmente abierta	420
Con disco con articulación de piel —0.4° —totalmente abierta	75
Válvulas de mariposa (6 plg y mayores) —totalmente abierta	20
Grifos	
Flujo transversal recto	
Area rectangular del puerto del obturador igual al 100% del área del tubo —totalmente abierta	18
Tres vías	
Area rectangular del puerto del obturador igual al 80% del área del tubo (totalmente abierta)	44
Flujo transversal recto	
Flujo transversal ramificado	140

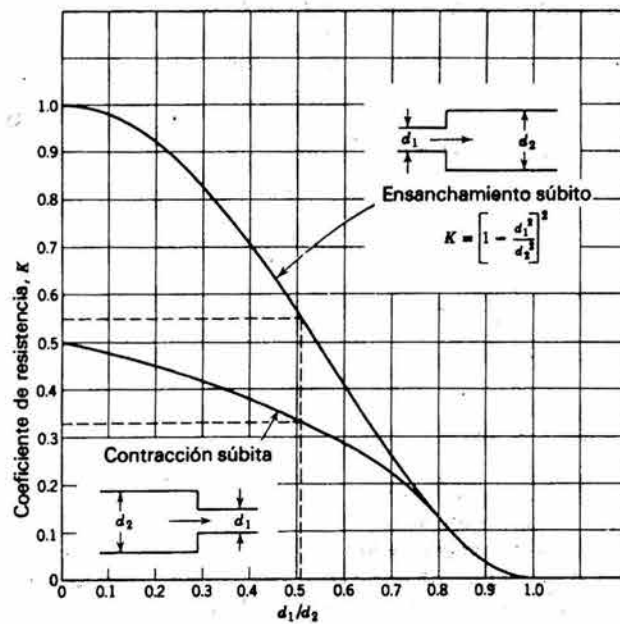
^a Longitud equivalente exactamente igual a la longitud entre las caras de las bridas o extremos soldados.

^b Caída de presión mínima calculada (lb/plg²) a través de la válvula para suministrar el flujo suficiente para elevar por completo al disco.

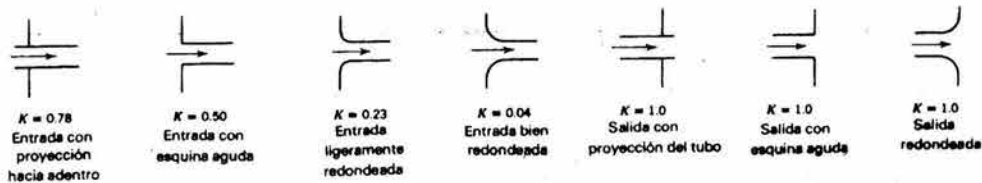
Apéndice D.6a. Longitud equivalente representativa en diámetros de tubo (L/D) de varias válvulas y accesorios.

Descripción	Longitud equivalente en diámetros de tubo (L/D)
Accesorios	
Codo convencional de 90°	30
Codo convencional de 45°	16
Codo de radio largo de 90°	20
Codo recto de 90°	50
Codo recto de 45°	26
Codo de esquina cuadrada	57
T Convencional	
Para el flujo transversal recto	20
Para el flujo transversal ramificado	60
Curva de retorno de patrón cerrado	50

Apéndice D.6a. (continuación)



Apéndice D.6b. Resistencia debida a ensanchamientos y contracciones súbitas.



Apéndice D.6c. Resistencia debida a la entrada y salida de tubos.

Espesor de la tubería según número de cédula

Medida nominal de la tubería	Diámetro exterior	Espesor	Diámetro interior	Medida nominal de la tubería	Diámetro exterior	Espesor	Diámetro interior		
								pulgadas	mm
Cédula 10	14	355.6	6.35	342.9	Cédula 80 (continuación)	3½	101.6	8.08	85.4
	16	406.4	6.35	393.7		4	114.3	8.56	97.2
	18	457.2	6.35	444.5		5	141.3	9.52	122.3
	20	508.0	6.35	495.3		6	168.3	10.97	146.4
	24	609.6	6.35	596.9		8	219.1	12.70	193.7
Cédula 20	30	762.0	7.92	746.2	10	273.0	15.09	242.8	
	8	219.1	6.35	206.4	12	323.9	17.47	289.0	
	10	273.0	6.35	260.3	14	355.6	19.05	317.5	
	12	323.9	6.35	311.2	16	406.4	21.44	363.5	
	14	355.6	7.92	339.8	18	457.2	23.82	409.6	
	16	406.4	7.92	390.6	20	508.0	26.19	455.6	
Cédula 30	18	457.2	7.92	441.4	24	609.6	30.96	547.7	
	20	508.0	9.52	489.0	Cédula 100	8	219.1	15.09	188.9
	24	609.6	9.52	590.6		10	273.0	18.26	236.5
	30	762.0	12.70	736.6		12	323.9	21.44	281.0
	8	219.1	7.04	205.0		14	355.6	23.82	308.0
	10	273.0	7.80	257.4		16	406.4	26.19	354.0
12	323.9	8.38	307.1	18		457.2	29.36	398.5	
Cédula 40	14	355.6	9.52	336.6	20	508.0	32.54	442.9	
	16	406.4	9.52	387.4	24	609.6	38.89	531.8	
	18	457.2	11.13	434.9	Cédula 120	4	114.3	11.13	92.0
	20	508.0	12.70	482.6		5	141.3	12.70	115.9
	24	609.6	14.27	581.1		6	168.3	14.27	139.8
	30	762.0	15.88	730.2		8	219.1	18.26	182.6
8	219.1	1.73	6.8	10		273.0	21.44	230.1	
10	273.0	2.24	9.2	12		323.9	25.40	273.1	
Cédula 60	12	323.9	2.31	12.5	14	355.6	27.79	300.0	
	14	355.6	2.77	15.8	16	406.4	30.96	344.5	
	16	406.4	2.87	21.0	18	457.2	34.92	387.4	
	18	457.2	3.38	26.6	20	508.0	38.10	431.8	
	20	508.0	3.56	35.1	24	609.6	46.02	517.6	
	24	609.6	3.68	40.9	Cédula 140	8	219.1	20.62	177.9
	30	762.0	3.91	52.5		10	273.0	25.40	222.2
	8	219.1	5.16	62.7		12	323.9	28.58	266.7
	10	273.0	5.49	77.9		14	355.6	31.75	292.1
	12	323.9	5.74	90.1		16	406.4	36.52	333.4
	14	355.6	6.02	102.3		18	457.2	39.69	377.8
	Cédula 80	16	406.4	6.55	128.2	20	508.0	44.45	419.1
18		457.2	7.11	154.1	24	609.6	52.39	504.8	
20		508.0	8.18	202.7	Cédula 160	½	21.3	4.78	11.7
24		609.6	9.27	254.5		¾	26.7	5.56	15.6
8		219.1	10.31	303.3		1	33.4	6.35	20.7
10		273.0	10.31	303.3		1¼	42.2	6.35	29.5
12	323.9	11.13	333.3	1½		48.3	7.14	34.0	
14	355.6	11.13	333.3	2		60.3	8.74	42.8	
Cédula 100	16	406.4	12.70	381.0		2½	73.0	9.52	54.0
	18	457.2	14.27	428.7		3	88.9	11.13	66.6
	20	508.0	15.09	477.8		4	114.3	13.49	87.3
	24	609.6	17.48	574.6		5	141.3	15.88	109.5
	8	219.1	10.31	198.5		6	168.3	18.26	131.8
	10	273.0	12.70	247.6		8	219.1	23.01	173.1
Cédula 120	12	323.9	14.27	295.4	10	273.0	28.58	215.8	
	14	355.6	15.09	325.4	12	323.9	33.34	257.2	
	16	406.4	16.64	373.1	14	355.6	35.71	284.2	
	18	457.2	19.05	419.1	16	406.4	40.49	325.4	
	20	508.0	20.62	466.8	18	457.2	45.24	366.7	
	24	609.6	24.61	560.4	20	508.0	50.01	408.0	
Cédula 140	8	219.1	2.41	5.5	24	609.6	59.54	490.5	
	10	273.0	3.02	7.7	Cédula 180	½	21.3	4.78	11.7
	12	323.9	3.20	10.7		¾	26.7	5.56	15.6
	14	355.6	3.73	13.8		1	33.4	6.35	20.7
	16	406.4	3.91	18.9		1¼	42.2	6.35	29.5
	18	457.2	4.55	24.3		1½	48.3	7.14	34.0
20	508.0	4.85	32.5	2		60.3	8.74	42.8	
Cédula 160	24	609.6	5.08	38.1	2½	73.0	9.52	54.0	
	8	219.1	5.54	49.2	3	88.9	11.13	66.6	
	10	273.0	7.01	59.0	4	114.3	13.49	87.3	
	12	323.9	7.62	73.7	5	141.3	15.88	109.5	
	14	355.6	7.62	73.7	6	168.3	18.26	131.8	
	16	406.4	7.62	73.7	8	219.1	23.01	173.1	

Apéndice D.7. Tuberías comerciales de acero.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. Streeter, Victor L., "Fluid Mechanics". 8th ed. New York: McGraw-Hill Inc., 1993.
2. Fox, Robert W., "Introducción a la mecánica de los fluidos". 2da ed. México: McGraw-Hill/ Inteamerica de México, S.A. de C.V., 1995.
3. Granet, Irving., "Fluid Mechanics". 4th ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.
4. Mott, Robert L. "Applied Fluid Mechanics". 4th ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1994.
5. Roberson, J.A. "Mecánica de Fluidos". 2^a ed., México: McGraw-Hill, 1984.
6. White, Frank M., "Mecánica de Fluidos". México: McGraw-Hill, 1983.
7. Holland, F.A., "Fluid Flow for Chemical Engineers". New York: Publishing Co., Inc., 1974.
8. Gehart, Philip M. "Fundamentos de Mecánica de Fluidos". 2^a ed., U.S.A: Addison-Wesley Iberoamericana, 1995.
9. Miller, Richard W., "Flow Measurement Engineering Handbook". New York: McGraw-Hill, 1989.
10. Foust, Alan S., "Principio de Operaciones Unitarias". 2^a ed., México: CECSA, 1998.
11. Dolenc, John W., "Choose the Right Flow Meter". Chemical Engineering. pp 22-32, January 1996.
12. Pomroy, James, "Selecting the Right Flowmeter". Chemical Engineering. pp 94-102, January 1996.
13. Swearingen, Corte, "Choosing the Best Flowmeter". Chemical Engineering. pp 62-68, July 1999.
14. Swearingen, Corte, "Choosing the Best Flowmeter". Chemical Engineering. pp 76-83, January 2001.
15. Scheer, John E., "Rotameters: Simplicity = Utility". Chemical Engineering. March 2003.
16. Benedict, Robert P., "Fundamentals of temperature, pressure and flow measurement". 3rd ed. New York: John Wiley, 1984.
17. Hardy, Jim E., "Manufacturing Processes and Systems". 9th ed. New York: John Wiley, 1997.
18. Spitzer, D.W. "Flow Measurement: Practical Guides for Measurement and Control". Instrument Society of America. 2nd ed. Research Triangle Park: ISA, 2001.
19. Bentley, John P. "Sistemas de Medición Principios y Aplicaciones". 2^a ed. México: CECSA, 1993.
20. Baker, R. C., "Flow Measurement Handbook Industrial designs, operation principles/performance and application". New York: Cambridge University, 2000.
21. ISO: "Guide to Expression of Uncertainty in Measurement" (GUM). USA: 1993.
22. W. Schmid y R. Lazos, "Guía para Estimar la Incertidumbre de la Medición", Centro Nacional de Metrología. <http://www.cenam.mx>, México, Mayo 2000.
23. Romero, Roberto A., "Flujo másico mediante placa de orificio", CENAM. Abril, 2001.
24. Zaki D. Husain, "Theoretical uncertainty of orifice flow measurement". Daniel Flow Products, Inc., 1995.
25. CENAM, Área de metrología mecánica, "Memorias del Curso de Medición de Flujo".
26. ISO 5167-1. "Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices" – Part 1. Orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full; Geneva, 1991.
27. Crane, "Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías". México: McGraw-Hill, 1992.
28. "Relación de Patrones Nacionales de Medición". Dirección General de Normas (DGN). <http://www.economia.gob.mx>.