

XV SEMINARIO Y II ENCUENTRO Nacionales de Metrología y Normalización Para la Industria y la Educación

La Metrología de Flujo de Líquidos en México

Dario Alejandro Loza Guerrero

Centro Nacional de Metrología

Km 4,5 Carretera a los Cués

Municipio del Marqués C.P 76900

Querétaro, México.

e-mail aloza@cenam.mx

Tel (4) 2 11 05 00, Fax (4) 2 11 05 00 ext 3776

RESUMEN

Uno de los tipos de material más comúnmente medidos por la industria nacional son los fluidos en este proceso medidores de todos los tipos y tamaños desempeñan un papel indispensable.

“Los medidores de flujo han sido definidos en muchos casos como las cajas registradoras de una empresa o país, si esta caja registradora está mal calibrada, afecta sin duda la equidad de la transacción de alguna de las partes interesadas, llámese comprador, vendedor o recaudador de impuestos.”

Los medidores de flujo se emplean en operaciones tan diversas, como son el control de procesos, balances de energía, distribución, emisión de contaminantes, metrología legal indicación de condición y alarma, hasta lo que probablemente es la aplicación más importante, la transferencia de custodia de fluidos como el petróleo y sus derivados.

La medición de flujo de fluidos es un proceso complejo debido a que otras magnitudes tienen una influencia determinante en el comportamiento de los medidores de flujo, en algunos casos es afectado también por instalaciones inadecuadas que producen distorsiones en el régimen de flujo, vórtices y vibración.

Es importante destacar que El Plan Nacional de desarrollo promueve abiertamente la adopción de



Fig. 1 El Patrón Nacional de Flujo de Líquidos

nuevas tecnologías que requiera el país, fomentando la creación de tecnología propia.

El sistema de medición de flujo de líquidos establecido por el Centro Nacional de Metrología que ha sido declarado como Patrón Nacional para Flujo de Líquidos por el Gobierno Federal, establece una referencia para mejorar la exactitud y dar confiabilidad a las mediciones de flujo en nuestro país.

Este artículo describe brevemente este sistema de medición, las técnicas de calibración y los procedimientos empleados en la calibración de los tipos más comunes de medidores de flujo de líquidos.

Introducción

Una de las principales metas del Gobierno Mexicano es la de incrementar la competitividad de la industria nacional a niveles internacionales, mediante el mejoramiento y control de la calidad de los productos y la modernización de la industria asumiendo como prioridad la protección y restauración del medio ambiente, promoviendo los cambios en el régimen de normalización y el establecimiento del Centro Nacional de Metrología (CENAM).

El Plan Nacional de Desarrollo contempla como parte integral de una de sus líneas estratégicas la innovación y adaptación tecnológica. Por medio de centros de investigación y tecnología avanzada, y a través de nuevas experiencias del trabajo y en formas de asociación novedosas para la producción; dedicando más recursos donde somos más eficientes, se promueve abiertamente la adopción de las tecnologías que más convengan al país, fomentando la creación de tecnología propia.

El Plan Nacional Desarrollo destaca también que en ningún momento debe de perderse de vista que el destino final de estas acciones es elevar la calidad de vida de los mexicanos, el desarrollo del país y el respeto al medio ambiente.

Sin duda, a pesar de la excelente calidad de los productos terminados producidos en México, nuestra economía y desarrollo se sustenta en nuestros recursos naturales. El petróleo es un recurso natural estratégico cuya importancia no se limita a las esferas económica y energética. Hablar del petróleo y la industria petrolera nacional es sinónimo de energía, materias primas, divisas, financiamiento, desarrollo y poder de negociación con otros países del mundo.

Problemática

La importancia del Patrón Nacional para Flujo de Líquidos puede valorarse debido a que las mediciones de flujo de fluidos son de vital importancia para industrias tales como la del petróleo, eléctrica (generación), alimentos, y bebidas, lechera, cervecera, farmacéutica, petroquímica, siderúrgica, celulosa y papel, entre otras.

En el balance energético nacional, los hidrocarburos aportan el 88,9 %¹ de la energía empleada en la actividad nacional. Cabe

¹ Balance Nacional de Energía 1996 – Publicación de la Secretaría de Energía.

mencionar que aproximadamente el 50 % de la producción de crudo satisface las exigencias de energía en el país, el restante 50 % se exporta.

El petróleo origina también industrias tales como la de productos petrolíferos (gas licuado, gasolina, diáfano, turbosina, diesel, combustóleo, grasas, lubricantes y asfalto) y la industria petroquímica para producir multitud de productos.

La necesidad de regular la comercialización del petróleo crudo y sus derivados de acuerdo a las normas internacionales² se lleva a cabo con el objeto de asegurar la equidad en el intercambio y la satisfacción entre compradores y vendedores.

En aplicaciones industriales como el control de procesos donde la medición del flujo del fluido tiene un alto impacto sobre la calidad del producto final, en los balances energéticos de plantas para evaluar su eficiencia, en la cuantificación de la emisión de contaminantes y en actividades de metrología legal que demandan la garantía de mediciones de buena exactitud ó en los sistemas de indicación o alarma, se encuentran siempre medidores de flujo de líquidos.

Aparte de los intereses comerciales de la industria del petróleo, el gobierno mexicano depende fuertemente de los ingresos petroleros vía los impuestos. En algunos casos, los impuestos son un elemento determinante en la conformación del precio de venta al público. Por ejemplo, para los combustibles automotores como la gasolina, el monto del impuesto especial a la producción y servicios (IEPS) y el impuesto al valor agregado (IVA) entre otros, representa aproximadamente más del 50% del precio pagado en una estación de servicio por los consumidores.

Todos los sistemas de medición utilizados para cuestiones fiscales o comerciales, deben de ajustarse a normas internacionales aceptadas por los organismos gubernamentales. Las normas de medición de flujo de fluidos han sido desarrolladas a través de muchos años y la revisión para introducir nuevas tecnologías es un proceso rígido y lento.

² Estas normas incluyen las recomendaciones de La Organización Internacional de Metrología Legal el "Manual of Petroleum Measurement Standards" publicado por el "American Petroleum Institute" (API), los reportes y normas del "American Gas association" (AGA), entre otras.

Por ejemplo, La OIML R 117³ considera a los siguientes elementos como indispensables en la constitución de un sistema de medición:

- elemento primario (sensor de flujo)
- elemento secundario
- punto de transferencia
- circuito hidráulico (incluye prueba del medidor en sitio)
- dispositivo de eliminación de gases
- filtro
- elemento de impulsión (bomba o sistema elevado)
- dispositivos de regulación de flujo
- elementos auxiliares

Los límites de aplicación de un sistema de medición están dados por las características de funcionamiento que deben observarse durante la operación de un sistema:

- cantidad mínima por medir,
- alcance de la medición,
- la presión máxima y la presión mínima de trabajo,
- propiedades del fluido,
- temperatura máxima y mínima de trabajo, y
- los niveles de seguridad requeridos.

Errores máximos permisibles

La tabla 1 muestra las clases de exactitud tomando en consideración la aplicación del sistema de medición y las divide en cinco clases.

En la tabla 2 la línea A muestra los errores máximos permisibles aplicables a sistemas de medición completos, para todos los líquidos, todas las temperaturas y las presiones de los líquidos y los flujos a los que se utilizará el sistema sin llevar a cabo ningún ajuste durante las pruebas (referirse a OIML R 117).

La Tabla 2 línea B muestra los errores máximos permisibles aplicables en una aprobación de modelo y/o verificación inicial del medidor de flujo (referirse a OIML R 117).

Tabla 1. Clases de Exactitud según OIML R 117

Clase	Campo de aplicación
-------	---------------------

³ OIML (Organización Internacional de Metrología Legal). La recomendación OIML R 117 "Measuring systems other than water"

0,3	Sistemas de medición instalados en tuberías
0,5	Bombas de despacho de gasolina Sistemas de medición instalados en auto-tanques Sistemas de medición para leche Sistema de medición para buque tanques.
1,0	Sistemas de medición para gases licuados (diferentes a los gases licuados de petróleo, LPG), sujetos a presión y a temperaturas mayores que -10 °C Sistemas de medición de LPG para carga de vehículos Sistemas de medición clasificados como clase 0,3 ó 0,5 bajo las siguientes condiciones: Con temperaturas menores que -10 °C ó mayores que 50 °C Con fluidos cuya viscosidad dinámica sea mayor que 1 000 mPas Con flujo menor que 20 L/h
1,5	Sistemas de medición para dióxido de carbono licuado Sistemas de medición para gases licuados (diferentes a los gases licuados de petróleo, LPG), sujetos a presión y a temperaturas menores que - 10 °C
2,5	Sistemas de medición para líquidos criogénicos

Tabla 2. Errores máximos permisibles de acuerdo a la clase de exactitud según OIML R 117.

Clases según la exactitud					
	0,3	0,5	1,0	1,5	2,5
A	± 0,3 %	± 0,5 %	± 1,0 %	± 1,5 %	± 2,5 %
B	± 0,2 %	± 0,3 %	± 0,6 %	± 1,0 %	± 1,5 %

La medición de flujo es compleja debido a que es afectada por diferentes factores de influencia como:

- temperatura,
- presión,
- densidad
- viscosidad,
- estabilidad del flujo,

- condiciones de instalación,
- distorsión del perfil de velocidades, y
- vórtices.

Patrón Nacional Para Flujo de Líquidos

Aplicación

Los sistemas de medición de flujo referidos al patrón nacional se emplean en las siguientes aplicaciones:

- transferencia de custodia de fluidos valiosos,
- control de procesos,
- balances energéticos,
- emisión de contaminantes,
- metrología legal (hidrocarburos refinados, gas LP y natural y agua potable).

Por ejemplo, en cada etapa de transferencia cada barril⁴ de producto tiene que ser contabilizado correctamente, entre los organismos subsidiarios de Pemex (-Exploración y Producción - Refinación - Gas y Petroquímica Básica - Petroquímica y Pemex Internacional)- las transnacionales, las estaciones de servicio y el consumidor. Los medidores de flujo desempeñan un papel indispensable en cada operación de este proceso, como lo es el control, la indicación de condición ó alarma, etc., hasta lo que probablemente es la aplicación más importante, la transferencia de custodia⁵ del fluido, utilizándose para ello todo tipo y tamaño de medidores de flujo.

Todos los sistemas de medición utilizados para cuestiones fiscales o comerciales, deben de ajustarse a las normas nacionales e internacionales aceptadas por los organismos gubernamentales. Las normas de medición de flujo de fluidos han sido desarrolladas a través de muchos años y la revisión para introducir cambios y nuevas tecnologías es un proceso lento por la gran confiabilidad que deben tener las mediciones.

La selección de un medidor de flujo tanto para la transferencia de custodia de productos líquidos

⁴ 1 barril = 158,9873 litros. 1 barril de petróleo crudo = 141,6 m³ de gas natural (equivalencia de energía).

⁵ La medición de transferencia de custodia de fluidos es el tipo de medición que esta asociado con la compra, venta y pago de impuestos de un producto determinado. El propósito de la medición de transferencia de custodia de fluidos es llevar a cabo mediciones con un error sistemático igual a cero y un error aleatorio mínimo.

del petróleo como para otras aplicaciones industriales se lleva a cabo entre una gran diversidad de medidores de flujo.

Por ejemplo, los medidores de flujo tipo turbina y los medidores de desplazamiento positivo para la determinación del volumen. El comportamiento de estos medidores es afectado por factores de influencia como: temperatura, presión, densidad, viscosidad, por el régimen de flujo y por las condiciones de instalación. Los medidores de flujo másico sólo recientemente han iniciado su proceso de aceptación.

Las mediciones de flujo que no satisfacen la exactitud⁶ requerida son el resultado de:

- una selección inadecuada del medidor,
- desconocimiento de las condiciones de operación,
- una incorrecta instalación de los medidores,
- una calibración⁷ inadecuada, y
- un mantenimiento inadecuado.

Es muy importante distinguir entre los errores aleatorios, aquellos que poseen un valor esperado cercano a cero, y los de tipo sistemático⁸, que se requieren eliminar por medio

⁶ Concepto cualitativo que expresa la proximidad de concordancia entre el resultado de una medición y el valor verdadero del mensurando.

⁷ Proceso para establecer bajo condiciones específicas, la desviación (error) de los valores de un instrumento y los valores correspondientes de un patrón conocido. Las razones para la calibración de un medidor de flujo son: 1. Establecer trazabilidad hacia los patrones nacionales, 2. Formar parte de los programas de aseguramiento de las mediciones, 3. Resolver disputas, 4. Comprobar las especificaciones del fabricante, 5. Detectar efectos en las condiciones de instalación, 6. Mejorar las especificaciones no calibradas, 7. Detectar condiciones de cambio del medidor con respecto al tiempo y 8. Certificación (procedimiento que asegura que un producto, proceso, sistema o servicio se ajusta a las normas de organismos de normalización, nacionales o extranjeros).

⁸ No deben confundirse los términos "error" e "incertidumbre" ya que sus significados son completamente diferentes. La incertidumbre de una medición es un parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando, es decir, es el intervalo dentro del cual se espera se encuentre el valor verdadero de la magnitud medida.

100 L/min ± 1 L/min con un nivel de confianza aproximado del 95 %

de un factor de corrección que compense el efecto, por lo que después de dicha corrección el error sistemático debe ser igual a cero.

Técnicas de calibración

Las técnicas de calibración de los sistemas de medición de flujo de líquidos pueden clasificarse en:

- gravimétricas
 1. sistemas dinámicos de pesado, y
 2. sistemas estáticos de pesado.
- volumétricas

Las técnicas de calibración en sitio nos permiten calibrar los sistemas de medición bajo las condiciones de instalación y operación del sistema empleando patrones de referencia:

- medidores maestros
- patrones volumétricos
- probadores de desplazamiento positivo

La frecuencia de calibración es responsabilidad del usuario del sistema de medición. Los periodos de calibración se establecen sobre la base de los requerimientos contractuales, al tipo de aplicación, a las condiciones de operación y a la experiencia sobre el historial del comportamiento del sistema de medición.

Principio de funcionamiento

El patrón nacional para flujo de líquidos se fundamenta en el pesado estático de la masa colectada de líquido. La cantidad de líquido colectada por unidad de tiempo es determinada gravimétricamente para definir el flujo másico. El flujo volumétrico que pasa a través de un área de sección transversal en un intervalo de tiempo definido se determina mediante la densidad del líquido.

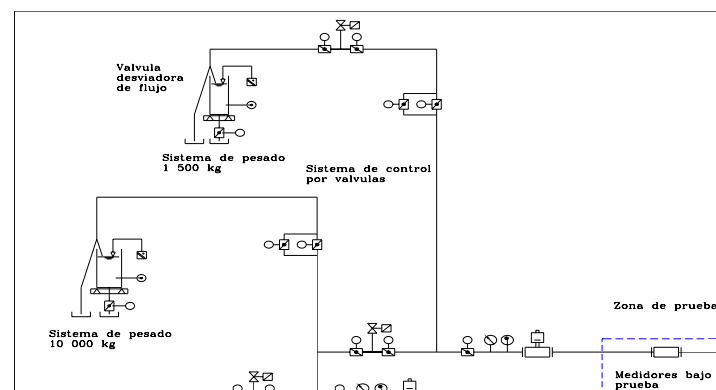
Donde: 100 L/min; es el valor más probable, 1 L/min; estimación de la duda sobre el valor más probable y un nivel de confianza aproximado del 95 %.

El nivel de confianza expresa en este caso que cada 95 de 100 mediciones del valor verdadero del flujo están entre 99 L/min y 101 L/min. Son fuentes de incertidumbre: ¿Quién?, ¿Cómo?, ¿Cuándo? y ¿Con qué? se realiza una medición.

El error es la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero de una magnitud. Es un valor que nunca puede ser conocido pero se estima basado en la experiencia y el análisis estadístico. Puede entonces cuantificarse y corregir el resultado de una medición.

Características del Patrón Nacional de Flujo de Líquidos:

- La incertidumbre relativa del sistema es $\pm 0,05\%$ para flujo másico y $\pm 0,1 \%$ para flujo volumétrico con un nivel de confianza aproximado del 95%.
- El patrón nacional para flujo de líquidos cubre un alcance de 40 L/min a 12 000 L/min.
- Líquido de trabajo: agua.
- Alcance de presión de trabajo de 0,16 MPa a 1 MPa.
- Material en contacto con el fluido: acero inoxidable para evitar la corrosión.
- El patrón está constituido por los siguientes subsistemas:
 1. Sistema de bombeo formado por dos bombas verticales tipo turbina de 260 kW y 45 kW que son controladas por un variador de frecuencia que permite obtener los flujos deseados a la máxima eficiencia de las bombas.
 2. Secciones de prueba de 41 m de largo con el objeto de lograr flujos turbulentos completamente desarrollados, con tamaños de tubería desde 25 mm hasta 200 mm.
 3. Un sistema de medición de flujo constituido por dos tanques de pesado montados sobre celdas de carga con capacidad de 1 500 kg y 10 000 kg.
 4. Sistema de conducción de flujo formado por el múltiple de descarga, by-pass, amortiguador de pulsaciones, sistema de control de flujo, toberas de descarga y válvulas desviadoras de flujo.
 5. Sistema de referencia formado por medidores de flujo tipo turbina y electromagnéticos.
 6. Sistema de medición de la presión y temperatura del flujo, así como la determinación de las condiciones ambientales.
 7. Sistema de adquisición de datos, monitoreo y control completamente automatizado.
 8. Sistema para la caracterización del perfil de velocidades en la zona de pruebas formado por tubos Pitot y medidores de presión diferencial.



Trazabilidad

El Patrón Nacional para Flujo de Líquidos mantiene su trazabilidad⁹ hacia los patrones nacionales de las magnitudes de masa, tiempo y temperatura y hacia los patrones nacionales en las magnitudes derivadas de densidad y presión mantenidos por el CENAM.

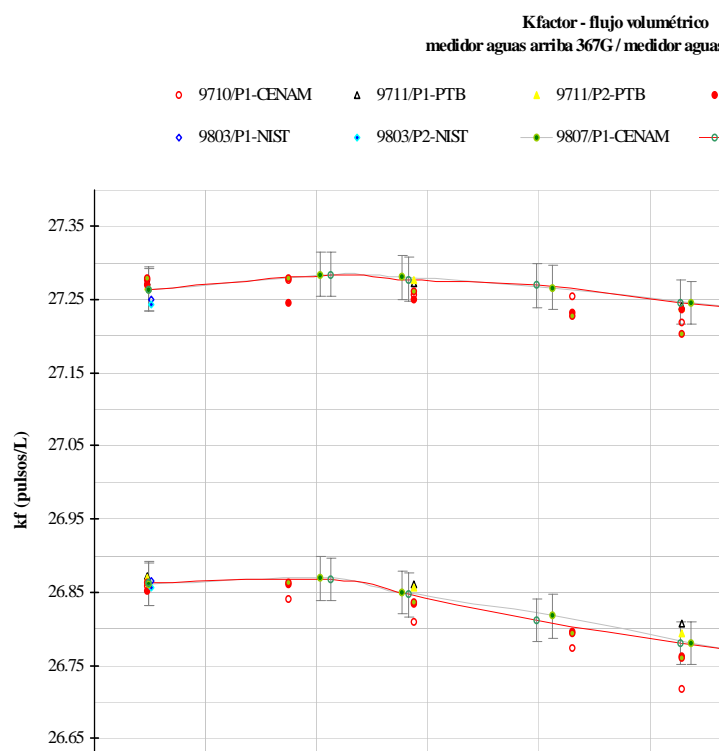
Se tiene también, un programa de comparaciones con los laboratorios nacionales de otros países. El objetivo de este programa de aseguramiento de las mediciones de flujo de líquidos es comparar procedimientos, cálculos, desviaciones e incertidumbre entre los laboratorios participantes con el propósito de establecer mejoras en los mismos.

⁹ Trazabilidad: Propiedad del resultado de una medición o del valor de un patrón mediante el cual puede ser relacionado a referencias establecidas, normalmente patrones nacionales o internacionales, mediante una cadena ininterrumpida de comparaciones donde todas tienen incertidumbres determinadas.

Los buenos resultados obtenidos en estas comparaciones internacionales permiten afirmar que el Patrón Nacional para Flujo de Líquidos ofrece la confiabilidad necesaria para dar coherencia a las mediciones de flujo de líquidos en nuestro país.

Este sistema de medición permite respaldar una parte de los requerimientos de calibración de la industria mexicana y representa la infraestructura que facilita el desarrollo, investigación, pruebas especiales y la obtención de información para diseñar sistemas de medición similares que utilicen hidrocarburos refinados como líquidos de trabajo y con esto mejorar las incertidumbres de medición actuales.

El Patrón Nacional para Flujo de Líquidos le ha permitido a la industria fabricante de medidores a través de la aprobación de modelo, la aplicación confiable de nuevas tecnologías de medición de flujo.



Es muy importante distinguir entre los errores aleatorios, cuyo balance final está fuera de cero, es decir, aquellos que poseen un valor esperado cercano a cero y los de tipo sistemático¹⁰, que se requieren eliminar por medio de un factor de corrección que compense su efecto, por lo que después de dicha corrección el error sistemático debe ser igual a cero.

Comunmente sólo dos tipos de medidores de flujo pueden emplearse para custodia en la transferencia de petróleo crudo: medidores de desplazamiento positivo y medidores de flujo tipo turbina. Ambos han probado su confiabilidad en este tipo de mediciones y cumplen con los requisitos de repetibilidad¹¹ especificados entre $\pm 0,02\%$ sobre 5 mediciones a un flujo determinado. La selección de cualquiera de los tipos se basa en las propiedades del fluido, en particular la viscosidad y el flujo. Generalmente los medidores de flujo tipo turbina son preferidos debido a que son más pequeños, menos pesados y de menor costo que los medidores de flujo de desplazamiento positivo. Sin embargo sus características de linealidad se deterioran a altas viscosidades del fluido. Por arriba de 20 centistokes ($100 \text{ cSt} = 0,0001 \text{ m}^2/\text{s}$) en las condiciones de flujo en la tubería, se emplean medidores de flujo de desplazamiento positivo. Las especificaciones de un medidor de flujo para esta aplicación son: linealidad¹² en la calibración de $\pm 0,15\%$ en un intervalo de flujo del 10% al 100% (5:1) para viscosidades de fluido entre 1 y 5 cSt. Normalmente se instalan sistemas de medición de n+1 medidores para cubrir todo el intervalo de producción. Los medidores de flujo tipo turbina requieren de acondicionadores de

¹¹ La 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 condiciones 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 período corto.

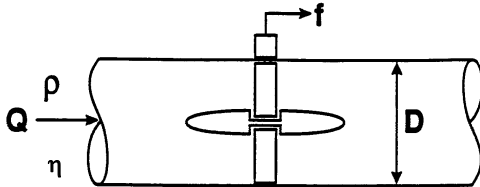
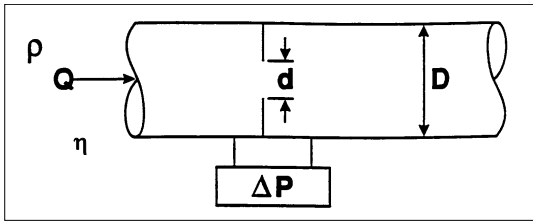
¹²La linealidad es un caso específico de conformidad, donde la curva dada es una línea recta. Es la constancia del factor o coeficiente un medidor de flujo en un intervalo determinado de flujo o número de Reynolds. Esta constancia es cuantificada por una banda especificada por el límite inferior y superior del factor del medidor sobre un intervalo especificado.

flujo aguas arriba. Para obtener mejores resultados, las diferencias en los balances de masa entre las entradas y salidas de la refinería están comprendidas en las pérdidas reales y las aparentes.

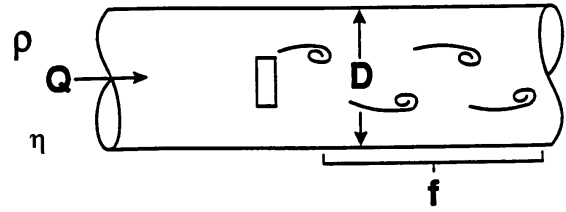
Las pérdidas reales se deben a factores tales como fugas, evaporación, derrames, sustracciones ilícitas, y procesos ineficientes. **pérdidas aparentes** se deben a errores de medición.

Realizando mediciones que posean trazabilidad y confiabilidad se reducirán las pérdidas aparentes y se podrá concentrar la atención en mejorar la eficiencia de los procesos donde las pérdidas reales se incrementan.

Por lo anteriormente expuesto, los medidores de flujo juegan un papel esencial en el balance de masa y pérdidas en los procesos de control de una planta y en la calidad de un producto.



En conclusión, la incertidumbre exigida a los sistemas de medición de flujo empleados en la custodia en la transferencia de petróleo es muy alta, aproximadamente $\pm 0,15\%$. En pocas palabras, mediciones confiables son alcanzadas siempre y cuando los sistemas sean **calibrados**



periódicamente, que se tengan **procedimientos de medición y operación** y que estas mediciones posean **trazabilidad** hacia los patrones nacionales y sean aceptables por todas las partes involucradas, más que el empleo de otros tipos de medidores de flujo.

Referencias

- [1] Patrones Nacionales de Medición, abril 1999. Publicación CENAM.
- [2] Requerimientos de Medición de Flujo en la Industria Petrolera Mexicana. H. Luchsinger, R. Arias, J.M. Maldonado, A. Loza - División de Flujo y Volumen - CENAM.
- [3] Las Desventuras de un Recurso no Renovable: El [4] Petróleo. V. Rodríguez - Padilla -Ciencias No. 38 1995 Revista de Difusión - Facultad de Ciencias - UNAM.
- [5] Vocabulario Internacional de Términos Fundamentales y Generales de Metrología, Publicación Técnica CNM-MMM-PT-001 - Pezet, F., Mendoza, J.- CENAM, 1996.
- [6] Memoria de Labores 1993 -- PEMEX, 1994.
- [7] Methods of specifying flowmeter performance -- ISO, 1993.
- [8] Devices for Flow Measurement and Control -- ASME, 1993.
- [9] Flowmetering in the oil industry - Gold, R. -- Measurement and Control Magazine.