



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE INGENIERIA EN CIENCIAS DE LA TIERRA.

"MEDICION DE HIDROCARBUROS CON ULTRASONIDO"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

SERGIO ALMODOVAR VILLADA



ASESOR: M.I. NOEL E. SANTAMARIA GUEVARA.

MEXICO, D. F.

2004



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.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-1386

SR. SERGIO ALMODÓVAR VILLADA

Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. I. Noel Santamaría Guevara y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

MEDICIÓN DE HIDROCARBUROS CON ULTRASONIDO

- I INTRODUCCIÓN**
 - II TEORÍA DEL ULTRASONIDO**
 - III MEDIDORES ULTRASÓNICOS**
 - IV RECOMENDACIONES API PARA MEDIDORES ULTRASÓNICOS DE MULTITRAYECTORIA**
 - V APLICACIONES Y EVALUACIÓN DE LOS MEDIDORES ULTRASÓNICOS**
 - VI PROGRAMA DE CÓMPUTO PARA SELECCIÓN DE MEDIDOR ULTRASÓNICO**
 - VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- NOMENCLATURA**
REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Cd. Universitaria, D.F., a 7 de noviembre de 2002

EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*RLLR*gtg



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA TIERRA

TESIS:

“MEDICIÓN DE HIDROCARBUROS CON ULTRASONIDO”

PRESENTADA POR:

ALMODÓVAR VILLADA SERGIO

DIRIGIDA POR:

M.en I. NOEL E. SANTAMARÍA GUEVARA

JURADO PARA EXAMEN PROFESIONAL

PRESIDENTE: M.I. JOSÉ ANGEL GÓMEZ CABRERA

VOCAL: M.I. NOEL E. SANTAMARÍA GUEVARA

SECRETARIO: ING. CARLOS JAVIER LIRA SIL

1ER. SUPLENTE DR. VICTOR HUGO ARANA ORTÍZ

2DO. SUPLENTE ING. MARTIN CARLOS VELÁZQUEZ FRANCO



Handwritten signatures of the jury members over horizontal lines.

AGRADECIMIENTOS.

Quiero agradecer
a mis maestros y
profesores
su importante asesoría
para la realización de
este trabajo.

A mis padres y hermanos
por su apoyo incondicional en
los momentos más difíciles.

A mi esposa Aída por lo que
significa en mi vida.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE Sergio Almodovar
Villata

FECHA: 16 Febrero 2004

FIRMA: 

Dedico este trabajo a mi hijo
Sergio Ibrahim.

Pero sobre todo, estoy
agradecido con mi *alma mater*
por permitirme ser parte de ella.

A *Dios* gracias.

CONTENIDO.

	Pág.
1. Introducción.	1
2. Teoría del ultrasonido.	3
2.1 Ondas.	3
2.2 Oscilaciones organizadas.	3
2.3 Movimiento transversal y longitudinal.	4
2.4 Ondas audibles, ultrasónicas e infrasónicas.	6
2.4.1 Velocidades supersónicas.	9
2.5 Aplicaciones del ultrasonido.	10
2.5.1 Aplicaciones marítimas.	10
2.5.2 Aplicación a la limpieza o aseo.	10
2.5.3 Perforación ultrasónica en el maquinado.	11
2.5.4 Detección de fallas en metales.	11
2.5.5 Aplicaciones en medicina.	12
2.5.6 Aplicaciones en el área de geofísica.	13
2.5.7 Aplicaciones en la medición de hidrocarburos.	14
3. Medidores ultrasónicos.	15
3.1 Principio de la medición ultrasónica.	15
3.2 Configuraciones de los medidores ultrasónicos.	26
3.3 Calibración de un medidor ultrasónico.	28
3.4 Tipos y características de los medidores ultrasónicos para líquido.	29
3.5 Tipos y características de los medidores ultrasónicos para gas.	34
3.6 Condiciones de operación.	43
3.7 Conectores del transductor ultrasónico.	45
3.8 Requerimientos del medidor.	46
3.9 Marcación "nameplate" del medidor.	47
4. Recomendaciones AGA para los medidores ultrasónicos de multitrayectoria. Reporte AGA No. 9	48
4.1 Alcance.	48
4.2 Principio de medición.	49
4.3 Condiciones de operación.	49
4.3.1 Calidad del gas.	49
4.3.2 Presiones.	50
4.3.3 Temperatura del gas y del ambiente.	50
4.3.4 Consideraciones al flujo de gas.	51
4.3.5 Tuberías corriente arriba y perfil de flujo.	51

4.4	Requerimientos del medidor.	51
4.4.1	Cuerpo del medidor.	51
4.4.2	Transductores ultrasónicos.	52
4.4.3	Dispositivos electrónicos.	52
4.4.4	Requerimientos de operación.	53
4.4.5	Pruebas.	53
4.4.6	Pruebas de fuga.	54
4.4.7	Prueba de "cero flujo".	54
4.4.8	Instalación.	55
4.4.9	Consideraciones ambientales.	55
4.4.10	Configuración de la tubería.	55
4.4.11	Cálculo del gasto de gas.	56
4.4.12	Mantenimiento.	57
4.4.13	Pruebas de verificación de campo.	57
5.	Aplicaciones y evaluación de los medidores ultrasónicos.	58
5.1	Aplicaciones a la detección de fallas de líquido.	58
5.2	Aplicaciones a la medición de líquido.	67
5.3	Aplicaciones a la medición de gas.	67
5.4	Evolución de los medidores ultrasónicos.	73
5.5	Ventajas y evaluación de los medidores ultrasónicos.	77
5.6	Comparación de los medidores de flujo.	79
6.	Programa de Cómputo para la Selección de un Medidor Ultrasónico.	81
7.	Conclusiones y recomendaciones.	102
	Nomenclatura y terminología.	104
	Referencias.	106

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN.

En la industria petrolera, es de vital importancia hacer con precisión la medición de fluidos obtenidos de los pozos petroleros, ya que de ella dependen, se puede decir, todas las operaciones que se ejecutan para la explotación racional de los yacimientos, además de que también sirve de base para la interpretación y control de los mismos. Esta es una razón completamente técnica.

Desde que los hidrocarburos se volvieron una mercancía cara, surgió otra razón económica para hacer de la medición de los hidrocarburos una actividad precisa. Se pueden usar diferentes tipos de instrumentos para medir los fluidos producidos. Sin embargo en este trabajo se tratará solo la **medición ultrasónica** por sus grandes ventajas con respecto a los sistemas tradicionales de medición.

Un medidor de gasto es un dispositivo que permite obtener generalmente por medio de una sola medición, el volumen por unidad de tiempo que pasa a través de una determinada sección transversal.

Los medidores ultrasónicos de multitrayectoria son medidores que derivan el flujo de los hidrocarburos por medición del tiempo de tránsito y los pulsos del sonido a alta frecuencia. Los tiempos de tránsito son medidos por pulsos de sonido viajando diametralmente a través de la tubería, corriente abajo y luego corriente arriba a contraflujo. La diferencia en estos dos tiempos de tránsito se relaciona con la velocidad promedio del flujo de hidrocarburos a lo largo de las trayectorias acústicas. En el cálculo numérico se usan computadoras que transforman, mediante un software específico, las señales recibidas en gasto.

Los medidores ultrasónicos de multitrayectoria tienen como mínimo dos pares independientes de transductores de medición, conocidos también como trayectorias acústicas.

La precisión de un medidor ultrasónico depende de varios factores, tales como la geometría del cuerpo del medidor, de la ubicación de los transductores ultrasónicos, de la técnica de integración inherente en el diseño del medidor, del perfil del flujo, de niveles de pulsación en la corriente y la uniformidad de la corriente; además de la precisión en la medición del tiempo de tránsito, que a su vez, entre otras cosas, depende de la estabilidad del reloj electrónico.

Las tecnologías de medición de flujo han evolucionado rápidamente en las últimas décadas. Algunas han permanecido en el mercado, otras han decaído con el transcurrir del tiempo, y otras nunca llegaron a desarrollarse comercialmente. Los fenómenos físicos descubiertos hace más de 100 años han sido el punto de partida para el diseño de muchos medidores de flujo.

En los últimos años, los desarrollos técnicos en otros campos como la óptica, acústica y electromagnetismo, han dado como resultado no solo la mejoría del diseño de los sensores, ya que además han contribuido al desarrollo de nuevos conceptos aplicables a la medición de flujo.

La selección de un medidor requiere de una comprensión completa de la tecnología de los medidores, además de un conocimiento práctico del proceso y del fluido a medir. La dificultad de traducir estas dos facetas de la medición de flujo en una aplicación práctica es un reto aún para los ingenieros experimentados.

Los objetivos de este trabajo son: presentar una revisión de la teoría de los medidores ultrasónicos y su utilización en la cuantificación de gastos de un fluido sujeto a medición; incluir las recomendaciones de la American Gas Association AGA respecto al diseño, uso y aplicación de los medidores ultrasónicos multirayectoria en la medición de gas natural; presentar los resultados obtenidos de pruebas de laboratorio y sus evaluaciones en campo; y finalmente mostrar el desarrollo de un programa de cómputo que permite seleccionar de manera rápida y confiable un medidor ultrasónico comercial, para una aplicación determinada.

CAPÍTULO 2

TEORÍA DEL ULTRASONIDO.

2.1 ONDAS.

Las ondas nos rodean. Las podemos ver en la playa o en la superficie del océano, por medio de las ondas luminosas. La música se puede originar como ondas en las cuerdas de un piano, viajar como ondas de corriente eléctrica en un sistema estereofónico, formar ondas en el cono de una bocina, y llegar a nuestros oídos como ondas sonoras en el aire; éstas a su vez, forman ondas en nuestros tímpanos y son conducidas a nuestro cerebro en forma de ondas de pulsos eléctricos. Pueden ser ondas viajeras, que se mueven en alguna dirección, como las del océano que se mueven hacia la playa. Pueden ser estacionarias, como las de una cuerda de guitarra. Pueden estar en sistemas unidimensionales, como las de un resorte, en dos dimensiones, como en la superficie de un estanque, o en tres dimensiones, como en el aire que nos rodea. Las ondas viajeras tienen una velocidad definida y el tipo más simple se caracteriza por su frecuencia y longitud de onda.

2.2 OSCILACIONES ORGANIZADAS.

Una cuerda de guitarra bajo tensión puede oscilar, o vibrar, de un modo organizado, cuando se tira de ella hacia un lado y se suelta. Los átomos que forman la cuerda de la guitarra están enlazados entre sí mediante fuerzas interatómicas. Si no están perturbados, los átomos están en posiciones de equilibrio y estables y la cuerda entera está en equilibrio. Cuando se "rasga" la cuerda, un grupo de átomos se desplaza respecto a su posición de equilibrio. Como las fuerzas interatómicas enlazan a estos átomos con sus vecinos, este desplazamiento, a su vez, originará un desplazamiento del grupo vecino de átomos, y así sucesivamente, de modo que la perturbación se propagará por la cuerda. Toda ella estará distorsionada o deformada. Cuando se suelta la cuerda, la primera parte que se desplazó se regresa al equilibrio, tirando de otras partes de la cuerda, también de regreso. Como los desplazamientos pequeños con respecto al equilibrio están asociados con fuerzas semejantes a las de resortes, la cuerda de guitarra en movimiento pasará su posición de equilibrio y regresará a él. Nuevamente es la cuerda completa la que se mueve, y de modo organizado, para formar lo que llamamos **ondas**. Es importante hacer notar que cuando se habla de movimiento ondulatorio, se refiere a un tipo de movimiento bastante distinto de los que se han descrito hasta ahora. En el movimiento ondulatorio, lo que nos interesa es el movimiento relativo de las diversas partes de un cuerpo finito.

Cuando se origina una perturbación en un punto fijo en una cuerda, las ondas se propagan en ambas direcciones, alejándose de ambos puntos. Si la perturbación ocurre en un punto sobre una superficie, como la superficie del océano, la perturbación se propaga en círculos cada vez más amplios, alejándose del punto. Si la perturbación sucede dentro de un medio tridimensional, como el aire, las ondas forman esferas cada vez mayores, que se propagan alejándose del punto de partida. En el movimiento ondulatorio, ya sea de vibraciones de una cuerda de guitarra, ondas en el océano, u ondas sonoras, hay un movimiento organizado de todo un medio, o partes de él, en respuesta a fuerzas internas.

Para comprender mejor el origen del movimiento ondulatorio, pensemos en un modelo en el cual un medio finito, como un sólido, está representado por un conjunto de puntos materiales conectados mediante resortes. Este medio se puede deformar, pero si la deformación no es demasiado grande, el medio puede regresar a su forma original, y admitirá ondas. A este medio se le llamará **medio elástico**. Una cuerda tensa de guitarra está formada por un medio elástico. Los medios elásticos comprenden materiales que, normalmente no se pensaría que son elásticos. La superficie del océano responde en forma elástica a las distorsiones, y la superficie admite ondas. Las moléculas conectadas mediante resortes son un mal modelo del aire, sin embargo, el aire responde en forma elástica cuando se comprime abruptamente en una pequeña región; el resultado es el sonido. En todos estos casos, la respuesta elástica del medio origina un movimiento organizado y colectivo, ondas que se mueven y se propagan. Cuando es necesaria la materia para que las ondas se propaguen, como sucede con las ondas de una cuerda, en el agua o sonoras, se dice que se trata de **ondas mecánicas**. La luz y otras ondas electromagnéticas, que son las que producen corrientes eléctricas, se propagan en el espacio.

2.3 MOVIMIENTO TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL.

La primera clase de movimiento ondulatorio son los movimientos transversales de los puntos materiales. En el **movimiento transversal**, todos los puntos materiales se mueven en dirección perpendicular a la línea original, de equilibrio, de masas y resortes, con una amplitud (desplazamiento máximo) diminuta cerca de los extremos de la cuerda, y máxima en el centro. Ello describe un **modo de vibración** posible de la cuerda. Como el movimiento lateral hace estirar a los resortes, las fuerzas en ellos actúan tratando de regresar las masas a la línea. Este tipo de onda se visualiza con facilidad en un resorte de juguete (cuerda para brincar). Si un extremo de ese resorte se hace mover de lado a lado, se generarán ondas transversales. Fig. 2.1

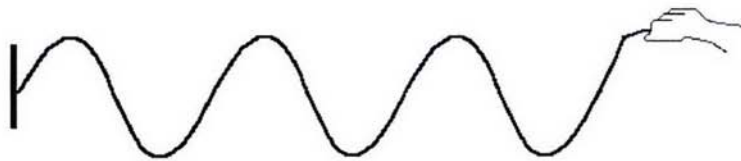


Fig. 2.1 Cuerda para brincar que genera ondas transversales.

La segunda clase de movimiento ondulatorio es el **movimiento longitudinal**, que se muestra en la Fig. 2.2 y que consiste en desplazamientos a lo largo de la línea de resortes.



Fig. 2.2 Resorte o cuerda que genera el movimiento longitudinal.

En algunas ondas hay movimiento tanto transversal como longitudinal, al mismo tiempo. Un ejemplo son las ondas en la playa. Si se pone a flotar un cuerpo en el océano para marcar el paso de una onda, se moverá, en parte, hacia arriba y hacia abajo, y en parte acercándose y alejándose de la playa. Al hacerlo, describe una trayectoria casi circular, como se muestra en la Fig. 2.3 Esto se debe a que el agua es incompresible; no se puede apretar. Por consiguiente, se puede formar un valle de una ola de mar sólo si se empuja el agua hacia delante o hacia atrás, hacia una cresta vecina. Este es el origen de la parte horizontal o longitudinal, del movimiento interno, que acompaña al movimiento hacia arriba y hacia abajo, o transversal.

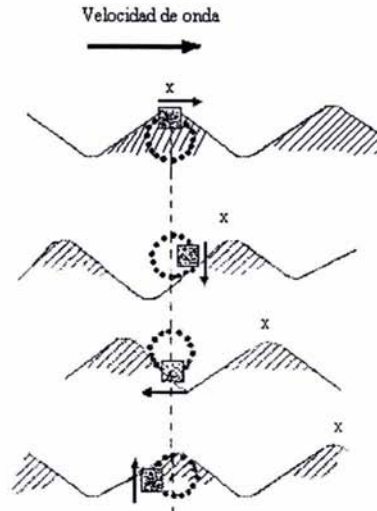


Fig. 2.3 Corcho flotando en el océano.

2.4 ONDAS AUDIBLES, ULTRASÓNICAS E INFRASÓNICAS.

Las ondas sonoras son ondas mecánicas longitudinales. Se pueden propagar en sólidos, líquidos y gases. Las partículas materiales transmiten este tipo de ondas como éstas, oscilando en la dirección de la onda misma. Hay un margen muy amplio de frecuencias para las ondas mecánicas longitudinales que se pueden producir, las **ondas sonoras** se encuentran comprendidas dentro del margen de frecuencias que pueden estimular el oído humano y al cerebro para dar la sensación de oír. Este margen se encuentra aproximadamente entre 20 ciclos/seg (20 hz.) hasta 20,000 hz. y se llama **margen audible**. Las ondas mecánicas longitudinales cuya frecuencia se encuentra abajo del margen audible se llaman **ondas infrasónicas**.

El **sonido ultrasónico** es la región de frecuencia situada por encima de la región audible (>20,000 hz.). Este sonido de alta frecuencia se presta a multitud de usos y aplicaciones. Por ejemplo, las ondas sonoras de frecuencia audible tienen un limitado intervalo de propagación en el agua. En cambio, las ondas ultrasónicas pueden recorrer kilómetros y son muy

direccionales. De ahí que el ultrasonido se utilice en las aplicaciones marítimas.

Las ondas infrasonicas de interés, son producidas comúnmente por fuentes grandes, los temblores de tierra son un ejemplo. Las altas frecuencias asociadas con las ondas ultrasónicas, pueden producirse por las vibraciones elásticas de un cristal, inducidas por resonancia con un campo eléctrico alternante (efecto piezoeléctrico). En esta forma se pueden producir frecuencias ultrasónicas tan altas como 6×10^8 hz. (600 Mhz); la longitud de onda correspondiente en el aire, es aproximadamente de 5×10^{-5} cm. la misma que la longitud de onda de las ondas visibles de la luz.

INTERVALO DE AUDIBILIDAD. El umbral de audibilidad a cualquier frecuencia es la intensidad mínima de sonido que se puede percibir a esa frecuencia. Por ejemplo, para un adulto joven el intervalo de audibilidad es el siguiente:

200 hz.	y	1,500 hz.	20 db
50 hz.	y	18,000 hz.	50 db

por lo tanto, la sensibilidad del oído decae en los extremos alto y bajo de la escala de frecuencias.

INTENSIDAD.- cantidad media de energía transportada por una onda, por unidad de superficie y por unidad de tiempo, a través de esa superficie perpendicular a la dirección de la propagación.

PULSACIONES.- las pulsaciones son fluctuaciones de amplitud producidas por dos ondas de frecuencias ligeramente diferentes.

La frecuencia f , es el número de vibraciones que se realizan en la unidad de tiempo. Ya que T es el tiempo para una vibración, $f = 1/T$. Un ciclo/seg es un hertz, hz.

Los decibeles db son unidades adimensionales. $1 \text{ db} = 10 \log (I/I_0)$

Las ondas sonoras son ondas de compresión en un medio material como el aire, el agua y acero. Cuando las compresiones y rarificaciones de las ondas inciden sobre el tímpano del oído, dan por resultado la sensación de sonido, siempre que su

$$20 \text{ hz.} \leq f \leq 20,000 \text{ hz.}$$

MARGEN AUDIBLE		
INFRASÓNICA	SÓNICA	ULTRASÓNICA
20 hz.		20,000hz

La velocidad promedio del sonido en el aire es de 343 m/seg.

Las ondas audibles se producen por cuerdas vibrantes (violín, piano, guitarra), columnas vibratorias de aire (órgano, clarinete) y placas o membranas vibrantes (xilófono, altoparlante, tambor, cuerdas vocales humanas). Todos estos elementos vibratorios, alternativamente comprimen el aire que los rodea en su movimiento hacia adelante y lo expanden en su movimiento hacia atrás. El aire transmite estas alteraciones alejándose de la fuente de cada onda. Al entrar en el oído, estas ondas producen la sensación de sonido. Las formas de las ondas que sean aproximadamente periódicas, a menudo dan lugar a una sensación placentera (si la intensidad no es demasiado grande), como por ejemplo, los sonidos musicales. Por otro lado, el ruido es un sonido que no es agradable y que puede resultar, por ejemplo, cuando la forma de la onda no es periódica.

EFFECTO DOPPLER.- es el cambio aparente en la frecuencia de una fuente sonora debido al movimiento relativo entre la fuente y un receptor
Fig. 2.4

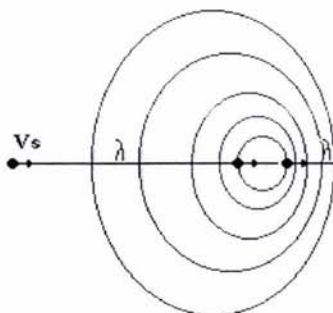


Fig. 2.4

Las superficies de onda emitidas por una fuente móvil se aproximan delante de ella y se separan detrás de ella.

2.4.1 VELOCIDADES SUPERSÓNICAS.

Es posible que las fuentes sonoras se desplacen más rápidamente que el sonido, esto es, una fuente sonora puede ir a una velocidad supersónica. Cuando esto sucede, las ondas sonoras forman dos crestas de una onda de choque detrás de la fuente. Fig. 2.5

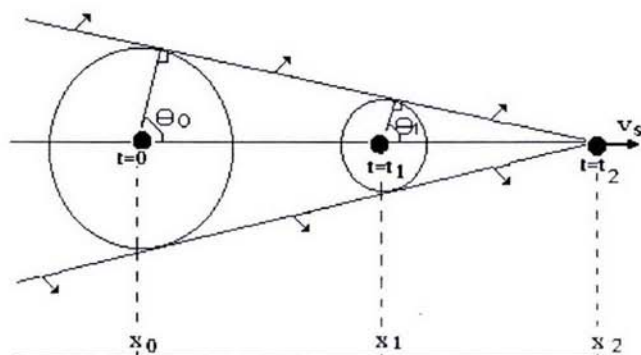


Fig. 2.5 Cuando una fuente móvil rompe la velocidad del sonido, las ondas sonoras forman dos crestas de una onda de choque detrás de la fuente.

El término **onda curva** se aplica comúnmente a la cresta de presión en forma de **V**. Una onda similar se dirige hacia fuera desde el arco o curva de una lancha de carreras que se desliza por el agua a alta velocidad. En este caso, la rapidez de la lancha es mayor que la rapidez de la onda en el agua. Algunos aviones de propulsión a chorro "rompen la barrera del sonido" (la velocidad del sonido es de aproximadamente 1,200 kph ó 770 mph) y vuelan a velocidades supersónicas, produciendo una onda de arco en el aire que se desplaza hacia fuera y hacia abajo. Esta gran perturbación de la presión del aire se percibe como un **estruendo sonoro** a medida que las ondas pasan sobre un lugar.

La rapidez de objetos de movimiento rápido se caracteriza por el **número Mach**, que se define así:

Número Mach es la razón de la rapidez de un objeto y la del sonido.

$$\text{Número Mach} = V_o/V$$

2.5 APLICACIONES DEL ULTRASONIDO.

El ultrasonido tiene muchas aplicaciones técnicas. Unas de las más conocidas es en la medicina y en la limpieza o aseo ultrasónico y la perforación ultrasónica en el maquinado de materiales muy duros, tales como vidrio, cerámica y gemas.

2.5.1 APLICACIONES MARÍTIMAS.

La profundidad de los océanos se determina mediante técnicas ultrasónicas por medio de una sonda.

Un haz de ultrasonido es dirigido hacia abajo desde un barco y se refleja en el fondo del mar. La profundidad se calcula si se conoce la rapidez del ultrasonido en el agua y el tiempo transcurrido. Se llama **sonar** a esta técnica de detección y determinación de alcance.

El sonar ultrasónico se usa no sólo para detectar y determinar el campo de acción de barcos y submarinos, sino también las regiones de bancos de peces. Además, al combinar o modular las ondas sonoras perceptibles con el ultrasonido se hace posible la comunicación por radio debajo del agua.

2.5.2 APLICACIÓN A LA LIMPIEZA O ASEO.

Esta es una de las aplicaciones más conocidas. Se utiliza en los baños líquidos para limpiar partes metálicas. Las vibraciones ultrasónicas sirven para extraer fragmentos de materia extraña de lugares que de lo contrario resultarían inaccesibles. Los joyeros se valen de baños ultrasónicos para limpiar piezas de joyería.

2.5.3 PERFORACIÓN ULTRASÓNICA EN EL MAQUINADO.

Esta es otra aplicación industrial importante del ultrasonido en el maquinado de materiales muy duros. Por medio de una pasta abrasiva y de un vibrador ultrasónico, se deshace rápidamente el material. Puesto que el taladro ultrasónico no gira, la punta del vibrador puede orientarse para hacer hoyos en superficies de cualquier forma. También se cuenta con hierros de soldadura ultrasónica. Son particularmente útiles cuando se suelda aluminio. El ultrasonido desprende la capa de óxido de aluminio sobre la superficie y entonces ya no se necesitan fundentes.

2.5.4 DETECCIÓN DE FALLAS EN METALES.

Para detectar fallas puede recurrirse a un haz o pulso ultrasónico que se desplaza por el metal. Cuando el ultrasonido choca contra una falla, que tiene propiedades diferentes al medio circundante, se producen refracción y reflexión. Se monitorea el patrón del eco, y la irregularidad indica la existencia de una falla en el metal. Tales técnicas son un medio no destructivo de probar las piezas fundidas de metales y otros objetos metálicos, entre ellos las tuberías de perforación de pozos, así como las partes de los aviones. Fig. 2.6

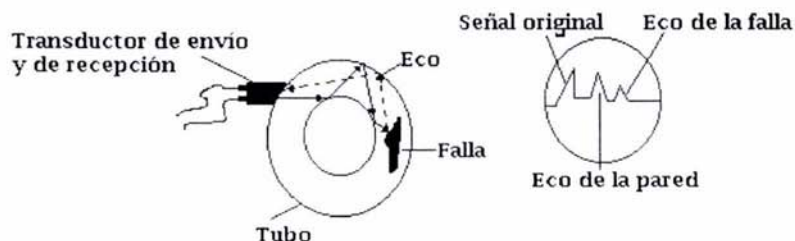


Fig. 2.6 Pruebas ultrasónicas no destructivas. Los ecos reflejados causan irregularidades en los patrones observados de reflexión.

2.5.5 APLICACIONES EN MEDICINA.

ULTRASONIDO OBSTÉTRICO.- Desde su introducción definitiva a finales de la década de los sesentas, la ultrasonografía ha llegado a ser una muy útil herramienta de diagnóstico en Obstetricia. Los equipos mas comúnmente usados se conocen como de "tiempo real", con los que se pueden capturar en un monitor, los continuos movimientos del feto. Generalmente se utilizan para este propósito, frecuencias de sonido muy altas entre 3.5 y 7.0 megahertz. Estas frecuencias se emiten a través de un transductor, el cual se pone en contacto con la piel del abdomen materno.

La información obtenida del reflejo de estas ondas sonoras, es obtenida al reflejarse "rebotar" en el mismo transductor, las que se analizan y se convierten en imágenes en movimiento. También se hacen mediciones que nos evalúan la edad gestacional, el tamaño y el crecimiento normal del feto.

- A Diagnóstico de embarazo.
- B Amenaza de aborto.
- C Determinación de edad gestacional y evaluación del tamaño fetal.
- D Localización de la placenta.
- E Embarazos múltiples.
- F Hidramnios y oligohidramnios.
- G Malformaciones fetales.

Ejemplos muy comunes y con equipos recientes incluyen condiciones como: labio leporino, paladar hendido y en casos muy especiales hasta el síndrome de Down puede ser diagnosticado.

Otras aplicaciones:

- Confirmación de muerte intrauterina.
- Confirmación de la presentación fetal en casos inciertos.
- Evaluación de movimientos fetales, tono y movimientos respiratorios.
- Diagnóstico de anomalías uterinas y pélvicas durante el embarazo, como fibromas (miomas) y quistes ováricos.

Examen transvaginal.

Con transductores especialmente diseñados, se puede realizar un ultrasonido a través de la vagina de la paciente. Este método provee imágenes mejores y por eso más información en pacientes que no están embarazadas o están en las fases tempranas del embarazo.

Ultrasonido Doppler a color.

El éxito de la aplicación del ultrasonido desde sus principios hace 40 años, es algo asombroso. Sus inicios fueron en Glasgow, Escocia, aunque en la actualidad, prácticamente todo aparato de ultrasonido es de origen japonés.

Con el apoyo del ultrasonido aplicado a la medicina, se obtienen imágenes tridimensionales y a color.

2.5.6 APLICACIONES EN EL ÁREA DE GEOFÍSICA.

El Instituto Mexicano del Petróleo a través de la Gerencia de Geofísica de Explotación, desde 1988 inició la búsqueda de soluciones a problemas de la industria petrolera aplicando la energía ultrasónica. Sus primeros pasos fueron con el desarrollo de la herramienta sonar SONIMP I, cuyo objetivo alcanzado fue la medición de la geometría de cavidades minadas en domos salinos para el almacenamiento de hidrocarburos, esta primera experiencia se realizó bajo un convenio de colaboración tecnológica con una Compañía.

En 1993 se inicia el proyecto CFB-0226 con el propósito de diseñar y construir dos herramientas de fondo sonar SONIMP II, para determinar las dimensiones, forma y volumen de cavidades a través de la tubería de revestimiento, característica que la diferencian de su antecesora SONIMP I. Este desarrollo ha permitido mejorar las condiciones de operación para la toma de registros de las cavidades mencionadas, abatiendo costos en dólares por la importación o el servicio de compañías.

En esta misma línea, en 1995 se inició el desarrollo de herramientas de detección de interfaz salmuera-crudo con la finalidad de conocer en tiempo real el nivel de crudo almacenado.

Entre 1997 y 1998 la experimentación realizada en el laboratorio de ultrasonido del IMP, permitió determinar la utilidad del ultrasonido aplicado a la explotación del petróleo. Dentro de las pruebas realizadas destacaron la liberación de componentes ligeros ($C_1 - C_4$) del aceite crudo, a fin de disminuir su Presión de Vapor Reid y con ello aumentar el grado de estabilización.

2.5.7 APLICACIONES EN LA MEDICIÓN DE HIDROCARBUROS.

El desarrollo de la técnica del ultrasonido ha hecho posible su aplicación a diversos campos.

Para la medición de hidrocarburos son utilizados los medidores de flujo de multitrayectoria. Comercialmente existen desde 6 pg de diámetro (para el caso de gas). La investigación en el desarrollo de estos medidores hará posible que pronto tengan su lugar en aplicaciones de transferencia de custodia.

CAPÍTULO 3

MEDIDORES ULTRASÓNICOS.

En la aplicación del ultrasonido se emplea una gran variedad de instrumentos electrónicos. El sonido se produce siempre generando en primer lugar una onda eléctrica que se utiliza para accionar un transductor, y éste convierte las ondas eléctricas en mecánicas; es decir, sonoras. Por lo tanto, el transductor ejerce una función similar a un altavoz, excepto que los intervalos de frecuencia pueden ser diferentes. Es práctica común la utilización de frecuencias de hasta varios megahertz; es decir, varios millones de ciclos por segundo.

Los instrumentos de detección hacen uso de transductores que en este caso desempeñan el papel de los micrófonos y amplificadores para presentar las señales reflejadas. Una técnica común consiste en enviar impulsos y observar los pulsos transmitidos y reflejados en un osciloscopio, lo que permite la medición directa del intervalo de tiempo transcurrido entre la transmisión y la reflexión.

Los medidores ultrasónicos multitrayectoria son medidores con los que se obtiene el flujo a partir de la medición del tiempo de tránsito y los pulsos del sonido a alta frecuencia. Los tiempos de tránsito son medidos por pulsos de sonido viajando diametralmente a través de la tubería, corriente abajo y luego corriente arriba (nota: no todos utilizan esto), con respecto al flujo. La diferencia en estos dos tiempos de tránsito se relaciona con la velocidad promedio del flujo a lo largo de las trayectorias acústicas.

Un **medidor ultrasónico** es un dispositivo electrónico, con al menos un par de transmisores (transductor y receptor en función alternante), capaz de medir el gasto que pasa a través de él, mediante la medición del tiempo de tránsito.

3.1 PRINCIPIO DE LA MEDICIÓN ULTRASÓNICA.

El principio de operación de los medidores ultrasónicos está basado en el método del tiempo de tránsito, con la recopilación directa de cada impulso individual de sonido.

Con estos medidores el gasto se obtiene a partir de la medición del tiempo de tránsito y los pulsos del sonido a alta frecuencia. Los medidores tienen como mínimo un par de transductores de medición, los cuales están, normalmente, en contacto directo con la corriente del fluido. Los tiempos de

tránsito son medidos por impulsos de sonido viajando en el caso más simple, diametralmente a través de la tubería, corriente abajo y luego corriente arriba con respecto al flujo. La diferencia en estos dos tiempos de tránsito se relaciona con la velocidad promedio del flujo. El gasto se obtiene a partir del cálculo de la velocidad media del flujo y del conocimiento del área de la sección transversal del medidor.

En las Figs. 3.1 a la 3.4 se muestra el principio de la medición ultrasónica.

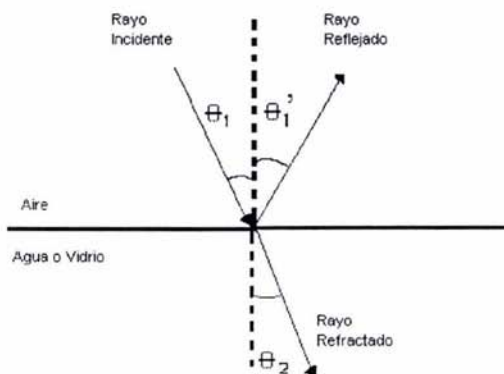


Fig. 3.1 Reflexión y Refracción del sonido en una frontera entre dos materiales.

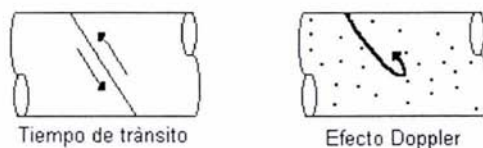


Fig. 3.2 Principio de la medición ultrasónica.

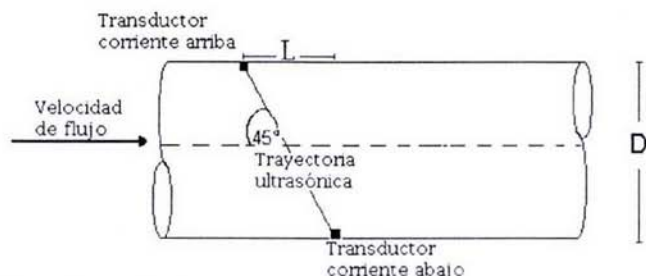


Fig. 3.3 Geometría de un medidor ultrasónico.
(Tiempo de tránsito)

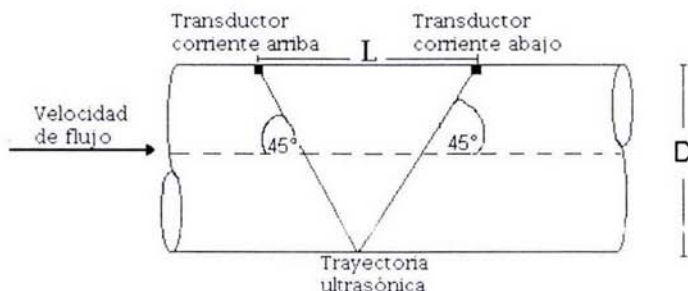


Fig. 3.4 Geometría de un medidor ultrasónico.

La función para un perfil de velocidades se puede aproximar con una ecuación semi-empírica:

$$v = \frac{L^2}{2X} \times \frac{(t_u - t_D)}{t_u t_D} \quad \text{Ec 3.1}$$

donde L es la longitud de la trayectoria acústica y X es la distancia entre los dos transductores, Fig 3.5. La velocidad del sonido en el gas se puede calcular con la ecuación siguiente:

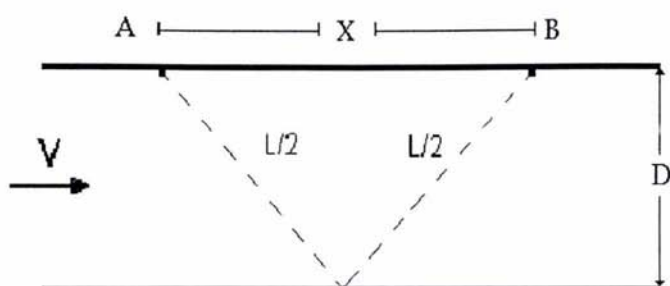


Fig. 3.5 Principio de la medición ultrasónica.

$$c = \frac{L}{2} \times \frac{(t_u + t_D)}{t_u t_D} \dots \dots \dots \text{Ec. 3.2}$$

La velocidad del flujo se puede describir con un vector en tres dimensiones $v(t)$, el cual depende del tiempo y espacio; $v = v(x,t)$. La función para un perfil de velocidades totalmente lleno se puede aproximar con una ecuación semi-empírica:

$$v(r) = v_{\text{máx}} (1 - r/R)^{1/n} \dots \dots \dots \text{Ec. 3.3}$$

donde r es la posición radial, R es el radio de la tubería y n está en función del N_{Re} y la rugosidad de la tubería. Para tuberías lisas se aplica la ecuación de Prandtl (Schlichting, 1968).

$$n = 2 \log_{10} (N_{Re}/n) - 0.8 \dots \dots \dots \text{Ec. 3.4}$$

Si se conoce el N_{Re} se puede calcular n . Conociendo n se puede calcular el perfil de velocidades $v(r)$, el cual es, básicamente, constante en el flujo. En la Figura 3.6 se muestra el perfil de la velocidad, donde $v_{\text{máx}}$ se da al centro de la tubería, con los siguientes valores del N_{Re} .

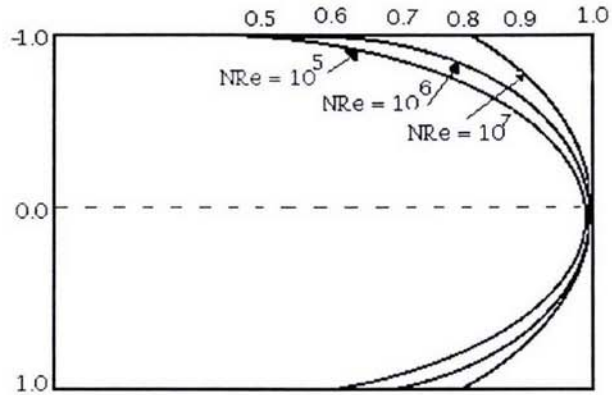


Fig.3.6 Perfiles de velocidad turbulenta para $N_{Re} = 10^5$, 10^6 y 10^7 .

- $N_{Re} = 10^5$ ($n = 7.455$)
- $N_{Re} = 10^6$ ($n = 9.266$)
- $N_{Re} = 10^7$ ($n = 11.109$)

Para flujo totalmente turbulento, la velocidad es una función más complicada del tiempo y espacio. De acuerdo a Hinze (1975), $v = v(x,t)$, se puede descomponer de la siguiente manera:

$$v(x,t) = u(x,t) + w(x,t) \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 3.5}$$

donde u representa el valor local de la velocidad, la cual es función del tiempo, y w representa las fluctuaciones de la velocidad turbulenta.

La medición ultrasónica es posible gracias al uso y conocimiento de la propagación de las ondas acústicas en el fluido Fig.3.7, y en general, puede decirse que esta velocidad c es función de la presión, de la densidad y de la composición del fluido, y puede calcularse empleando la teoría de la termodinámica:

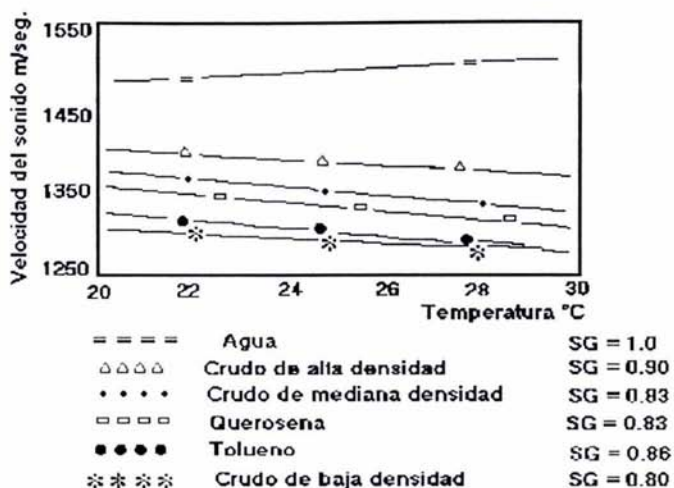


Fig. 3.7 Medición de la velocidad del sonido en varios líquidos en función de la temperatura.

$$c^2 = \frac{\partial P}{\partial \rho} \dots\dots\dots \text{Ec. 3.6}$$

donde P es la presión y ρ es la densidad del fluido.

Comúnmente, la velocidad del flujo solo tiene una componente (en la dirección longitudinal X), por lo tanto $v = v(r)$, y la Ley de Snell (Morse e Ingard, 1986) toma la siguiente forma:

$$\frac{c(r)}{\cos \Phi(r)} + v(r) = \text{constante} \dots\dots\dots \text{Ec. 3.7}$$

donde $\Phi(r)$ es el ángulo de la trayectoria. Para simplificarlo, se supone que la velocidad del sonido c es constante. Después, de acuerdo a Boone y Vermass (1991), la ecuación anterior se puede escribir como:

$$\frac{dx}{dt} = c \cos \Phi(r) + v(r)$$

$$\frac{dr}{dt} = c \sin \Phi(r)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\cos^2 \Phi(r) \frac{dv(r)}{dr} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 3.8}$$

Si se conoce la posición de los transductores, estas ecuaciones se pueden resolver y así encontrar la trayectoria acústica. Dado que en la sección transversal de la tubería la velocidad no es constante, la trayectoria será una línea curva y no una línea recta. El ángulo que forma la trayectoria con respecto al eje axial de la tubería tampoco será constante, y corriente arriba será diferente del ángulo de la trayectoria corriente abajo. La curvatura de la trayectoria depende de los Números Reynolds "Re" y Mach "Ma". La curvatura se incrementa con el incremento del número Ma y con el perfil de velocidades. En la Fig. 3.8 se muestra la trayectoria con curvatura.

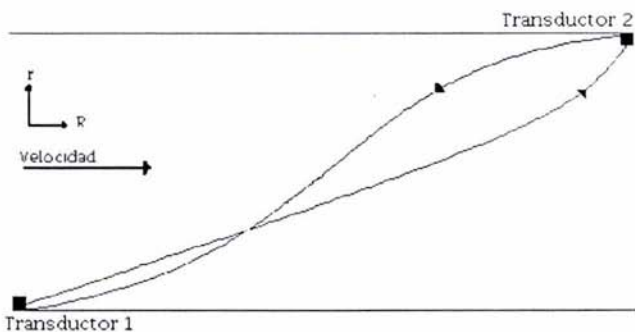


Fig. 3.8 Curva ampliada de una trayectoria acústica.

Las ecuaciones 3.1 y 3.2 se derivaron de:

$$t_U = \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2 \sin^2 \Phi} - v \cos \Phi} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 3.9}$$

$$t_D = \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2 \sin^2 \Phi} + v \cos \Phi} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 3.10}$$

donde los denominadores representan la integral a lo largo de la trayectoria:

$$v = \frac{1}{L} \int v(r) dr \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 3.11}$$

En otras palabras, la velocidad percibida por el instrumento es el promedio a lo largo de la trayectoria acústica y en la dirección de ésta.

Generalmente, al usuario le interesa la velocidad media v , cuyo valor es el promedio en la sección transversal A de la tubería:

$$v = \frac{1}{A} \iint v(r) dA \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 3.12}$$

Como v tiene una sola componente en la sección transversal, la velocidad promedio se calcula así:

$$V = K_c \times v \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 3.13}$$

donde K_c es el factor de corrección definido como:

$$K_c = \frac{1}{1.12 - 0.011 \text{Log}_{10} N_{Re}} \quad \dots\dots\dots \text{Ec.3.14}$$

En un medidor multitrayectoria, $v(P)$ se calcula para un conjunto de valores discretos de P . Así que V se escribe como:

$$V = \frac{2}{A} \int_{-R}^R v(P) \sqrt{(R^2 - P^2)} dP \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 3.15}$$

donde $v(P)$ es el valor promedio de la velocidad a lo largo de la trayectoria en la posición lateral P . La integral se puede aproximar aplicando una integración numérica, Gaussiana por ejemplo. Así pues, una estimación de v se puede calcular basándose en $v(P)$ para cada trayectoria:

$$V = \sum_{i=1}^n w_i v(P_i) \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 3.16}$$

donde w_i es el factor de peso y P_i es la posición lateral del transductor ultrasónico.

Finalmente el gasto Q , se puede calcular multiplicando la velocidad promedio V por el área A :

$$Q = V \times A \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 3.17}$$

La Fig. 3.9 muestra los componentes básicos de la técnica ultrasónica en una instalación experimental.

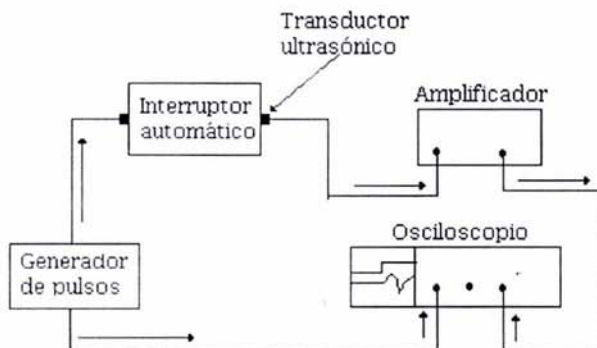


Fig. 3.9 Componentes básicos del ultrasonido en una instalación Experimental.

El medidor ultrasónico de tiempo de tránsito, con el tipo de "sensor húmedo", donde los transductores piezoeléctricos están en contacto con el fluido, es adecuado para líquidos y gases unifásicos limpios. Para fluidos sucios, hostiles o multifásicos, se prefiere utilizar un medidor con transductores de tipo "bridados", montados en el exterior del tubo.

El mejoramiento en la técnica ultrasónica ha sido posible mediante el uso de los transductores ultrasónicos de alta frecuencia, logrando así un alto grado de precisión, que puede obtenerse utilizando un sistema de "activación armónica". Fig. 3.10

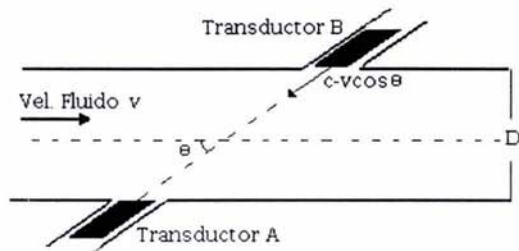


Fig. 3.10 Transductores alternantes (Transmisor-receptor) de alta frecuencia "Activación armónica"

En primer término, el transductor B actúa como transmisor y emite un pulso de ultrasonido al transductor A, el cual actúa como receptor. El tiempo de tránsito correspondiente de B a A es:

$$T_{BA} = L / (c - v \cos \theta) \dots \dots \dots \text{Ec. 3.18}$$

Si A actúa como transmisor y emite un pulso a B, que actúa como receptor, el tiempo de tránsito correspondiente de A a B es:

$$T_{AB} = L / (c + v \cos \theta) \dots \dots \dots \text{Ec. 3.19}$$

Y el tiempo de tránsito diferencial ΔT está dado por:

$$\Delta T = T_{BA} - T_{AB} \dots \dots \dots \text{Ec. 3.20}$$

$$\Delta T = D / \text{sen } \theta (1 / (c - v \cos \theta) - 1 / (c + v \cos \theta)) \dots \dots \dots \text{Ec. 3.21}$$

$$\Delta T = 2D \cot \theta v / (c^2 (1 - v^2 \cos^2 \theta / c^2)) \dots \dots \dots \text{Ec.3.22}$$

Como sucede generalmente que la razón v/c es 10^{-2} , entonces;

$$v^2 \cos^2 \theta / c^2 \ll 1 \dots \dots \dots \text{Ec. 3.23}$$

por lo que finalmente la ecuación que representa la diferencial de frecuencias es:

$$\Delta f = \text{sen } 2 \theta v / D \dots \dots \dots \text{Ec. 3.24}$$

Que es el tiempo diferencial de tránsito. Así, el tiempo de tránsito diferencial ΔT es proporcional a la velocidad del fluido, pero normalmente es

muy pequeño. Para agua en un tubo de 0.1 m de diámetro, el tiempo de tránsito a $\theta = 45^\circ$, en el fluido estacionario, es de 94 μseg . Si la velocidad del agua es 1 m/seg, el tiempo de tránsito diferencial correspondiente es de 89 μseg . Así, para obtener un error de medición dentro del 1% de la lectura, el error máximo en ΔT debería ser de 0.9 μseg . El "sistema de activación armónica" consiste en que los transductores A y B cambian continuamente entre los modos de transmisor y receptor. El tiempo de tránsito diferencial se convierte aquí en una diferencia de frecuencias, la cual es independiente de la velocidad del sonido c .

Un medidor de trayectoria sencilla de tiempo de tránsito, usa básicamente dos transductores ultrasónicos, ubicados en lados diametralmente opuestos de la tubería, ver Fig. 3.3. Cada transductor es capaz de mandar y recibir pulsos ultrasónicos. El medidor mide el tiempo en que viaja el pulso ultrasónico del transductor A al transductor B e inversamente del transductor B al transductor A. Los pulsos ultrasónicos viajando en la dirección del flujo llegan al transductor opuesto en un periodo de tiempo más corto que los pulsos viajando en contra de la corriente. Esto se debe a que el flujo por sí mismo ayuda a los pulsos viajando corriente abajo y los dificulta o entorpece corriente arriba. El medidor mide el tiempo que se hace cada pulso para viajar en cada dirección, después hace la diferencia del tiempo de tránsito corriente abajo contra corriente arriba, la cual es proporcional a la velocidad del flujo. La ecuación que se usa para determinar la velocidad del flujo es:

$$V_f = (L / \cos\theta) / [dt / (t_U + t_D)] \quad \text{.....Ec. 3.25}$$

- donde: V_f : velocidad calculada del flujo.
 L: distancia longitudinal entre los transductores.
 D: distancia perpendicular entre los transductores (generalmente el diámetro interno de la tubería)
 t_U : tiempo de tránsito corriente arriba.
 t_D : tiempo de tránsito corriente abajo.
 dt: diferencial de tiempo (normalmente 1 seg.)

Ver Fig.3.10 Sistema de activación armónica.

Los medidores de flujo de tiempo de tránsito y efecto Doppler son igualmente capaces de medir el flujo e indicar su dirección.

3.2 CONFIGURACIONES DE LOS MEDIDORES ULTRASÓNICOS.

La amplia diversidad de las situaciones reales en las que se opera con los hidrocarburos en condiciones normales, como mezclas de gas-glicol-agua o aceite-gas-agua, contaminados con arenas o corrientes de gas con polvos; hizo necesario el desarrollo también de diversas configuraciones de medidores ultrasónicos. Se tienen, por ejemplo, medidores que miden el tiempo de tránsito directo o normal, los que miden el tiempo de tránsito reflejado y los de efecto Doppler "trans-flection", de una trayectoria, de dos y hasta de cinco o más trayectorias acústicas, aunque los resultados que se han obtenido de las distintas pruebas de laboratorio a que han sido sometidos por parte de varias compañías que se han dedicado a la investigación, indican que un medidor con más de cinco trayectorias acústicas no mejora sustancialmente la precisión en sus mediciones. Se tiene, por lo tanto, que un medidor de cinco trayectorias acústicas es el que tiene la mejor combinación de precisión-costo.

Sin embargo, se han desarrollado medidores de una y dos trayectorias, con distintos arreglos de los transductores; que han alcanzado una precisión aceptable en la industria de los hidrocarburos con fines de fiscalización y transferencia de custodia.

Las **configuraciones** de los medidores ultrasónicos, **son los distintos arreglos de los transductores en la tubería**. A continuación, se muestran en las Figs. 3.11 y 3.12 algunos de estos arreglos de transductores.

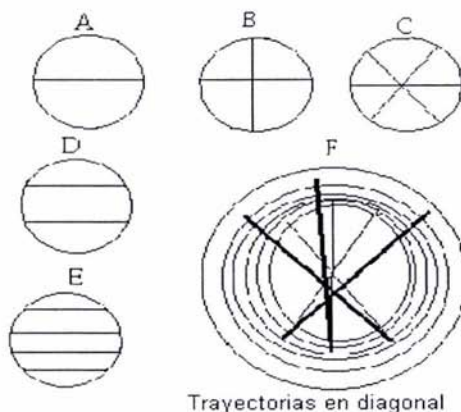


Fig. 3.11 Diferentes configuraciones de las trayectorias de los medidores ultrasónicos.

- A) Una trayectoria diametral. Por ejemplo, con los transductores bridados.
- B) Doble trayectoria diametral. Con transductores bridados o húmedos.

- C) Triple trayectoria diametral. Es posible usando transductores bridados. Por ejemplo, el modelo G₁.
- D) Doble trayectoria a la mitad del radio. Por ejemplo, los modelos G₂ y G₃.
- E) Trayectoria de cuatro cuerdas. Similar al modelo G₄.
- F) Estrella de seis puntos. Posible con cuatro transductores húmedos que reflejan el ultrasonido tres veces. Por ejemplo, el modelo G₁ de 3 ó 5 trayectorias. Ver Fig. 3.12

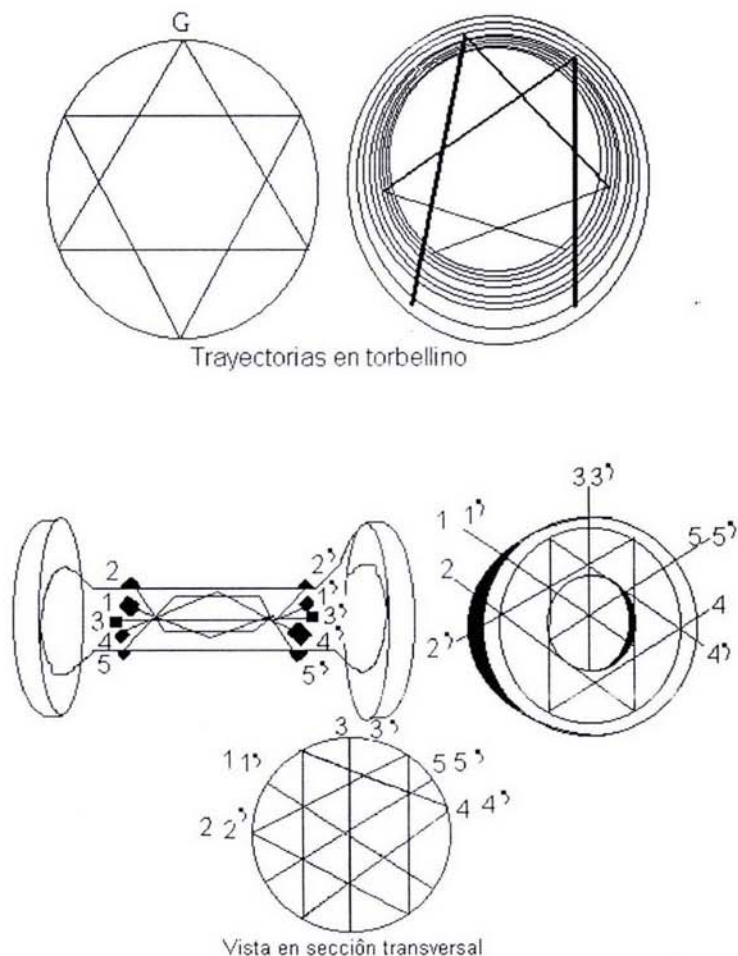


Fig. 3.12 Trayectorias en torbellinos.

A la fecha, sólo la compañía NA¹ instala medidores ultrasónicos multitrayectoria para la transferencia de custodia.

3.3 CALIBRACIÓN DE UN MEDIDOR ULTRASÓNICO.

Existen varias calibraciones a las que se someten los medidores ultrasónicos con el propósito de reducir los errores y la incertidumbre en la medición, resultado de imprecisiones en las longitudes de las trayectorias acústicas, en sus ángulos, en los diámetros de la tubería y en la ubicación de las trayectorias.

La "calibración en seco" (cero flujo) implica la precisión en la medición de las dimensiones del carrete; es decir, su diámetro D y las longitudes L de cada una de las trayectorias acústicas. Los errores en estas mediciones afectan directamente la precisión en la medición. La incertidumbre esperada en un medidor multitrayectoria que se ha calibrado en "seco" será del orden del 1% o menor. Si se requiere que el medidor tenga una precisión mejor, se recomienda hacerle una "calibración al flujo".

Un método para efectuar la "calibración en seco" es instalar dos transductores en una cámara con gas. Se debe conocer con precisión la separación de los transductores. Se llena la cámara con gas, normalmente Nitrógeno y de esta manera saber la velocidad del sonido (en el Nitrógeno). En la celda de prueba se presentan condiciones de "cero flujo". El tiempo real de tránsito de la señal en el fluido puede calcularse de la relación de la longitud de la trayectoria acústica y la velocidad del sonido. Como los tiempos de tránsito corriente arriba y corriente abajo son iguales (cero flujo), se pueden calcular t_U y t_D . El sistema ultrasónico mide tiempos que comprenden los tiempos de retraso "times delays". Los "times delays" se calculan restando a los valores medidos los valores calculados. Para este método se necesita conocer con precisión la velocidad del sonido en la celda de prueba. Cualquier error en la velocidad del sonido en la celda afectará directamente el desempeño del medidor.

Para realizar la "calibración en seco" existe otro método, que no requiere que se conozca la velocidad del sonido en la celda de prueba y que se puede usar para determinar los "times delays". El método consiste en instalar dos transductores en los que, los tiempos de tránsito se puedan medir desde dos diferentes y conocidas longitudes a condiciones de "cero flujo". La medición se debe hacer bajo las mismas condiciones en ambas longitudes. Como los tiempos de tránsito comprenden el mismo "time delays" para ambas trayectorias, se tiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas (velocidad del sonido y el "time delay") el cual se puede resolver explícitamente.

¹ El autor utiliza una nomenclatura "particular" para no emplear nombres comerciales.

La "calibración al flujo" es una prueba, en la que se trata de que las condiciones de laboratorio sean lo más parecidas a las condiciones esperadas en campo. El número Reynolds, dentro de lo posible, que sea lo más parecido al real. Consiste en realizar un cierto número de lecturas, dentro de un rango de velocidades. Es práctica común calibrar al menos de 6 a 10 velocidades, espaciadas logarítmicamente en el rango del medidor, tomando el promedio de al menos 3 mediciones, de 100 segundos, para cada velocidad. En el extremo inferior del rango, el número de mediciones se puede incrementar de 5 a 10. En la determinación del número de puntos de repetición para cada condición de flujo, se considera la variación de los instrumentos en la prueba, de esta manera los errores se promedian lo suficiente y la diferencia que queda con respecto a la calibración estándar es la tendencia del instrumento bajo prueba.

Los resultados de esta prueba proporcionan una precisión en la medición del orden del 0.2 al 0.3%. Con esta prueba se puede determinar la relación promedio entre la señal y la velocidad del flujo, algunas veces llamado el "factor del medidor". Para realizarla se debe asegurar que el aparejo de prueba no influya en los resultados de la prueba. Esto implica que el perfil de velocidades y el flujo estén libres de pulsaciones o vibraciones. Esto es factible usando tramos suficientes de tubería recta corriente arriba y corriente abajo del medidor. De ser necesario se usa un acondicionador de flujo.

Calibraciones en instalaciones de prueba "test facilities". Este tipo de pruebas consiste en someter a los medidores a gastos muy altos en tuberías presurizadas. El costo de esta calibración puede incrementar significativamente el precio del medidor. Estas calibraciones no se hacen a medidores mayores de 12 pg de diámetro.

3.4 TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIDORES ULTRASÓNICOS PARA LÍQUIDO.

En los capítulos anteriores se han descrito, de una forma general, las características de los medidores ultrasónicos. En esta sección se mencionan las características de los medidores ultrasónicos utilizados en la medición de líquidos.

MEDIDOR PORTÁTIL PARA LÍQUIDO MODELO L₁*

Este es el único tipo de medidor con mediciones integradas "built-in", donde el modelo de "tiempo de tránsito" se aplica a flujo limpio, por ejemplo, de agua limpia; y el modelo de efecto Doppler "trans-flection" para aplicaciones de flujo multifásico. Sus opciones comprenden modelos de 1 y 2 canales, con transductores del tipo húmedo y bridados.

El medidor de efecto Doppler "trans-flection" es muy versátil, aplicable a corrientes de líquido con sólidos y burbujas de gas, lo cual es muy común encontrar en flujos de dos fases y que es donde fallan los medidores convencionales de "tiempo de tránsito"

MEDIDOR PORTÁTIL DE LÍQUIDO MODELO L₂.

Este modelo de medidor de líquido reúne ambos modos; es decir; tiempo de tránsito y efecto Doppler "trans-flection", desarrollado para aplicaciones en flujo multifásico, en crudos con aguas residuales, arenas y mezclas de aceite-gas-agua.

MEDIDOR PORTÁTIL DE LÍQUIDO MODELO L₃ .

Éste es un modelo con doble canal, para aplicaciones que requieren dos mediciones simultáneas con un solo medidor. Las dos mediciones pueden ser en dos puntos diferentes de la misma tubería o en dos tuberías diferentes. En ambos casos, se pueden usar tanto los transductores tipo bridados como los de tipo húmedo. Este medidor portátil con doble canal, también se puede instalar con dos trayectorias para medir el flujo en una sola ubicación incrementando así la precisión. Continuamente hace la medición en ambos canales, la suma, la diferencia y el promedio de los dos canales.

Este tipo de medidor también se puede usar en situaciones muy especiales de precisión, como en tuberías de 1/8" pg con sensores de temperatura "flowcells", sin interrumpir el proceso.

Cuando se conoce el espesor de pared de la tubería, el flujo se puede medir con transductores bridados. Existen calibradores ultrasónicos de tubería que permiten medir con precisión el espesor de ésta desde su exterior, que es mediante un "plug" o enchufe que se pone en contacto con la pared exterior de la tubería y pone en pantalla el espesor de ésta.

* Para mayor información de la nomenclatura referirse al autor E-mail: aida123@prodigy.net.m

El modelo de efecto Doppler o "trans-flection" consiste de un transductor que dispara miles de pulsos ultrasónicos agrupados en una sucesión muy rápida. Los pulsos botan espaciados en el fluido y son recibidos por el otro transductor. Cada grupo de pulsos recibido representa una "foto instantánea" del flujo "snapshot". El promedio de estas "snapshots" dan la medición. El gasto y la dirección del flujo se determinan analizando el movimiento sucesivo de las "snapshots".

Aplicaciones:	líquidos sucios o limpios.
Temperatura de operación:	14 a 122 °F. (-10 a 50 °C)
Repetibilidad:	±0.2% a 0.5%
Rangeabilidad:	400:1 Modelo tiempo de tránsito. 30:1 Modelo efecto Doppler.
Dimensiones:	12.7 x 22.9 x 5.8 cm
Peso:	1.0 kg

MEDIDOR DE LÍQUIDO MODELO L₄

Este tipo de medidor proporciona mediciones libres de interferencia "drift-free". El modelo L₄ es un medidor de líquido con aplicaciones a líquidos muy limpios o muy sucios. La diferencia entre el modelo L₂ y éste, es que aquél es portátil, y éste va fijo a la instalación.

MEDIDOR DE LÍQUIDO MODELO L₅.

Éste modelo es un medidor con transductores tipo bridados o húmedos. El doble canal es para hacer simultáneamente dos mediciones en tuberías diferentes o hacer dos mediciones en puntos diferentes de una misma tubería.

Aplicación:	líquidos ultralimpios o muy sucios.
Velocidad del flujo:	mayor a 1 pie/seg
Dimensiones:	36.2 x 29.0 x 13.0 cm
Peso:	5 kg
Temp. operación:	14 a 122 °F (-10 a 50 °C)
Presión de operación:	3,000 lb/pg ² , máxima.
Repetibilidad:	±0.2% a 0.5%

	Modelo trans-flection o efecto Doppler	Modelo tiempo de tránsito
Diámetro interno de la tubería.	Mayores a 2 pg	6 pg
Rangeabilidad	30:1	400:1

MEDIDOR DE LÍQUIDO MODELO L₆.

Con este modelo se revoluciona la medición de flujo de líquidos usando tecnología compacta a bajos costos.

Tiene las siguientes características:

- Bajo costo.
- Poco peso y tamaño.
- Disponible en modelos de "tiempo de tránsito" y "efecto Doppler"
- Disponibles con dos canales y con doble trayectoria acústica.
- Control remoto infrarrojo (opcional).
- Transductores húmedos o bridados.

El modelo de efecto Doppler "trans-flection" amplía la capacidad de medición de flujos multifásicos, como pueden ser aguas residuales con sedimentos y mezclas de agua-aceite-gas.

Con el modelo L₆ de doble canal se pueden detectar fugas por goteo. Se hacen dos diferentes mediciones en la misma tubería. Si el gasto se incrementa o disminuye de un punto a otro, se deduce que existe fuga.

Tanto los modelos de tiempo de tránsito como los de efecto Doppler pueden usar los transductores húmedos o bridados. El medidor mide el flujo en ambos canales haciendo la suma, la resta y el promedio entre ellos.

Cuenta con un control remoto opcional que opera con rayos infrarrojos, útil en áreas de seguridad o de difícil acceso.

Con este modelo se pueden hacer mediciones en tuberías desde ½ hasta 200 pg., por ejemplo, en sistemas de calentamiento y/o enfriamiento con agua-glicol con temperaturas desde -20 hasta 260 °C.

Con el modelo L₆ de efecto Doppler con transductores húmedos, en la mayoría de los casos es factible alcanzar una precisión del 1% o mejor; superando al modelo de tiempo de tránsito. Además, cuenta con un adaptador de precisión que permite enroscar y desenroscar el transductor de tal manera que éstos se pueden cambiar sin interrumpir el flujo.

Para instalar los transductores bridados existe una gran variedad de abrazaderas y accesorios disponibles. La compañía PNMT cuenta con una abrazadera universal que es deslizable y ajustable que simplifica el trabajo. Para mediciones en tuberías de ½ a 2 pg., PNMT tiene una abrazadera especial con minitransductores de precisión.

MEDIDOR DE LÍQUIDO MODELO L₇.

Este es un modelo versátil, ya que mide flujos en régimen laminar, turbulento y en transición en tuberías desde 1/8 hasta 80 pg., en un rango de velocidades de 0.1 a 30 pie/seg. con una rangeabilidad de 300:1 y apto para trabajar con transductores húmedos o bridados. La mayor importancia de este modelo es que proporciona una precisión en sus mediciones de $\pm 1\%$ con transductores húmedos y del orden de $\pm 2.5\%$ con los transductores bridados.

Se recomienda usar transductores húmedos en presiones superiores a 3000 lb/pg² y temperaturas de -200 a 200 °C. Los bridados están disponibles para tuberías desde 1 pg.

Durante su operación proporciona los datos e información de una manera muy sencilla. En su cara frontal tiene tres luces indicadoras de una apropiada operación.

El costo de este medidor con transductores incluidos, es la mitad de lo que cuesta cualquier otro con las mismas características y capacidades.

ESPECIFICACIONES	MODELO L ₇
Rango de presión	220 a 1,475 lb/pg ²
Rango de velocidad	0.1 a +30 pie/seg (0.03 a 10 m/seg)
Diámetro de tubería	1/8 a 80 pg
Temperatura de operación	-10 a 65 °C
Repetibilidad	$\pm 0.2\%$ con sensores húmedos
Peso	30 lb (13.6 kg)
Precisión	$\pm 1.0\%$ con sensores húmedos
Suministro de energía	100/120 ó 220/240 AC
Dimensiones	12 x 10 x 5 pg (30.48 x 25.4 x 12.7 cm)

Los transductores bridados son más baratos de instalar que los húmedos. Si se tratara de elegir qué tipo de transductores usar, habría que analizar cuánta precisión en la medición se requiere. Si con un $\pm 2.5\%$ se satisfacen los requerimientos se podrán usar los bridados, pero si los requerimientos de precisión son más estrictos, entonces se deberán elegir los húmedos, que alcanzan una precisión hasta del $\pm 1\%$.

3.5 TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIDORES ULTRASÓNICOS PARA GAS.

En esta sección se mencionan las características de los medidores ultrasónicos utilizados en la medición de gas, tanto multitrayectoria como de trayectoria sencilla.

MEDIDOR MÁSIICO DE GAS MODELO G₁ DE 1 Y 2 CANALES.

El de dos canales se usa para mayor precisión, ya que puede medir con dos trayectorias diferentes en la misma ubicación o medir el flujo en dos tuberías separadas o en dos lugares diferentes de la misma tubería.

Aplicación:	gas enviado a quemadores.
Velocidad del flujo:	mínima, 0.1 pie/seg [0.03 m/seg] máxima, 275 pie/seg [85 m/seg]
Rangeabilidad:	2750:1
Diámetros disponibles:	3 a 120 pg [76 mm a 3 m]
Rango de presión:	superiores a 1500 lb/pg ²
Temp. de operac:	14 a 130 °F [-10 a 55 °C]
Dimensiones:	36.2 x 29.0 x 13.0 cm
Alimentación:	110 y 220 VAC ó 12 y 24 VDC
Peso molecular:	de 2 a 120 g/mol
Gasto (másico):	0 a 4 000,000 lb/hr

Este tipo de medidor puede manejar gases como CO₂, CO, H₂ y N₂.

MEDIDOR DE GAS MODELO G₂.

Los prototipos de este medidor fueron estudiados durante 9 años de investigación y desarrollados por B G. Su objetivo fue desarrollar un medidor que ofreciera precisión y confianza en aplicaciones de transferencia de custodia, que no requieren calibración al flujo ni causan caída de presión.

La evaluación y pruebas desarrolladas fueron exitosas en medidores de 4 a 42 pg.

En 1985 B G otorgó a DN la licencia exclusiva para fabricar comercialmente este modelo de medidor. A partir de septiembre de 1994 DN ha suministrado alrededor de 80 de estos medidores en Norteamérica y Europa, principalmente.

Los diámetros comercialmente disponibles de este modelo van de 6 hasta 42 pg. Para diámetros mayores se debe consultar al fabricante.

Aplicación:	gases secos a alta presión sin condensados.
Rango de presión:	diseñado y disponible para ANSI 2500 lb/pg ² (170 kg/cm ²)
Rango temp.del gas:	-4 a 185 °F (-20 a 85 °C)
Repetibilidad:	≤0.25%
Veloc. flujo:	mínima 3 pie/seg; máxima 70 pie/seg.
Alimentación:	110 VAC ó 24 VDC.

La compañía ITM ofrece un amplio rango de medidores ultrasónicos que utilizan el método de medición del Tiempo de Viaje Absoluto Digital, (Absolute Digital Time Travel, ADTT). A continuación se presentan las características y especificaciones de cinco de ellos.

Estos medidores miden el tiempo diferencial entre dos direcciones de trayectorias ultrasónicas, para determinar la velocidad del gas que pasa a través del medidor. Como resultado, se tiene que las velocidades del gas permiten que el tiempo diferencial sea medido con mucha precisión. En la actualidad, las velocidades de las computadoras permiten que este tiempo diferencial sea medido con mucha precisión. Con el incremento de la precisión, los medidores ofrecen mediciones bidireccionales con una escasa o nula caída de presión.

MEDIDOR DE GAS MODELO G₃.

Este es un medidor ultrasónico de gas que fue desarrollado específicamente para satisfacer los requerimientos de alta precisión en la medición del flujo de gas y mediciones de verificación usando un solo par de transductores extraíbles instalados mediante el procedimiento de perforaciones en línea viva "hot-tapped". Este tipo de medidor es capaz de medir flujo bidireccional.

CARACTERÍSTICAS.

- Capacidad de manejar flujo bidireccional.
- Alta repetibilidad.
- Mínima obstrucción a la tubería.
- Tiempo rápido de respuesta.
- No causa caídas de presión.
- Amplio rango disponible.
- Insensible a las variaciones de presión.
- Cambio de transductores sin recalibración.
- Programable en campo.
- Partes electrónicas montadas en campo.
- Mejora la precisión del 1%.

- No tiene partes móviles.
- Mantenimiento insignificante.

ESPECIFICACIONES	MEDIDOR MODELO G ₃
Rango de presión	220 a 1,475 lb/pg ²
Rango de velocidad	-100 a 100 pie/seg
Diámetro de tubería	8 a 64 pg
Temperatura del gas	-20 a 140 °F
Repetibilidad	≤0.2%
Resolución	≤0.01pie/seg
Precisión	1.0%
Suministro de energía	12 /24 VDC
Tiempo de respuesta	1 actualización por segundo
Tramo recomendado de tubería recta	10D corriente arriba, 5D corriente abajo

MEDIDOR DE GAS MODELO G₄

Este medidor posee un mecanismo de inserción que hace posible insertar o retirar los transductores aún con alta presión del gas sin interrumpir el flujo. El mecanismo de inserción y/o retiro usado en el G₃ y G₄ fue diseñado para proporcionar una instalación fácil y precisa de los transductores ultrasónicos en las tuberías presurizadas con gas.

CARACTERÍSTICAS.

- Fácil de operar con mecanismo hidráulico.
- Puede usarse en ambientes encerrados.
- La profundidad de inserción es ajustable con precisión.
- El alineamiento del transductor es ajustable.
- El mecanismo de inserción, la unidad selladora y el ensamble del transductor están unidos.
- Servicio y mantenimiento fácil.
- Un amplio rango de aplicación.
- Costo mínimo con la instalación hot-tapped.

ESPECIFICACIONES	MEDIDOR G ₄
Rango de presión.	220 a 1,475 lb/pg ²
Rango de velocidad.	-100 a 100 pie/seg
Diámetro de tubería.	8 a 64 pg
Temperatura del gas.	-20 a 140 °F (capacitado para mayores)
Repetibilidad.	≤0.2%
Resolución.	≤0.01% pie/seg
Precisión.	±1.0
Suministro de energía.	24 VDC ó 110/230 VAC

Tiempo de respuesta.	1 actualización por segundo
Tramo recomendado de tubería recta.	10D corriente arriba, 5D corriente abajo

MEDIDOR DE GAS MODELO G₅.

Este es un medidor de gas para tuberías desde 4 hasta 36 pg. Tiene un par de transductores completado con un sistema electrónico para la medición y el control, ambos montados en el carrete o cuerpo del medidor "spool-piece". Los transductores van ubicados en el carrete en posiciones predeterminadas desde donde transmiten los pulsos que serán reflejados en la pared opuesta.

La frecuencia de la transmisión de los pulsos va de 20 a 60 veces por segundo, dependiendo del diámetro de la tubería.

APLICACIONES.

- Almacenamiento subterráneo del gas natural.
- Control del compresor.
- Detección de goteo en la tubería.
- Control de procesos.
- Medición del flujo másico del gas.
- Medición digital del gas.
- Monitorear la eficiencia del compresor.
- Medición de verificación.
- Comparación de sistemas de medición.

VENTAJAS.

- Capacidad de medir flujo bidireccional.
- Alta repetibilidad.
- Sin obstruir la tubería.
- Mide con precisión el flujo de pulsos.
- Sin caídas de presión.
- Amplio rango de aplicación.
- Insensible a las variaciones de presión.
- No requiere recalibración.
- Mide flujos muy bajos.
- No tiene partes móviles.
- Insensible a los depósitos.

Casi todos los medidores de gas son muy sensibles a las partículas de arena y residuos de líquidos en la tubería. Este tipo de medidor es altamente

inmune a los efectos de estos depósitos, debido al uso de la técnica digital de pulsos. Tiene una alta precisión y repetibilidad, ambas se comportan linealmente idénticas, aún a velocidades de flujo cero.

ESPECIFICACIONES	MEDIDOR G ₅ .
Rango de presión.	15-300, 250-2,160, 300-6,000 lb/pg ²
Rango de velocidad.	-100 a 100 pie/seg
Diámetro de tubería.	4 a 36 pg
Temperatura del gas.	-20 a 140 °F disponibles más altos
Repetibilidad.	≤0.2%
Resolución.	≤0.01 pie/seg
Precisión	±1%
Suministro de energía.	12/24 VDC ó 110/210 VAC
Tiempo de respuesta.	1 actualización por segundo
Tramo reconducido de tubería recta.	10D corriente arriba, 5D corriente abajo

MEDIDOR DE GAS MODELO G₆.

Este modelo fue diseñado especialmente para satisfacer los rigurosos requerimientos de precisión y exactitud en la medición de transferencia de custodia, usando una configuración multitrayectoria. Con el uso de la técnica de procesamiento de señales (ADTT), el análisis de los pulsos ultrasónicos proporciona una medición bidireccional y con una precisión del 0.5% cuando la velocidad del fluido está dentro del rango de 2 a 100 pie/seg. El modelo G₆ está diseñado para ensamblar los carretes "spool piece" en la línea en tuberías desde 6 hasta 42 pg. Este medidor fue diseñado para cumplir y superar los requerimientos del Reporte No. 9 de AGA y están probados para la transferencia de custodia en Europa.

El medidor G₆ usa tres o cinco trayectorias de medición (pares de transductores), dos trayectorias de doble reflexión y una sencilla. La combinación de trayectorias y su configuración característica se utilizan para medir y determinar los efectos del flujo y su turbulencia en la tubería.

VENTAJAS.

- Esta única malla que forman las trayectorias ultrasónicas asegura considerar la turbulencia y los componentes del perfil del flujo en una sección de la tubería.
- La medición es independiente de la orientación del medidor con respecto a la tubería.
- Son aproximadamente seis veces más largos en sus trayectorias, pero esto favorece una mejor precisión en la medición de la velocidad.

CARACTERÍSTICAS.

- No tiene partes móviles.
- Amplio rango de aplicación.
- No obstruye el flujo.
- Bajos costos de adquisición.
- Sin caída de presión.
- Capaces de manejar flujo bidireccional con igual precisión.
- Insensible a variaciones de presión.
- No requiere recalibración.
- Insensible a la contaminación.

APLICACIONES.

El medidor G₆ ha sido utilizado exitosamente en las siguientes aplicaciones.

- Medición en la transferencia de custodia.
- Almacenamiento subterráneo de gas natural.
- Control en la compresión del gas.
- Plantas de procesamiento de gas.
- Estaciones de regulación y medición.
- Medición precisa del gas en procesos industriales.
- Medición del gas consumido y quemado en plantas generadoras de energía "power stations".
- Verificación del medidor convencional en la transferencia de custodia.

ESPECIFICACIONES	MEDIDOR G ₆
Rango de presión	15-300, 250-2,250, 300-6,000 lb/pg ²
Rango de velocidad	-100 a 100 pie/seg
Diámetro de tubería.	6 a 42 pg
Temperatura del gas	-20 a 176 °F
Repetibilidad	≤0.2%
Resolución	≤0.01 pie/seg
Precisión	±0.5%
Alimentación de energía	12/24 VDC ó 110/230 VAC
Tiempo de respuesta	1 actualización por segundo
Tramo recomendado de tubería recta	10D corriente arriba, 5D corriente abajo

MEDIDOR DE GAS MODELO G₇.

Este modelo es un medidor ultrasónico utilizado para el gas enviado a quemador en tuberías desde 4 pg y mayores. Su sistema consiste de dos transductores piezoeléctricos, instalados mediante el método de hot-tapped y un SPU que calcula el flujo.

CARACTERÍSTICAS.

- Tiempo rápido de respuesta.
- Mediciones en flujo bidireccional.
- No tiene partes móviles.
- Amplio rango de aplicación y operación.
- No requiere ajuste o calibración.
- Programable en campo con los parámetros del lugar.
- Diagnostica su servicio.
- Interfases analógicas y digitales.
- Alta precisión a bajas velocidades.
- Diseñado para colocarse mediante el método de hot-tapped.
- Para tuberías de 4 pg y mayores.
- Diseño compacto.
- Consume poca energía.
- Opción de energía solar.
- Instalación simple.

ESPECIFICACIONES	MEDIDOR G ₇
Rango de presión	0 a 225 lb/pg ²
Rango de velocidad	-100 a 100 pie/seg
Diámetro de tubería.	Desde 4 pg y mayores
Temperatura del gas	-22 a 176 °F
Tiempo de respuesta	1 actualización por segundo
Precisión	±1.0%
Repetibilidad	≤0.2 %
Resolución	0.001 m/seg
Suministro de energía	24 VDC

MEDIDOR DE GAS MODELO G₈.

Utiliza seis trayectorias de medición en cuatro planos paralelos para medir el flujo sin importar el perfil ni la interferencia. Mide la velocidad media del flujo a lo largo de las trayectorias acústicas y el gasto calculado es con una precisión del orden de ±0.5%. Este modelo ha sido sometido a pruebas por parte de reconocidas instituciones, tal como GW, RL, RP, SRI y BGBA.

Aunque llegaran a presentarse fallas en alguna de las trayectorias de medición, el medidor mantendrá su precisión dentro del ±1%. Se puede cambiar alguno de los seis pares de transductores sin interrumpir el flujo.

Este medidor por su peso y tamaño es hasta un 60% más barato con respecto a los convencionales de turbina y orificio. Fue desarrollado especialmente para aplicaciones bidireccionales en transferencia de custodia. Los diámetros disponibles son desde 6 hasta 42 pg.

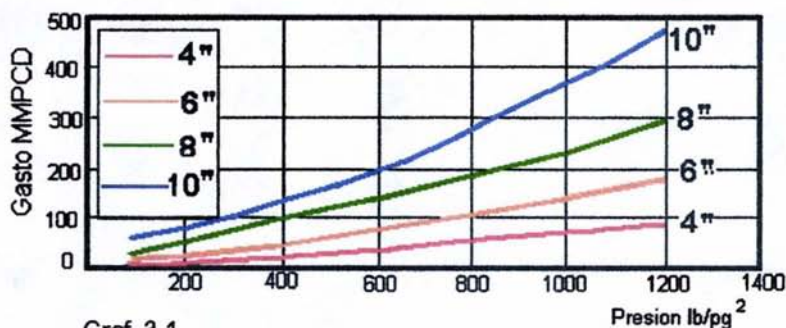
ESPECIFICACIONES	MEDIDOR G ₈
Rango de presión	145 a 2,900 lb/pg ²
Rango de velocidad	1.3 a 75 pie/seg (0.4 a 23 m/seg)
Diámetro de tubería.	6 a 42 pg
Temperatura del gas	-4 a 158 °F (-20 a 70 °C)
Rango temperatura ambiente	-49 a 140 °C (-45 a 60 °C)
Precisión	±0.5%
Repetibilidad	±0.2 %
Aplicación	Gases secos a alta presión
Suministro de energía	110/120, 220/240 VAC ó 12/24 VDC

Material de construcción.

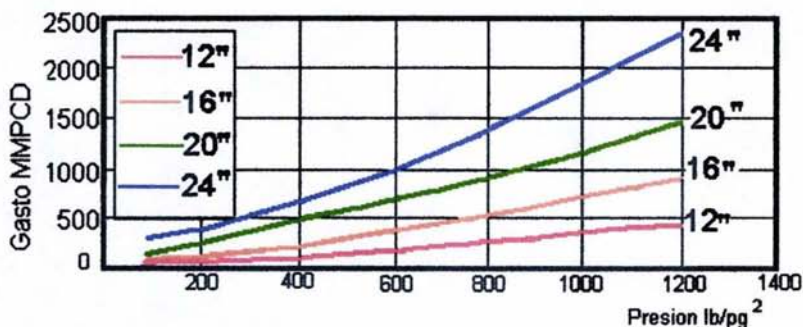
- Carrete: carbono acerado "carbon steel"
- Transductores: titanio.

MEDIDOR DE GAS MODELO G₉.

Este modelo está diseñado para operar en un rango de velocidades desde unos cuantos pies por segundo hasta 100 pie/seg. Las gráficas 3.1 y 3.2 (también de DN) ayudan a convertir la velocidad en gasto en función de la presión.



Graf. 3.1



Graf. 3.2

APLICACIONES.

- Gases húmedos.
- Verificación de mediciones.
- Almacenamiento.
- No en transferencias de custodia.

MEDIDOR DE GAS MODELO G₁₀

El medidor requiere de un tramo de 20 D de tubería recta corriente arriba y 5 D corriente abajo para lograr la mejor precisión. Para aplicaciones bidireccionales se requieren 20 D en ambas direcciones.

ESPECIFICACIONES	MEDIDOR G ₁₀
Rango de presión	0 a 2500 lb/pg ²
Rango de velocidad	3 a 100 pie/seg
Diámetro de tubería.	4 a 24 pg
Temperatura del gas	-5 a 185 °F
Suministro de energía	115/230 VAC ó 24 VDC
Diámetro de medidores	4 a 24 pg
Rango temperatura ambiental	-40 a 140 °F

3.6 CONDICIONES DE OPERACIÓN.

Las condiciones de operación de los medidores ultrasónicos las especifica detalladamente el fabricante.

Los transductores ultrasónicos usados en la medición ultrasónica requieren un mínimo de la densidad del gas (como función de la presión) para asegurar el acoplamiento acústico de los pulsos del sonido y del gas. Por esta razón, el fabricante especifica la presión de operación mínima requerida, así como la presión de operación máxima.

El rango de la densidad de operación lo especifica por catálogo el fabricante.

Si algo de lo siguiente sucediera, se debe consultar al fabricante:

- Atenuaciones de la onda acústica debido a niveles de bióxido de carbono superiores al 10%.
- Operación cercana a la densidad crítica de la mezcla del gas natural.
- Que el nivel total de sulfuros exceda los 20 granos por cada 100 pies cúbicos. (aproximadamente 320 ppm)

Los medidores ultrasónicos operan en un rango de temperatura del flujo de -13 °F a 131 °F (-25 °C a 55 °C), que normalmente es el rango de temperatura ambiental y que aplica para el cuerpo del medidor con y sin flujo, para el transductor y los cables. Si las condiciones ambientales fueran superiores a las especificadas, el fabricante las condicionará.

La presión de operación máxima de diseño del medidor debe ser la más baja de la presión de operación máxima de diseño de lo siguiente: cuerpo del medidor, pestañas, conexiones del transductor y sus ensambles.




Tanto la presión como la temperatura, así como la composición de los hidrocarburos, ejercen una influencia permanente en la precisión de la medición de los medidores ultrasónicos.

Los medidores ultrasónicos deben reunir los siguientes requerimientos para garantizar una aceptable precisión en la medición del gasto en los rangos de presión y temperatura de operación, así como en el de la composición de los hidrocarburos, sin tener que hacer algún ajuste manual.




Cada medidor ultrasónico con transductores y válvulas de aislamiento del transductor es sometido por su fabricante, primero a pruebas de fabricación, que es la prueba de fuga "leakage test" y después, a pruebas de medición, como por ejemplo la "calibración al flujo". La prueba de fuga se realiza con un gas inerte, Nitrógeno por ejemplo. La presión de la prueba debe estar como mínimo a 200 lb/pg², durante un tiempo mínimo de 15 min.

El diámetro interno promedio del medidor ultrasónico se calcula de un total de 12 mediciones del diámetro interno. Se realizan tres mediciones en cada una de las siguientes posiciones:

Mediciones.

-  En el plano vertical.
-  En el plano horizontal.
-  Dos en planos aproximadamente a 45°.

Posiciones.

-  Cerca del asiento del transductor corriente arriba.
-  Cerca del asiento del transductor corriente abajo.
-  Al centro de los dos transductores.

Con estas mediciones realizadas, el fabricante documenta el diámetro D del medidor, la longitud L de cada trayectoria acústica y la distancia X entre los pares de transductores.

Si las longitudes de las trayectorias acústicas o las distancias entre los pares de transductores no se pueden medir directamente, entonces estas distancias se calculan aplicando la trigonometría.

Estas mediciones y calibraciones deben estar documentadas en un certificado, con el nombre del fabricante del medidor, modelo, número de

serie, temperatura de operación, fecha y nombre de la persona que hizo el trabajo.

Para verificar el tiempo de tránsito en el sistema de medición de cada medidor, el fabricante realiza una prueba de verificación de "flujo cero".

Para realizar la prueba de verificación de flujo cero, el cuerpo del medidor estará sujeto por los collarines ciegos, el medidor estará purgado con cualquier aire y presurizado con gas o una mezcla de gases. La selección del gas de prueba es responsabilidad del fabricante, así que también documenta sus propiedades acústicas.

La presión y temperatura del gas estarán estabilizadas al iniciar la prueba. Para cada trayectoria acústica se registra la velocidad del flujo cuando menos durante 30 seg. Se calcula la velocidad media del flujo y la desviación estándar para cada trayectoria acústica.

Todas las partes internas del medidor que estarán en contacto con el flujo, (mojadas por el flujo) deben ser compatibles con la corriente y afines a los fluidos.

Las partes externas del medidor deben ser fabricadas de materiales anticorrosivos o sellados con una capa resistente a la corrosión apropiada para el uso en atmósferas normalmente encontradas en la industria petrolera.

El material de fabricación de los medidores es común al de las clases de tubería ANSI clase 300, 600 y 900. Para cada clase ANSI y diámetro, el fabricante proporciona sus normas para el cuerpo del medidor y pestaña.

El medidor ultrasónico debe tener el mismo diámetro interno que la tubería adyacente con $\pm 1\%$ de error. Para las aplicaciones bidireccionales, en ambos casos, el medidor debe considerarse corriente arriba.

3.7 CONECTORES DEL TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO.

El flujo puede contener algunas impurezas, como aceites ligeros y condensados, así que los conectores del transductor son diseñados de tal manera que reducen la posibilidad de la acumulación de sólidos y líquidos en ellos.

Los depósitos (condensados o indicios de aceite mezclado con arena o tierra) debido a que reducen el área de sección transversal de la línea, pueden afectar la precisión del medidor. Los depósitos también pueden reducir u obstruir las ondas ultrasónicas emitidas de un transductor a un receptor ultrasónico.

El medidor puede ser equipado con válvulas y mecanismos adicionales, de tal manera de hacer posible una reposición del transductor sin depresionar el medidor. En ese caso, puede requerirse de una válvula de alivio adicional para el aislamiento del transductor.

El sensor que mide la presión se puede ubicar en la cima del medidor. Así que, el incremento en la presión puede indicar al operador cuando darle mantenimiento.

3.8 REQUERIMIENTOS DEL MEDIDOR.

El cuerpo del medidor y todas sus partes, así como sus componentes electrónicos externos, deben estar diseñados y construidos de materiales apropiados para las condiciones de servicio en las que operará en su instalación.

El diseño de los medidores es de tal forma que el cuerpo del medidor no debe rodar cuando se descansa en superficies inclinadas hasta con un 10%. Esto es para prevenir daños a los transductores, pestañas y al SPU cuando el medidor se pone temporalmente en tierra durante su instalación o en los trabajos de mantenimiento. Su diseño también considera una fácil y segura maniobra durante su traslado e instalación. Es suministrado con correas para cargarse y transportarse.

El fabricante proporciona las especificaciones generales de sus transductores ultrasónicos, tales como las dimensiones, máxima presión admisible de operación, rango de presión y temperatura de operación y las limitantes de la composición del flujo. También especificará la presión mínima de operación aplicable a cada modelo de transductor ultrasónico, las condiciones supuestas de operación y el tamaño del medidor ultrasónico. Esta mínima presión de operación deberá estar marcada o etiquetada en el cuerpo del medidor para prevenir al operador y al personal de campo cuando el medidor no pueda registrar flujo al abatirse la presión.

El fabricante prueba cada transductor o par de transductores y los resultados los documenta como parte del programa de seguridad de los medidores. Cada transductor está marcado o etiquetado con un número de serie y se proporciona con datos de información general de él. Cada transductor o par de transductores también se suministra con los documentos de la información específica de la prueba de calibración, y el método usado.

La prueba de "calibración al flujo" es otra prueba a la que se somete un medidor ultrasónico por su fabricante. Para realizar esta prueba se recomienda cuando menos someterlo a los siguientes gastos: $Q_{\text{mínimo}}$, $0.10 Q_{\text{máximo}}$, $0.25 Q_{\text{máximo}}$, $0.40 Q_{\text{máximo}}$, $0.70 Q_{\text{máximo}}$ y $Q_{\text{máximo}}$.

El medidor requiere para su buen funcionamiento, una combinación de 10D de tubería corriente arriba y 3D corriente abajo para lograr la precisión deseada. Si el medidor se encontrara expuesto a los rayos solares u otras temperaturas extremas, se deberá aislar 3D corriente arriba y 2D corriente abajo. Para mediciones en ambas direcciones, se deben dejar 10D de tubería recta en ambas direcciones y aislarse igualmente 3D si el medidor está expuesto al sol.

3.9 MARCACIÓN “NAMEPLATE” DEL MEDIDOR.

El medidor tiene una placa fijada al cuerpo que contiene la siguiente información:

- El fabricante, número de modelo, número de serie y mes y año de fabricación.
- Tamaño del medidor, clase de pestañas y peso total.
- Diámetro interno.
- Máxima y mínima temperatura de depósito.
- Material del cuerpo y de pestañas.
- Máxima presión de operación y rango de temperatura.
- Máximo y mínimo flujo por hora.
- Dirección del flujo positivo.

CAPÍTULO 4

RECOMENDACIONES AGA PARA LOS MEDIDORES ULTRASÓNICOS DE MULTITRAYECTORIA. REPORTE AGA No 9

Este reporte se publicó como una práctica recomendada y no como un estándar. Proporciona criterios generales para la medición de gas con medidores ultrasónicos multitrayectoria, los cuales deben cumplir o exceder la precisión, así como los requerimientos funcionales y de prueba especificados en este reporte, y los usuarios deberán seguir las recomendaciones de instalación aplicables.

El reporte es el resultado acumulado de años de experiencia, de muchos individuos y organizaciones involucrados en la medición de gasto de gas.

4.1 ALCANCE.

El reporte se desarrolló para medidores de flujo ultrasónico de tiempo de tránsito de multitrayectoria, Fig. 4.1, típicamente de 6 pg de diámetro y mayores utilizados para la medición de gas natural. Los medidores ultrasónicos multitrayectoria tienen al menos dos pares de transductores independientes de medición (trayectorias acústicas). Las aplicaciones típicas incluyen la medición de grandes volúmenes de gas en las instalaciones de producción, líneas de transmisión, instalaciones de almacenamiento, sistemas de distribución y sistemas de medición para grandes usuarios.

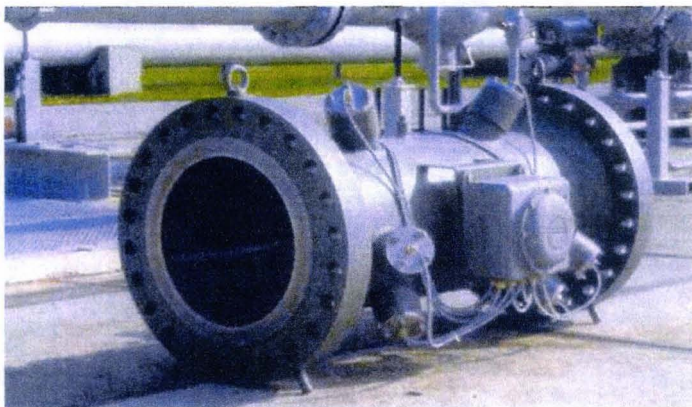


Fig.4.1 Medidor ultrasónico de flujo de gas de 5 trayectorias modelo G₆.

4.2 PRINCIPIO DE MEDICIÓN.

Los medidores ultrasónicos multitrayectoria son medidores inferenciales con los que se obtiene el gasto volumétrico de gas a partir de la medición del tiempo de tránsito de una onda sonora de alta frecuencia. Los tiempos de tránsito se miden a partir de las ondas que viajan diagonalmente a través de la tubería corriente abajo con el flujo de gas y corriente arriba a contraflujo. La diferencia entre estos tiempos de tránsito se relaciona con la velocidad promedio del gas a lo largo de la trayectoria acústica. Para calcular la velocidad axial promedio del gas y el gasto volumétrico del gas a condiciones de flujo, se utilizan técnicas de cálculo numérico.

La precisión de un medidor ultrasónico de gas depende de varios factores, entre ellos:

- La precisión en la geometría del cuerpo del medidor y la localización de los transductores ultrasónicos.
- La técnica de integración implícita en el diseño del medidor.
- La calidad del perfil de velocidad, niveles de pulsación que existen en la corriente de gas y la uniformidad del gas.
- La precisión en las mediciones del tiempo de tránsito.

La precisión de las mediciones del tiempo de tránsito dependen de:

- La estabilidad del reloj electrónico.
- La detección consistente de las posiciones de referencia de la onda acústica.
- Compensación adecuada para las señales de los componentes electrónicos y transductores.

4.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN.

El medidor deberá cumplir con ciertas condiciones para operar dentro del rango deseado. Para lograrlo se debe considerar el contexto geométrico, mecánico y ambiental en el cual operará dicho medidor.

4.3.1 Calidad del gas

El medidor deberá operar, como requerimiento mínimo con cualquiera de los rangos normales de mezclas de gas natural especificados en el reporte número 8 de AGA. Esto comprende las densidades relativas entre 0.554 (metano puro) y 0.87.

El fabricante deberá ser consultado si se presenta cualquiera de los siguientes casos:

- Atenuación de la onda acústica por niveles de dióxido de carbono mayores al 10%.
- Operaciones cercanas a la densidad crítica de la mezcla de gas natural.
- Niveles de sulfuro totales que excedan las 320 ppm, incluyendo mercaptanos, ácido sulfhídrico y compuestos de sulfuro.

Los depósitos debido a las condiciones de operación normal de los gasoductos (condensados o trazas de mezclas de aceite con residuos de incrustaciones, suciedad o arena) pueden afectar la precisión del medidor al reducir el área de la sección transversal del mismo. Los depósitos también pueden atenuar u obstruir las ondas ultrasónicas emitidas y recibidas por los transductores ultrasónicos y en algunos diseños pueden ser reflejadas por las paredes internas del medidor.

4.3.2 Presiones

Los transductores ultrasónicos utilizados en los medidores ultrasónicos multirayectoria, requieren una densidad de gas mínima (que es una función de la presión) para asegurar el acoplamiento acústico del pulso del sonido emitido hacia y desde el gas. Por lo tanto, el diseñador deberá especificar la presión de operación mínima esperada, así como la presión de operación máxima.

4.3.3 Temperatura del gas y del ambiente

El medidor ultrasónico deberá operar en un intervalo de temperatura ambiental comprendido entre $-13\text{ }^{\circ}\text{F}$ y $131\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $55\text{ }^{\circ}\text{C}$). El diseñador también deberá especificar el intervalo esperado de temperatura del gas en operación.

El intervalo de temperatura del aire ambiente en operación deberá estar comprendido en el intervalo de $-13\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $131\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $55\text{ }^{\circ}\text{C}$). Este intervalo de temperatura ambiente aplica al cuerpo del medidor, tanto con flujo de gas como sin él, a sus dispositivos electrónicos instalados, a los transductores ultrasónicos, cables, etc.

El fabricante deberá establecer las especificaciones de temperatura del gas que fluye y del aire ambiente para el medidor ultrasónico multirayectoria, si es que éstas difieren de las indicadas anteriormente.

4.3.4 Consideraciones del Flujo de Gas

Los límites de la velocidad de flujo que pueden ser medidos por un medidor ultrasónico se determinan mediante la velocidad real del gas que fluye. El diseñador deberá determinar las velocidades de flujo de gas esperado y verificar que estos valores se encuentren dentro del $Q_{min.}$ y $Q_{máx.}$ especificados por el fabricante. Al diseñador se le previene con respecto a examinar cuidadosamente la velocidad máxima para el ruido y en lo que a seguridad del ducto concierne (erosión, vibraciones del termopozo, etc.)

4.3.5 Tuberías corriente arriba y perfil de flujo

La configuración de tuberías corriente arriba del medidor puede afectar negativamente el perfil de velocidad del flujo que llega al mismo, de tal manera que pueden presentarse errores en la medición. La magnitud del error, si se presenta, será función de la habilidad del medidor para compensar tales condiciones.

4.4 REQUERIMIENTOS DEL MEDIDOR.

Por diseño, el medidor junto con todas sus partes, debe contar con ciertas condiciones o capacidades para cumplir adecuadamente con su función.

4.4.1 Cuerpo del medidor

El cuerpo del medidor y sus partes, incluyendo las partes sometidas a presión y los componentes electrónicos externos, deberán diseñarse y construirse de material apropiado para las condiciones de servicio especificadas para el medidor, de acuerdo a los códigos y regulaciones aplicables a cada instalación de medición, especificada por el fabricante.

Los cuerpos de los medidores ultrasónicos se recomienda que sean fabricados para cumplir con alguna de las clases ANSI de tuberías y bridas (300, 600, 900, etc.). La máxima presión de operación de diseño del medidor está limitada por el menor valor de la presión de operación de los siguientes elementos: cuerpo del medidor, bridas, transductores y sus conexiones.

Se recomienda que las partes húmedas del medidor se fabriquen con materiales compatibles y afines a los fluidos que éste va a medir. Las partes externas del medidor se fabrican con materiales no corrosivos o materiales recubiertos con una capa resistente a la corrosión.

El agujero del medidor ultrasónico y el de la tubería adyacente deben ser del mismo diámetro interno, con $\pm 1\%$ de error. No deben tener salientes u obstrucciones. Para las aplicaciones bidireccionales, ambos extremos del medidor deberán considerarse "corriente arriba".

Dado que el gas natural puede contener impurezas (como aceite ligero o condensado) los puertos de los transductores deberán diseñarse de tal forma que se reduzca la posibilidad de que los sólidos o líquidos se acumulen en los mismos.

Al menos una de las tomas de presión deberá estar disponible para medir la presión estática en el medidor. El agujero de cada toma de presión, deberá ser cilíndrico y tener un diámetro de entre 1/8 y 3/8 pg. El borde del agujero en la pared interior del cuerpo del medidor deberá estar libre de rebabas. Para un cuerpo de medidor con paredes de espesor menor a 5/16 pg, el agujero deberá tener un diámetro nominal de 1/8 pg.

4.4.2 Transductores ultrasónicos

Los fabricantes deberán establecer las especificaciones generales de sus transductores ultrasónicos, tales como dimensiones críticas, máxima presión de operación permitida, rangos de presiones y temperaturas de operación y limitaciones en la composición del gas.

Una caída de presión repentina en un transductor ultrasónico puede provocar daño si un volumen de gas atrapado se expande dentro de éste. El fabricante deberá proporcionar instrucciones claras en caso de presentarse un represionamiento o una caída de presión brusca en el medidor y los transductores durante la instalación, arranque, mantenimiento y operación. Deberá ser posible el reemplazo o la relocalización de transductores sin un cambio significativo en el comportamiento del medidor.

4.4.3 Dispositivos electrónicos

El sistema electrónico de los medidores ultrasónicos incluyendo la fuente de poder, una microcomputadora, la unidad de procesamiento de señales "SPU" y los circuitos de excitación de los transductores ultrasónicos pueden encontrarse integrados en uno o más compartimientos en, o cerca del medidor.

Opcionalmente se puede tener una unidad remota que suministre la energía y una interfase para el operador que se conecta al SPU (Signal

Processing Unit) con cable multiconductor e instalarse en algún lugar lejos de peligro.

El SPU puede operar totalmente en las condiciones ambientales que se tengan y si se requiere cambiarlo, la reposición no significa cambios en las mediciones.

El sistema contiene una función temporizadora o reloj que asegura el restablecimiento automático en caso de que se presente una falla en el suministro de energía.

Algunos medidores operan con suministro de energía de baterías de 12V ó 24V de DC o con 120V ó 240V de AC. Existen también algunos modelos de medidores ultrasónicos que cuentan con la opción de operar con energía solar.

4.4.4 Requerimientos de operación

El fabricante del medidor ultrasónico proporciona por escrito para el operador, un procedimiento de la prueba de verificación de campo que permitirá asegurar que el medidor está funcionando apropiadamente. Estos procedimientos pueden incluir una combinación de la prueba de "flujo cero" y un análisis de la medición de la velocidad del sonido en cada trayectoria ultrasónica individual, inspección interna, verificación dimensional y algunas otras pruebas mecánicas o eléctricas.

El fabricante proporciona un análisis de incertidumbre para demostrar que el desarrollo de la verificación de las pruebas de campo es suficiente para evaluar el desempeño de las características eléctricas, mecánicas y físicas del medidor.

4.4.5 Pruebas

Los medidores ultrasónicos se someten a dos tipos de pruebas: de fabricación y de medición, pruebas de fuga y pruebas de flujo cero respectivamente.

El fabricante somete a prueba de fabricación cada uno de sus medidores para verificarlos antes de entregarlos. De los resultados de esta prueba elabora un reporte por escrito para el operador.

4.4.6 Pruebas de fuga

La prueba de fuga se realiza a los medidores ultrasónicos con la finalidad de verificar los parámetros de cada medidor. Los resultados de todas las pruebas realizadas a cada medidor se documentan en un reporte por escrito para el operador o personal de campo.

Las pruebas de fabricación realizadas a los medidores ultrasónicos se recomienda hacerlas con gas inerte, normalmente nitrógeno, a una presión mínima de 200 lb/pg² durante 15 minutos al menos.

Cada medidor ultrasónico, con sus transductores y válvulas de aislamiento (en el caso que se requieran), son sometidos a la prueba de fuga por el fabricante después del ensamble final y antes de enviarlos a las pruebas de medición (calibración al flujo en instalaciones de prueba "test facility")

4.4.7 Prueba de "flujo cero"

Se recomienda que durante la prueba, el operador verifique que el medidor mida "cero flujo" cuando no exista flujo a través de él.

Para verificar el tiempo de tránsito en el sistema de medición de cada medidor, el fabricante realiza una prueba de verificación de "flujo cero". Para esto el medidor estará purgado y presurizado con algún gas o aire o mezcla de gases. Las propiedades acústicas del gas de prueba deben ser conocidas y documentadas.

La presión y temperatura del gas deberán estar estabilizadas al principio de la prueba. Se miden y se registran las velocidades del gas para cada trayectoria acústica al menos cada 30 segundos. Se calcula la velocidad media del flujo y la desviación estándar para cada trayectoria acústica.

Los ajustes al medidor son necesarios para conducir su funcionamiento de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

Este ajuste es un factor de compensación para el "flujo cero", sus unidades pueden estar en pie/seg o m/seg. Este factor de compensación al flujo cero se aplica al gasto que mide el medidor. El uso de este factor es con el propósito de mejorar la precisión en las mediciones más bajas de la velocidad del flujo y por otro lado, que la precisión no sea afectada significativamente en las mediciones más altas de la velocidad del fluido. Este factor lo proporciona el fabricante.

4.4.8 Instalación

Existe una serie de recomendaciones para la instalación de los medidores ultrasónicos. Se tratarán sólo las más importantes.

4.4.9 Consideraciones ambientales

El fabricante proporciona las especificaciones de la temperatura ambiente para el medidor. La especificación considera si el medidor estará en sombra, en enfriamiento y/o calentamiento. El rango recomendado de temperatura de flujo es de -13 °F a 131 °F (-25 °C a 55 °C) aplicable al cuerpo del medidor, transductores y cableado.

Los medidores ultrasónicos no se deben instalar donde los niveles de vibración alteren la frecuencia natural del SPU, de sus componentes o transductores ultrasónicos.

El medidor no se debe de exponer a ninguna interferencia eléctrica innecesaria, como pueden ser los generadores de corriente alterna, solenoides o transmisiones de radio.

4.4.10 Configuración de la tubería

Algunas combinaciones de longitud de tubería recta con sus válvulas suelen ser inapropiadas, provocando distorsiones al perfil de velocidades a la entrada del medidor, ocasionando errores en la medición del flujo. La magnitud del error del medidor depende del tipo y severidad de la distorsión del perfil, producido por la configuración de la tubería corriente arriba, así como de la capacidad del medidor para compensar esta distorsión. Como la precisión del medidor puede verse afectada por la configuración planeada de la tubería corriente arriba, es necesario consultar al fabricante y revisar los últimos resultados de la prueba aplicada al medidor sobre efectos de instalación. Para obtener el funcionamiento deseado del medidor, quizá sea necesario modificar la configuración original de la tubería o incluir un acondicionador de flujo como parte del tubo medidor.

Para garantizar que el medidor se desempeñará dentro de los límites de precisión especificados, el fabricante recomienda hacer lo siguiente:

1. Cumplir con las recomendaciones de longitud de tubería recta corriente arriba y corriente abajo del medidor, ya sea con acondicionador de flujo o no, pero que no provoque un error adicional a la medición mayor al 0.3% debido a la configuración de la instalación. Este límite de error se aplica para cualquier flujo, comprendido entre Q_{min} y $Q_{m\acute{a}x}$.

2. Especificar la máxima perturbación al flujo permisible a la entrada del medidor, (por ejemplo, turbulencia intensa, perfil asimétrico de la velocidad, etc.), que no provoque un error adicional en la medición mayor al 0.3% debido a la configuración de la instalación. Este límite de error se aplicará para cualquier gasto entre Q_{\min} y Q_{\max} .

Se recomienda evitar totalmente los cambios de diámetros internos en la admisión del medidor ultrasónico o en la tubería adyacente corriente arriba, que provoquen disturbios locales al perfil de velocidades. El diámetro interno del medidor, collarines y la tubería adyacente deben tener el mismo diámetro interno o estar dentro del 1% de error, y ser alineados cuidadosamente para minimizar los disturbios al flujo. La soldadura interna del collarín debe estar suavizada o lijada. Durante su instalación se pueden usar 3 o más pernos con mango para aislar el collarín, en las posiciones de las 4:00, 8:00 y 12:00 hr. de un reloj de manecillas para conservar centrada la junta mientras se aprietan las tuercas.

Los acondicionadores de flujo pueden o no ser necesarios, dependiendo del diseño del medidor y de la severidad de algún disturbio en el perfil del flujo corriente arriba. Se recomienda consultar al fabricante para determinar los beneficios, si es que los hay, de instalar acondicionadores, dada la configuración de la tubería corriente arriba.

La orientación del medidor se determina consultando al fabricante, si es que el medidor tiene alguna orientación preferida para cierta configuración dada de tubería corriente arriba que se tenga conocimiento que produzca distorsiones al perfil del flujo.

4.4.11 Cálculo del gasto de gas

El gasto de gas a la salida de los medidores ultrasónicos normalmente está a condiciones de línea, por lo que se debe hacer una corrección para obtener el gasto a condiciones estándar. La función del cálculo de flujo, opcionalmente puede estar integrada, por el fabricante, en la Unidad de Procesamiento de Señales del medidor, SPU (Signal Processing Unit), que para el caso de los medidores multirayectoria poseen un sistema electrónico microprocesador.

Para cualquier otro requerimiento aplicable al cálculo del gasto, se deberá dirigir a las normas API de la "Flow Measurement Using Electronic Metering Systems", MPMS (Multipath Meter System) Capítulo 21.1. En este caso, el medidor debe considerarse como un medidor lineal.

El procedimiento para el cálculo del gasto utiliza ecuaciones similares a las descritas en el Reporte No. 7 de AGA, (Measurement of Gas by Turbine Meters), y se pueden resumir en las siguientes expresiones:

$$Q_b = Q_f (P_f / P_b) (T_b / T_f) (Z_b / Z_f) \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$V_b = \int Q_b dt \quad \text{Ec. 4.2}$$

- Q_b : gasto de gas a condiciones base.
 Q_f : gasto a condiciones de flujo.
 P_b : presión base, normalmente 14.73 psia.
 P_f : presión estática absoluta a condiciones de flujo.
 T_b : temperatura base, normalmente 519.67 °R.
 T_f : temperatura absoluta a condiciones de flujo.
 Z_b : factor de compresibilidad del gas a condiciones base.
 Z_f : factor de compresibilidad del gas a condiciones de flujo.
 V_b : volumen acumulado a condiciones base.
 \int : integral con respecto al tiempo.
 dt : integración por incrementos del tiempo, normalmente 1 segundo.

La primera ecuación, cuyas condiciones de presión, temperatura y compresibilidad están a condiciones de línea, convierte el gasto de gas a condiciones base. La segunda ecuación representa el proceso de acumulación en el que el gasto de gas a condiciones base es acumulado en volúmenes con respecto al tiempo.

4.4.12 Mantenimiento

Se sugiere que para el mantenimiento del medidor ultrasónico, el operador siga las recomendaciones del fabricante. El mantenimiento periódico puede ser tan simple como monitorear en el SPU algunas mediciones, como la calidad de la señal o la velocidad del sonido para cada trayectoria acústica. Por ejemplo, es posible que se detecte una acumulación de depósitos en las caras del transductor, midiendo la reducción en la intensidad del pulso ultrasónico recibido.

4.4.13 Pruebas de verificación de campo

Algunos aspectos de desempeño de las condiciones de los medidores ultrasónicos son evaluados por comparación de la velocidad del sonido que reporta el medidor, contra la velocidad del sonido derivada del Reporte No. 8 de AGA, "Detail Characterization Method Equation of State". Para hacer una comparación aceptable se requiere un análisis cromatográfico de una muestra tomada al tiempo que se mide la velocidad del sonido. Para mezclas de gas natural no es necesario un análisis extendido (más allá de C_6).

CAPÍTULO 5

APLICACIONES Y EVALUACIÓN DE LOS MEDIDORES ULTRASÓNICOS.

Aunque el sistema de medición ultrasónica es relativamente de reciente ingreso a la industria petrolera, se está expandiendo en el mundo como uno de los sistemas de medición de gas más confiable, duradero, seguro y barato.

La experiencia que se tiene de las aplicaciones en campo de este sistema de medición, tampoco es tan abundante; sin embargo, la que se tiene hasta hoy en día es indicadora de que pronto tendrá una aceptación contundente e inobjetable, en la práctica de la medición de gas en la industria petrolera.

Para poder hacer de los medidores ultrasónicos una evaluación justa y hablar de su situación actual, es necesario referirse a los sistemas de medición en general. Más que describir los sistemas de medición tradicionales utilizados en la industria petrolera, en este trabajo se hace alusión a ellos desde el punto de vista comparativo con los medidores ultrasónicos.

Existen muchos sistemas de medición utilizados en la industria petrolera, pero en este trabajo sólo se hace referencia a los medidores de turbina y a los de placa de orificio, que son los más utilizados por la industria para la medición de hidrocarburos gaseosos; con la finalidad de poder desarrollar el objetivo de este capítulo, haciendo la comparación de estos sistemas de medición, con respecto a los medidores de flujo por ultrasonido.

5.1 APLICACIONES A LA DETECCIÓN DE FALLAS DE LÍQUIDO.

La necesidad de detectar fugas sensibles de manera confiable en los ductos petroleros es quizá, la razón principal de que se haya desarrollado una técnica de medición ultrasónica, para enfrentar y solucionar este problema. Aunado a esto surge la imposición de los requerimientos regulatorios gubernamentales por las consideraciones ambientales. Una fuga del producto puede contaminar seriamente las aguas subterráneas y algunos productos crear el riesgo de fuego o inclusive de explosión. No solamente es necesario preservar el valor del producto en la línea, sino que es esencial detectar las fugas del producto, por preservación ambiental.

Por cuestión práctica, los medidores de flujo usados para este fin también deben resistir la corrosión frecuente de los abrasivos naturales en los mismos

líquidos, así como estar libres del servicio de mantenimiento durante largo tiempo. Sobre todo, sus calibraciones deben de permanecer estables y no ser propensas a cambiar debido al desgaste o a las propiedades variables del líquido. Dado que muchas tuberías fueron colocadas en su lugar antes de que la industria y el público tuvieran conocimiento de las consecuencias ambientales por las fugas de productos, es importante que los medidores de flujo se instalen fácilmente y sin alterar la operación del mismo ducto, tal como sucede en las corridas de diablos.

La técnica de medición de líquidos por ultrasonido, desarrollada para identificar y evaluar la magnitud de las fugas en las tuberías, ofrece un método práctico, efectivo y costeable, con aplicaciones marítimas y terrestres.

Requerimientos del sistema.

Estos requerimientos se pueden resumir de la forma siguiente, de tal manera que para una aplicación determinada, la selección del medidor se haga adecuadamente, ya que es el elemento vital en los sistemas de detección de fugas por ultrasonido.

- El medidor debe tener una exactitud intrínsecamente alta, así como mantenerla dentro de un amplio rango de condiciones de flujo; no estar sujeto a desgaste o cambio de calibración a través del uso.
- Deben ser de alta sensibilidad de detección de flujo, aún para valores cercanos al flujo "cero".
- Deben ser capaces de manejar fluctuaciones de flujo, e incluso manejar flujo invertido, "bidireccional".
- El sistema debe ser capaz de monitorear grandes longitudes de tubería y con un tiempo corto de respuesta, para detectar en segundos las fugas catastróficas.
- El sistema debe ser capaz de detectar las condiciones del ducto, y no ser afectado por líquidos corrosivos o abrasivos.

Este sistema de detección de fugas debe poder sensar la temperatura e "identificar" el tipo de líquido que está fluyendo. Para sensar la temperatura, la computadora de flujo mantiene un transductor "sensor" de temperatura, el cual está disponible ya sea de tipo convencional o termopozo. Identificar el líquido es también esencial para determinar su viscosidad y el Número Reynolds, el cual afecta en algún grado la operación de todos los medidores de flujo, suficiente para alterar la detección de pequeñas fugas si no es corregido. Además, el medidor de líquido utilizado en la detección de fugas tiene otros atributos únicos:

- El medidor debe ser compatible con los diferentes líquidos que pasarán por el ducto. Debe poder medir con exactitud cada tipo de líquido independientemente de sus propiedades físicas o químicas.
- El medidor no debe fallar o tener su tiempo de vida o confiabilidad afectados por las propiedades de los líquidos.
- La calibración del medidor no debe ser afectada adversamente por curvas o codos en la proximidad de la estación.
- El medidor requiere un mínimo de energía para su operación, de acuerdo con la disponible en lugares remotos.

Obviamente, muchos de estos atributos no los proporcionan los medidores de turbina u orificio. Sin embargo, los atributos de ambos medidores sí están incluidos en el perfil del medidor ultrasónico de líquidos.

El sistema de detección de fugas consiste de cierto número de estaciones en las instalaciones, máximo 64 y mínimo 3, (considerando una estación maestra), dependiendo del modelo, localizadas en puntos apropiados, tales como los cruces de ríos o instalaciones de almacenamiento. La estación maestra permite a las estaciones remotas ser asignadas a un solo ducto o a tantos ductos como se desee, con un mínimo de 3 estaciones por ducto; dos remotas y la estación maestra. La Fig. 5.1 muestra el sistema básico de detección de fugas, su enlace de comunicación, la interconexión entre la computadora del usuario y la estación maestra.

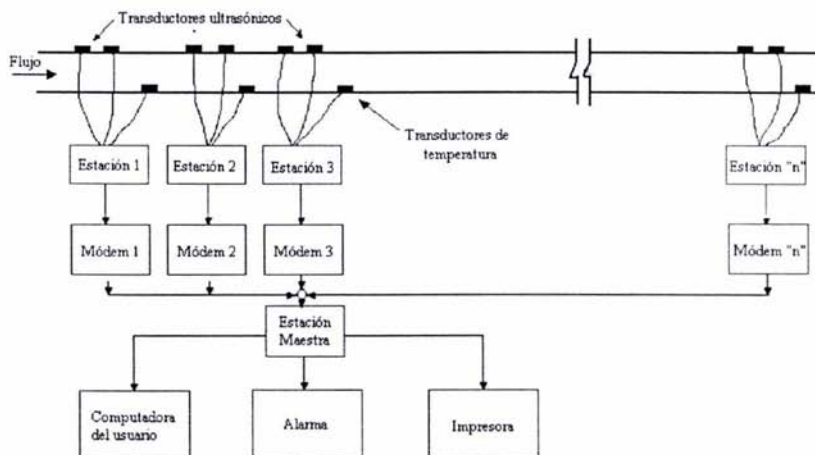


Fig.5.1 Sistema de detección de fugas de líquido.

La estación maestra tiene un sistema de línea compartida con cada estación remota, las cuales están equipadas con algún módulo de comunicación, tales como línea directa, radio módem, comunicaciones por

satélite, etc., obteniéndose una variedad de datos digitales necesarios para el cálculo preciso en caso de una fuga, tales como:

- Nombre de la estación remota.
- Flujo volumétrico por minuto.
- Flujo másico por minuto.
- Nombre del líquido en la estación remota.
- Temperatura del oleoducto / líquido.
- Velocidad de propagación sónica del líquido.
- Densidad del líquido.
- Intensidad de la señal.
- Indicación numérica del gas libre, desde 1 hasta 100%.
- Viscosidad del líquido.
- Número Reynolds.
- Estado de las alarmas.
- Dirección del flujo.
- Alarma de flujo alto/bajo.
- Indicador de interfase.
- Detección de diablos instrumentados.

La estación maestra calcula el balance neto efectivo del volumen y la masa entre cualquiera de dos estaciones remotas adyacentes, después de corregir factores, tales como el volumen de gas libre, línea de empaque, expansión/contracción del líquido y ducto y por la presencia de diferentes líquidos en cada una de las estaciones remotas, como podría ser el caso de un ducto multi-producto. Estas diferencias en balance están calculadas para 1, 5, 15 minutos y una hora de promedios balance, para detectar rápidamente fugas catastróficas y disminuirlas al mínimo posible. Además, la detección de fugas está automáticamente ajustada a las condiciones de la tubería para minimizar la posibilidad de una falsa alarma.

Dependiendo de las condiciones del ducto, se espera el funcionamiento listado a continuación:

Porcentaje estimado del índice de flujo en función del período de integración.

Tipo de sistema	1min.	5 min.	15 min.	1 hora
Alta precisión doble trayectoria	1.50	1.00	0.75	0.50
Precisión estándar doble trayectoria	2.00	1.50	1.00	0.75
Alta precisión trayectoria sencilla	3.00	2.00	1.50	1.00
Precisión estándar trayectoria sencilla	5.00	3.00	2.00	1.50

Debe notarse que este sistema es capaz, después de la optimización, de proporcionar resultados confiables para una transferencia de custodia precisa. Este sistema de medición ultrasónica se está usando en la transferencia de custodia de energía térmica de agua templada y caliente y para certificación del índice de energía nuclear que opera a 430 °F.

Existe un monitoreo constante de la viscosidad del líquido, ya que la intensidad de la señal se mide cada 10 segundos.

En la Fig. 5.2 se muestra la trayectoria sónica del haz ampliado del detector de fugas 990. El haz es inyectado por el transductor para que viaje axialmente bajo la pared del ducto. Mientras viaja "llueve" un haz amplio de energía sónica en la pared opuesta del oleoducto. Si el ángulo Φ de refracción del haz cambia con la variación de la velocidad de propagación sónica del líquido, el haz siempre cubrirá el transductor de recepción. Esto asegura la operación con todos los líquidos posibles.

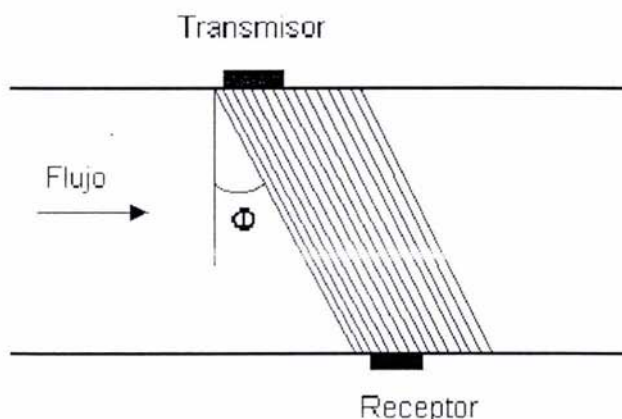


Fig.5.2 Trayectoria sónica del haz ampliado.

Las pruebas de comparación de este sistema se han hecho en forma relativa a los medidores de turbina. En la Fig. 5.3 se ilustra su funcionamiento. Ésta muestra un período de 12 y 33 horas, durante el cual el flujo del crudo, en un colector de transferencia de custodia de 4 pg estuvo controlado a índices de flujo, de 0 a 1150 bl/h. Para dos diferentes índices de flujo de 1150 y 970 bl/h, en ambos casos por separado, el medidor mostró una misma repetibilidad de 0.048 %.

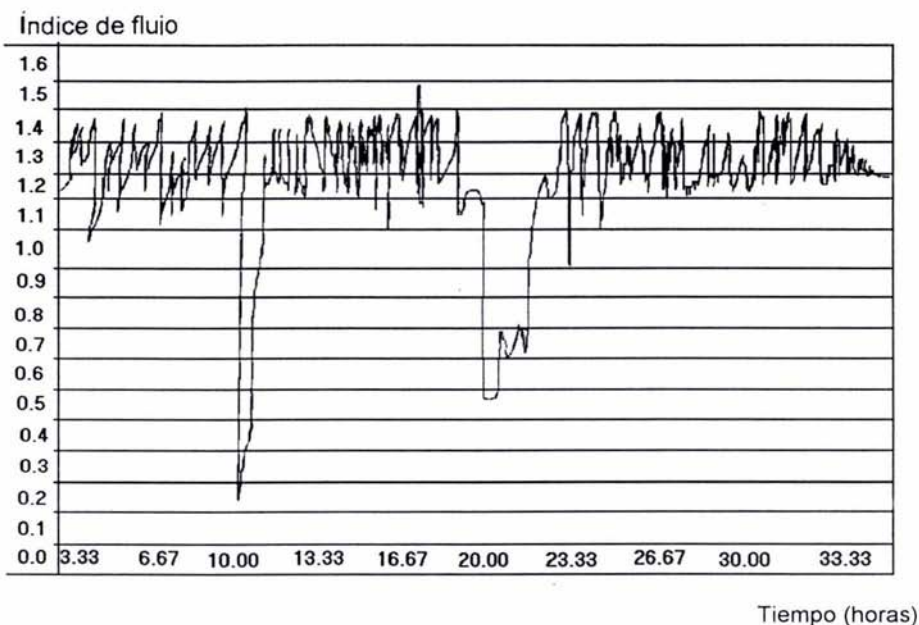


Fig. 5.3 Índice de flujo vs. Tiempo. Prueba de transferencia de custodia.

Este sistema de detección de fugas mide el tiempo de tránsito a través del líquido, además de que con la ecuación 5.1 se calcula fácilmente la velocidad de propagación sónica del líquido, v_s . Esta medición es esencial para la detección apropiada de fugas, ya que cada líquido que fluye en el ducto tiene una v_s característica con respecto a la temperatura. Esto permite al sistema, el cual tiene integrado un sensor de temperatura, identificar el líquido por "nombre", como se muestra en la Fig. 5.4, la cual muestra el comportamiento de la v_s con respecto a la temperatura para diferentes hidrocarburos líquidos, y revela qué tan diferentes son unos de otros.

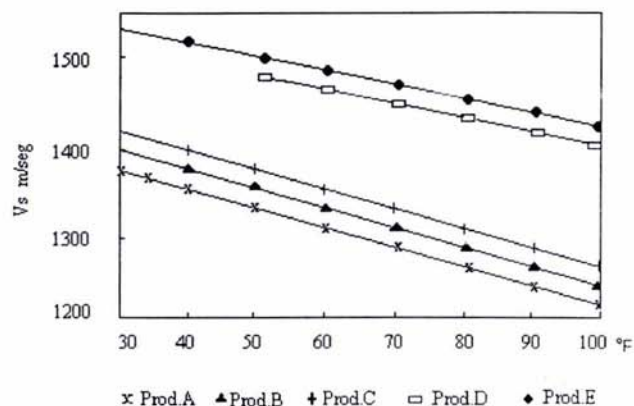


Fig. 5.4 Identificación sónica de hidrocarburos líquidos.

$$V_s = \frac{D}{t_D - t_U} \times \cos \Phi \quad \dots \dots \dots \text{Ec. 5.1}$$

Para determinar la densidad y la viscosidad del líquido y poder identificar previamente el líquido, en la estación maestra se cuenta con las siguientes gráficas que muestran el comportamiento de la densidad "γ" y la viscosidad "μ" con respecto a la temperatura, Figs. 5.5 y 5.6

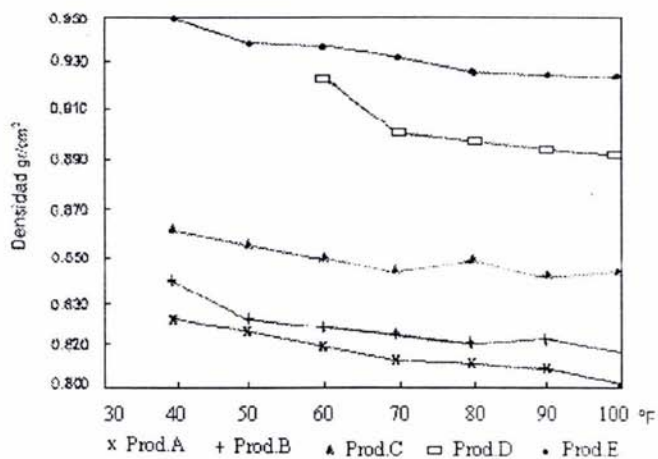


Fig. 5.5 Muestras de hidrocarburo sólido.

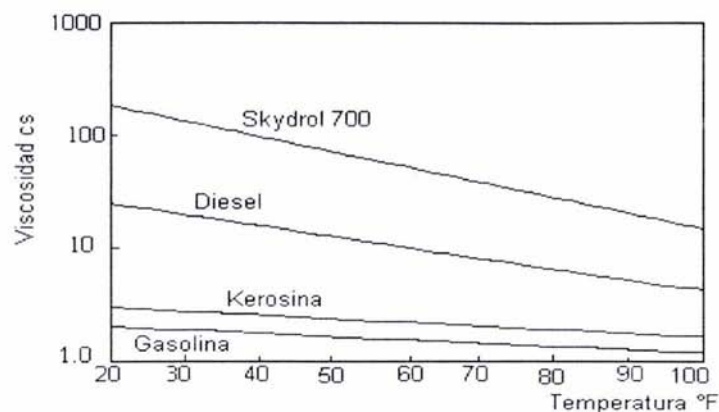


Fig. 5.6 Relación entre la viscosidad y la temperatura.

Además, existe una relación natural entre la densidad y la viscosidad como se muestra en la Fig. 5.7, la cual se usa para buscar otros parámetros. Es posible medir la viscosidad introduciendo en la tubería un medidor de viscosidad, de esta manera se elimina cualquier incertidumbre en esta medición.

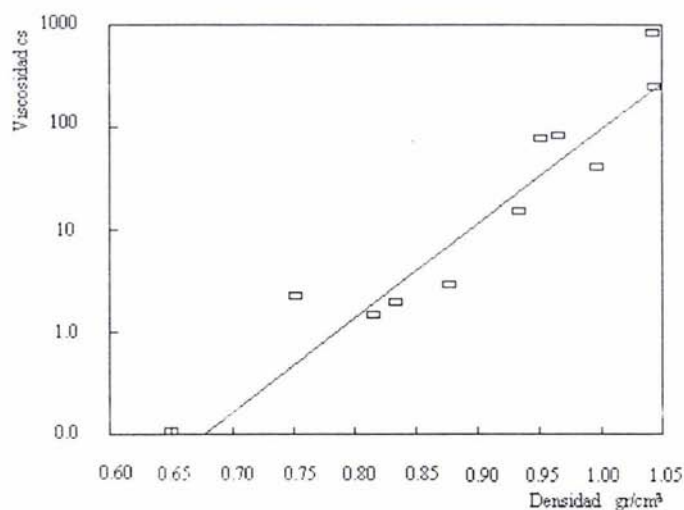


Fig. 5.7 Hidrocarburos líquidos.

Con el sistema de detección de fugas se monitorea la intensidad de la señal y la velocidad de propagación sónica " v_s " debido a la dispersión del haz

sónico causada por el gas libre. El gas libre se da con un número entre 1 y 100, que corresponde al porcentaje de gas libre.

La detección de agua en el petróleo está relacionada con sus diferentes velocidades v_s que poseen cada uno bajo circunstancias normales. Es decir, el efecto del agua en el petróleo es cambiar la v_s del petróleo, que se mide con seis cifras decimales. La v_s del líquido también está relacionada con la presión del líquido. La relación de v_s cambia un 2% aproximadamente por cada 1000 lb/pg². Las 6 cifras decimales con que se mide la v_s permite detectar la onda de presión que pueda crearse por una ruptura catastrófica, y mediante el análisis del comportamiento de v_s poder detectar esas fugas.

Para demostrar la confiabilidad de este sistema se realizó una prueba durante la entrega de producto desde un barco hasta la costa. Se instalaron dos medidores de trayectoria sencilla en un oleoducto de 30 pg entre el barco y la terminal de almacenamiento, aproximadamente una milla tierra adentro. El primer medidor se colocó a 90 m tierra adentro desde el muelle y el segundo medidor se colocó a 1600 m tierra adentro, inmediatamente antes, una válvula desviadora alimentaba un tanque de retención, seleccionado para permitir la medición de la cantidad real de la fuga simulada. El aceite fluyendo durante esta prueba fue crudo amargo de Venezuela.

Al final de la prueba, la cantidad de crudo desviado al tanque de retención fue de 2250 barriles, exactamente la cantidad del volumen que se detectó como fuga.

En México, se realizó otra prueba en un ducto marino de 8 pg en plataformas adyacentes en el Golfo de México, distantes aproximadamente 8 km una de la otra. Se colocaron 2 medidores de tiempo de tránsito de precisión estándar de trayectoria individual. Los datos fueron reportados por un enlace RS-232 cada 15 seg. Como no fue posible simular una fuga, el objetivo de esta prueba fue observar el rendimiento general del sistema y confirmar su capacidad íntegra sin falsa alarma. La duración de la prueba fue de 32 horas aproximadamente.

La evaluación de la capacidad de este sistema de detección de fugas puede hacerse a un costo mínimo al instalar sólo dos estaciones remotas y una estación maestra.

Además de detectar fugas, este sistema proporciona una variedad de información importante sobre las condiciones de la tubería y los líquidos que transporta. Esta información única ayudará sustancialmente en las operaciones del ducto y en reducir los costos de operación del mismo.

En la actualidad, para la medición de líquidos con ultrasonido se cuenta con diferentes diseños de medidores, como se muestra en el capítulo tres. Los hay para fluidos muy limpios "agua" y para fluidos extremadamente

sucios, como mezclas de gas-aceite-agua, para corrientes de líquidos con sólidos y burbujas de gas, que es muy común encontrar esto en flujos de dos fases.

5.2 APLICACIONES A LA MEDICIÓN DE LÍQUIDO.

Las pruebas de G y W realizadas en Holanda, demuestran que un medidor ultrasónico no es afectado por la contaminación de aceite sucio, en comparación con los medidores de orificio y de turbina, en los cuales, la presencia de aceite sucio ocasiona mayores errores de precisión en la medición. La experiencia demuestra que la contaminación con aceites sucios, viscosos y negros solamente afecta a los medidores ultrasónicos de trayectoria sencilla.

5.3 APLICACIONES A LA MEDICIÓN DE GAS.

En la estación de compresión Chandler, la compañía N A instaló en 1994, tres medidores ultrasónicos de gas de trayectoria sencilla, uno en una tubería de succión de 24 pg y los otros dos en tuberías de succión de 30 pg. Aunque la recomendación del fabricante es que se instalen como mínimo a 20 diámetros de tubería recta corriente arriba y a 10 diámetros de tubería recta corriente abajo, N A no los instaló a esta distancia recomendada. En las dos tuberías de 30 pg los colocó sólo a 3.15 diámetros corriente arriba y a 1.57 diámetros corriente abajo; [2.40 y 1.20 m, respectivamente], mientras que en la tubería de 24 pg las distancias fueron de 5.3 diámetros corriente arriba y 2.7 diámetros corriente abajo [3.20 y 1.60 m, respectivamente].

Los medidores de trayectoria sencilla se pueden instalar a alta presión, mediante el procedimiento de toma de muestras con línea viva "hot-tap". Así pues, no fue necesario que la compañía N A interrumpiera las operaciones para instalar las sondas en una tubería de 24 pg operando a 800 lb/pg² en la estación Chandler. La instalación de estos medidores se llevó sólo un día. Los medidores de orificio con cabezales, válvulas y tubería asociada puede llevarse semanas de instalación.

En 1992, N A instaló un medidor de gas de trayectoria sencilla de 16 pg en la estación de compresión de Malvern y en 1994 se instaló otro de 16 pg de multitrayectoria en la estación de compresión de Perryville.

En total, se instalaron ocho medidores ultrasónicos en distintas estaciones. Surgieron algunos problemas en siete de los ocho medidores instalados. En dos de ellos la fuerza de la señal fue inaceptable de acuerdo a las especificaciones del fabricante. Para solucionar este problema se instaló un amplificador de señal.

Otro problema que se tuvo en la estación Chandler fue que el fabricante entregó tres medidores sin el aislamiento correspondiente en las salidas

analógicas, por lo que el problema que se tuvo fue de aterrizaje que se solucionó poniéndoles el aislante.

En la estación Chandler se tuvo un problema más. En el medidor multirayectoria, del lado de la entrada del medidor se instaló un cabezal de succión que alimenta a varios compresores recíprocos. La descarga del medidor multirayectoria alimenta a la succión de una turbina del compresor. Sin embargo, cuando la turbina del compresor sale de servicio, el medidor ultrasónico (0 a 300 MMPCD) continúa indicando un pequeño flujo. Este problema se rastreó y se encontró que lo originaron las pulsaciones en la línea de succión causadas por los compresores recíprocos. Cuando se aisló el medidor dejó de indicar flujo cuando éste no existía.

La recolección de los datos se hizo por varios meses y se compararon con los obtenidos con los medidores de placa de orificio de 16 pg, colocados corriente abajo de la estación de compresión. A veces, la diferencia en porcentaje entre los dos sistemas de medición varió significativamente. Sin embargo, después de hacer las correcciones a las fallas encontradas, esta diferencia en porcentaje entre los dos sistemas de medición tendió a disminuir. Figs. 5.8 a 5.12

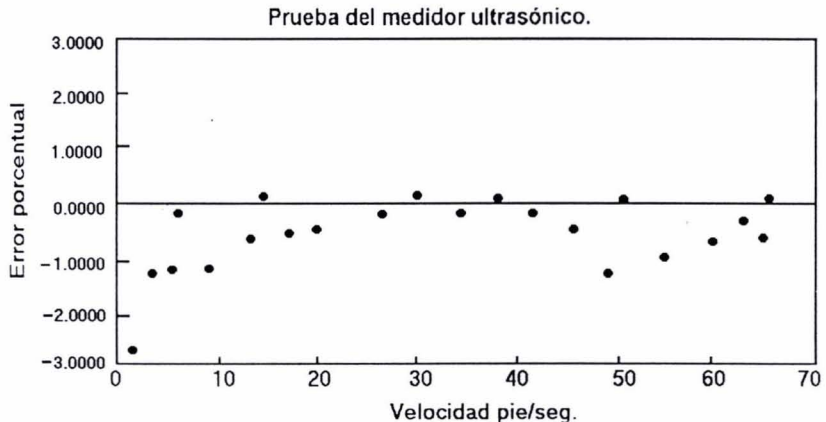


Fig. 5.8 Resultados de la prueba al medidor a 750 lb/pg² y 75 °F, con un acondicionador de flujo instalado a 10 diámetros del medidor.

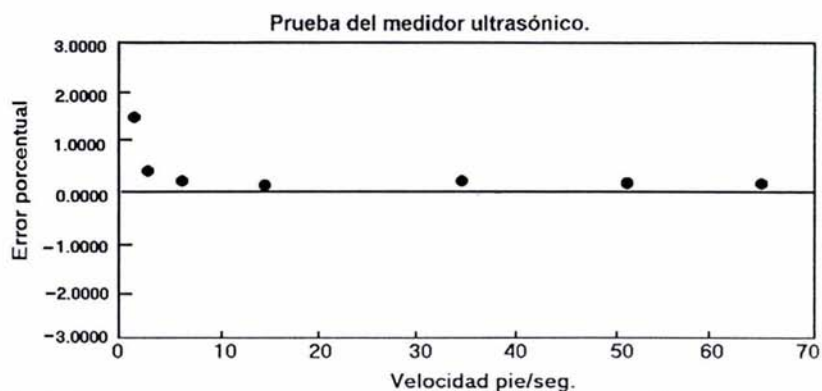


Fig. 5.9 Resultados de la prueba al medidor a 750 lb/pg² y 75 °F, sin el acondicionador de flujo instalado a 10 diámetros del medidor.

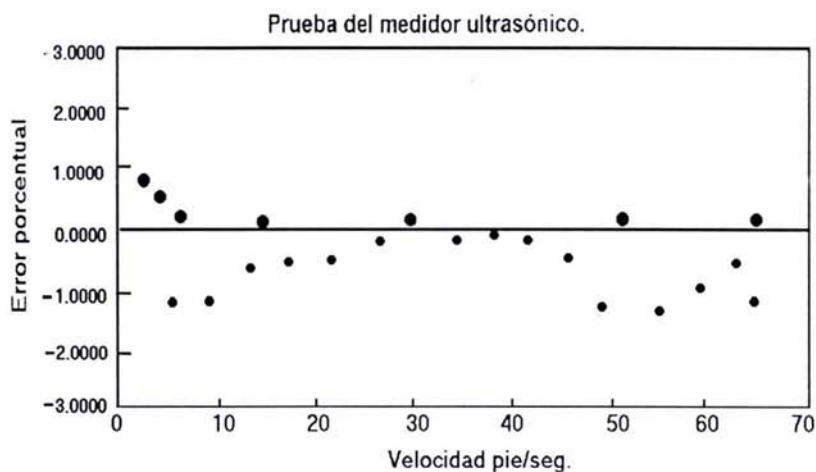


Fig. 5.10 Resultados de la prueba al medidor a 650 lb/pg² y 75 °F, con el acondicionador de flujo instalado a 10 diámetros del medidor.

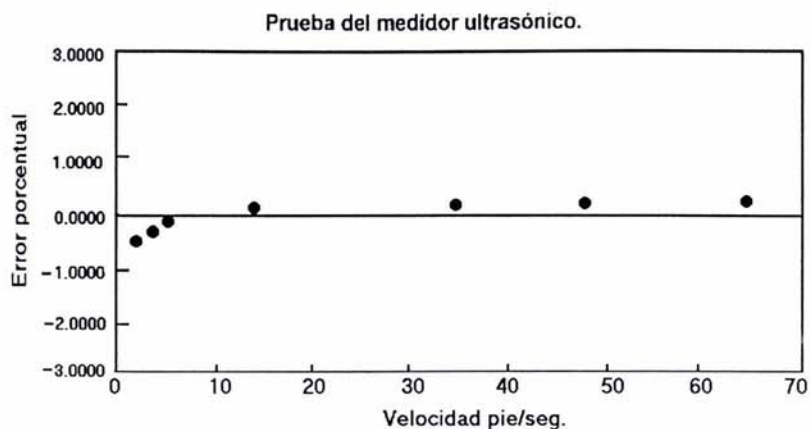


Fig. 5.11 Resultados de la prueba al medidor a 650 lb/pg² y 75 °F, sin el acondicionador de flujo.

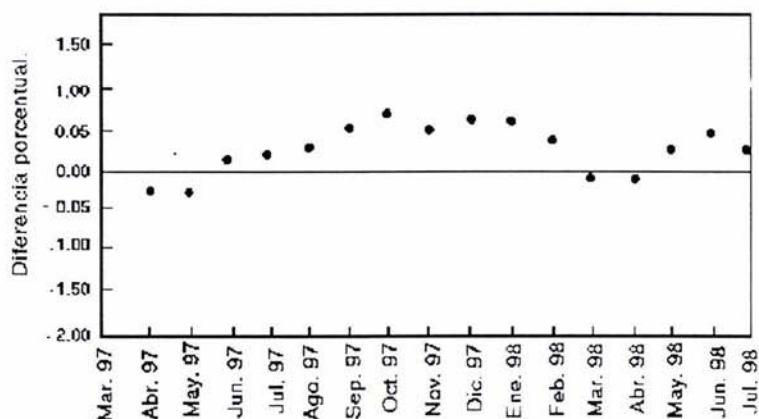


Fig. 5.12 Diferencia porcentual mensual entre los medidores. Los datos muestran una tendencia cercana al cero con una desviación positiva en 12 de los 16 meses.

Comparando los resultados de las mediciones de estos medidores ultrasónicos contra los de placa de orificio de 16 pg ubicados corriente abajo del compresor, la diferencia sólo fue del 1%.

Un medidor ultrasónico multitrayectoria puede alcanzar una precisión hasta del 0.5%, además de que puede manejar perfiles de flujo que el medidor de una trayectoria no puede. La compañía N A puso en Norteamérica su primera estación de medición ultrasónica multitrayectoria, en

la estación de compresión Perryville, con fines de transferencia de custodia. Fue puesta en servicio en 1994 a un costo aproximado de \$ 80,000.00 Dls.

Anteriormente se dijo que las compañías C G S S y PNMT, acordaron desarrollar conjuntamente un medidor ultrasónico. El resultado fue que desarrollaron medidores de una trayectoria y multitrayectoria. Al probar estos medidores se usaron transductores ultrasónicos en tomas de 2 pg y 100 khz. Un desarrollo posterior los condujo a un transductor más pequeño (200 khz) que se puede instalar en tomas de hasta 1 pg. Estos transductores más pequeños se recomienda usarlos en tuberías de 6 hasta 24 pg de diámetro, siempre y cuando la presión sea mayor a 50 lb/pg². Es decir, para tuberías menores a 30 pg de diámetro no se recomienda usar la configuración de la Fig.3.3 En su lugar, se puede usar un solo pulso ultrasónico, pero rebotado en la pared opuesta de la tubería, como se muestra en la Fig. 3.4. Esta forma de colocar los transductores tiene la ventaja de una doble trayectoria ultrasónica con sólo un par de transductores, así que también se tiene una doble diferencia del tiempo de tránsito, que mejora el tiempo de medición y por lo tanto, la precisión del medidor. Es recomendable hacer ambas tomas en la parte alta o cima de la tubería y no en sus costados. Esta configuración en conjunto con los transductores pequeños reducen el tiempo y costo de instalación.

Después de instalar las válvulas y las tomas en la tubería, el medidor normalmente puede ser instalado por dos hombres en un día de trabajo. El medidor no causa caída de presión y una vez que está en operación, no requiere de mantenimiento programado y operará indefinidamente sin atención.

Si el medidor se instala correctamente, puede determinar la velocidad del flujo o gasto, los tiempos de tránsito corriente arriba y corriente abajo y la longitud de la trayectoria ultrasónica. Para verificar que el medidor está midiendo correctamente la diferencia del tiempo de tránsito, se usa un osciloscopio. Se conectan los puntos de prueba en la consola y en la pantalla del osciloscopio aparecerán los pulsos ultrasónicos transmitidos y recibidos. La señal que se transmite se quedará estacionaria, pero la señal que se recibe parecerá que se mueve con el tiempo. En consecuencia, se observan dos señales diferentes recibidas, una, de la transmisión del pulso corriente arriba y otra de la transmisión del pulso corriente abajo. El espacio entre las dos señales recibidas en el osciloscopio, es la diferencia del tiempo de tránsito. Si esta diferencia coincide con la diferencia de tiempos indicada por el medidor, implica que la instalación del medidor está correcta.

Para verificar que la posición de los transductores en la tubería es adecuada, se usa la siguiente ecuación junto con las ecuaciones de estado para gas. Fig. 5.13

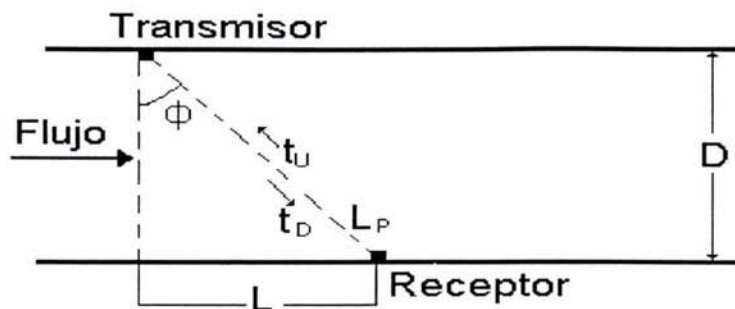


Fig. 5.13 Verificación de la posición de los transductores en la tubería. L_p es la hipotenusa del triángulo rectángulo de lados L y D .

$$c = \frac{L_p}{t} \dots \dots \dots \text{Ec. 5.2}$$

donde: c : velocidad del sonido en el gas.
 L_p : longitud de la trayectoria ultrasónica.
 t : tiempo promedio de tránsito. $(t_u + t_D) / 2$

Para verificar la trayectoria ultrasónica, L_p , primero se usa la ecuación 5.2 para determinar c . De la Fig. 5.13, L_p es la hipotenusa del triángulo rectángulo de lados L y D . El tiempo promedio de tránsito t se lee en la pantalla de la consola.

Posteriormente, se realiza un análisis cromatográfico del gas. Se recomienda que la muestra no sea tomada en el medidor, sin embargo puede ser representativa del gas que se está midiendo. La composición del gas, la presión y temperatura determinan la velocidad del sonido c en el gas, independientemente de los cálculos con la ecuación 5.2

Si la velocidad del sonido calculada con la ecuación 5.2 coincide con la velocidad del sonido que se determina con la composición del gas y las ecuaciones de estado, implica que es correcta la posición de los transductores en la tubería. Este método es útil y práctico para verificar en el campo el desempeño de los medidores ultrasónicos.

El propósito general de las pruebas de campo es demostrar el buen funcionamiento de los medidores ultrasónicos bajo una amplia variedad de condiciones ambientales reales. Específicamente, las pruebas son para

- Verificar los resultados obtenidos en el medidor prototipo.
- Demostrar la seguridad y durabilidad del medidor bajo condiciones reales de operación.
- Demostrar la repetibilidad del medidor a largo plazo.
- Establecer un factor para el medidor y determinar que es función del diámetro de la tubería o de su configuración.

El factor de corrección del medidor es la corrección o compensación debido a que el medidor por tener solo un par de transductores no puede medir la velocidad promedio en la sección transversal, solo puede medir la velocidad promedio a lo largo de la trayectoria ultrasónica.

En flujo turbulento, la relación entre la velocidad central y la velocidad real es mucho más cercana a 1.0 que para el flujo laminar. Como en las transmisiones de gas por tubería se tiene relativamente un alto Número Reynolds, (que depende de las variaciones del perfil de velocidades), se considera que existe flujo turbulento.

Para determinar el factor del medidor para cada lugar de prueba, se hizo una comparación de un volumen de 24 horas medido con los medidores convencionales y con los ultrasónicos. De esta manera se establecieron los factores de corrección para cada caso.

5.4 EVOLUCIÓN DE LOS MEDIDORES ULTRASÓNICOS.

Las primeras investigaciones realizadas para aplicar el ultrasonido a la medición de hidrocarburos, comenzaron a principios de la década de los ochentas con una alianza de tres compañías implicadas con este propósito.

En los últimos diez años se acrecentó la investigación en la medición ultrasónica. Diversas compañías se han empeñado en demostrar que este sistema de medición es de buena aceptación para aplicaciones de fiscalización y transferencia de custodia de hidrocarburos.

Para tal propósito, los medidores ultrasónicos se evalúan sometiéndose a un riguroso proceso de pruebas. Por ejemplo, en 1996, T G P C compró un medidor ultrasónico para someterlo a su evaluación. El medidor se calibró en San Antonio, Texas, en el Gas Research Institute "GRI". El medidor se instaló en una estación de medición ya existente, corriente abajo de tres medidores de placa de orificio.

Los resultados entre ambas estaciones de medición se compararon durante varios meses. Figs. 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12

Cuando se hace referencia a que los medidores ultrasónicos son sometidos a rigurosas pruebas de campo, es decir que tales dispositivos se prueban con hidrocarburos pesados y/o sucios y se compara su precisión y durabilidad contra la medición con placa de orificio.

Las compañías C G S S y PNMT, han colaborado conjuntamente por varios años en el desarrollo de un medidor ultrasónico de tiempo de tránsito para tuberías con gas natural. El primer prototipo que desarrollaron fue probado ampliamente como el mejor en la estación de medición de Columbia Gas Transmission. Con la cooperación conjunta se logró el desarrollo de los medidores ultrasónicos en distintas configuraciones, con trayectoria múltiple y sencilla.

La colaboración en conjunto de estas dos compañías dio como resultado que se instalaran en campo nueve medidores ultrasónicos, instalados en diferentes diámetros de tubería, en los Estados Unidos y Canadá.

El desarrollo de dos medidores ultrasónicos multitrayectoria de flujo de gas de 8 pg ha estimulado a los investigadores de las compañías operadoras en los campos de prueba canadiense, donde la transferencia de custodia es en duras condiciones ambientales, en las cuales los medidores se encuentran normalmente. Los medidores son evaluados en Alberta, Canadá, en Nova Gas Transmission's "NGTL", por un consorcio que realiza investigación y determina la capacidad para asegurar la confiabilidad y el costo efectivo, remplazando a los medidores de placa de orificio y turbina. El consorcio lo integran diversas compañías especializadas. Los medidores ya llevan operando más de un año con presencia de mezclas de líquido contaminante, tales como el glicol, alcohol y agua. Cuando funcionan adecuadamente, aun con gas pesado, los medidores ultrasónicos muestran un desempeño estable al compararlos con los de placa de orificio de 8 pg. El desempeño de los medidores bajo estas condiciones se ubicó a un 0.5% con respecto a la medición en el sistema de prueba "test facility" de Nova Gas Dynamic "GDTF".

Los medidores ultrasónicos de 8 pg son de los primeros hechos por la industria de la manufactura.

En el cuarto Simposio Internacional de la Medición de Fluidos, celebrado en Denver, Colorado, Estados Unidos, en Junio de 1999, se presentó un trabajo, parte de un juego de pruebas realizadas con el propósito de verificar que el desempeño de los medidores ultrasónicos está dentro de lo esperado y cae dentro de lo especificado en el Reporte No. 9 de A.G.A. "Measurement of gas by multipath ultrasonic meter". El desarrollo se inicia con medidores de 12 pg de la compañía DN, con cuatro tipos de acondicionadores de flujo comercialmente disponibles. Este trabajo fue patrocinado por el Gas Research Institute "GRI" realizando la prueba en su instalación de

investigación en medición, MRF "Metering Research Facility" y hecho en el Southwest Research Institute "SRI".

Los resultados de este trabajo indican que los acondicionadores de flujo pueden cambiar las tendencias del medidor, pero este cambio fue menor del 0.2%. El medidor se instaló a una distancia de 10 diámetros del codo de 90°. Los resultados sin acondicionador de flujo muestran cambios en la tendencia del error del medidor menores al 0.2%. Este resultado fue independiente de la orientación relativa del medidor y el codo, y estos resultados son tan buenos como los obtenidos con los acondicionadores de flujo.

En el National Engineering Laboratory "NEL" de Inglaterra, se han realizado investigaciones para evaluar y valorar potencialmente las técnicas desarrolladas en los diferentes diseños de medidores ultrasónicos, para determinar la magnitud de los efectos de instalación en la práctica, con el propósito de hacer uso de los medidores ultrasónicos para aplicaciones de fiscalización y transferencia de custodia en el Mar del Norte, resultando ser atractivos por varias razones, como por ejemplo:

- Un solo medidor ultrasónico con amplia rangeabilidad puede reemplazar a múltiples medidores convencionales.
- El uso de medidores no intrusivos evita las caídas de presión en los puntos de medición.
- Mejoran la eficiencia en la carga a buques cisterna mediante la reducción del tiempo de enganche "hook-up".
- Se pueden eliminar los requerimientos de mantenimiento y recalibración, basándose en condiciones de monitoreo.
- Reducen el trayecto de medición, eliminación de instalaciones considerablemente pesadas y ahorro de costos.

El modelo del perfil de velocidades en dos dimensiones se utilizó para evaluar una gran variedad de configuraciones de trayectorias y demuestra claramente la eficiencia relativa de los diferentes esquemas. El modelo de la distribución de velocidades en tres dimensiones se realizó usando un simulador en tres dimensiones (Computational Fluid Dynamic, CFD) y sus resultados se compararon con los de esta evaluación experimental. Los resultados experimentales comparados con los de la simulación CFD muestran que los efectos significativos de instalación ocurren 20 diámetros corriente arriba y abajo. En realidad, se consideran entre 20 diámetros corriente arriba y 10 diámetros corriente abajo, como valores entre lo perfecto y lo práctico, y dichos valores son suficientes para reducir los efectos de instalación en un nivel aceptable.

Las múltiples trayectorias ultrasónicas aseguran una máxima precisión en la medición y repetibilidad.

Otro fabricante de medidores ultrasónicos (DN) ha elegido cuatro trayectorias de medición (método de las cuatro trayectorias), ya que proporciona buena exactitud en la medición. Si fallara una trayectoria, quedan tres que siguen midiendo, además de que si fallara una o más trayectorias de medición, se activa una alarma que alerta al operador por el mal funcionamiento, por lo que el medidor es confiable.

Los avances en la electrónica de los medidores sencillos y multitrayectoria, así como su diagnóstico de autoverificación, son características importantes que permiten una verificación constante de la fuerza de la señal, la calidad de la señal, errores y otras variables de operación.

Los crecientes desarrollos en la electrónica digital, procesamiento de señales y el mejoramiento en la técnica del software han provocado un gran interés en el uso de los medidores ultrasónicos en la industria petrolera para la medición de hidrocarburos con fines de transferencia de custodia.

Las compañías operadoras están buscando nuevas formas de hacer mejores mediciones a menor costo, activando una técnica de instrumentación para detectar los posibles problemas antes de que estos ocurran. En comparación, los medidores de turbina de doble rotor ocasionan algunos errores durante los procedimientos de verificación, lo que sin duda permitirá a los medidores ultrasónicos su aceptación, y tomar un lugar legítimo entre los métodos aceptables y recomendables de medición de hidrocarburos en el futuro.

Con un medidor ultrasónico de multitrayectoria se alcanza una precisión hasta del 0.5% con fines de transferencia de custodia. Este tipo de medidor puede manejar fácilmente perfiles de flujo que el medidor sencillo no puede. La compañía N A colocó en Norteamérica, en la estación de compresión de Perryville, la primera estación de medición multitrayectoria de 16 pg, con fines de transferencia de custodia. Fue puesta en servicio en 1994 a un costo aproximado de \$80,000.00 Dls., cuatro veces el costo del medidor sencillo. En 1992, instaló un medidor de trayectoria sencilla de 16 pg en la estación de compresión de Malvern, a un costo aproximado de \$20,000.00 Dls.

El medidor de flujo por ultrasonido en arreglo multitrayectoria presenta ventajas comparativas que superan a todos los demás arreglos, como son:

- Mayor precisión. Los sistemas de cuatro o cinco trayectorias de medición pueden lograr una alta precisión ($< \pm 0.5\%$)
- Medición bidireccional. Medición independiente de la orientación del medidor con respecto a la tubería.

- Falla en una de las trayectorias afecta muy poco la medición.

Las características del medidor multitrayectoria son:

- Precisión: $< \pm 0.5\%$, aun con flujo pulsante y de baja velocidad.
- Repetibilidad: 0.1%
- Intervalo de operación: 300:1
- Pérdida de presión prácticamente nula, ya que no tiene obstrucciones al flujo.
- Capaz de medir en operación bidireccional.
- Bajo costo de operación y mantenimiento, no tiene partes móviles.
- Capaz de medir cero flujo.
- No necesita calibración.
- No es sensible a grandes variaciones en la presión.
- En operaciones con gas, es capaz de medir hasta con un 15 % en volumen en presencia de líquido.
- Puede ser utilizado en aplicaciones con gas sucio.

5.5 VENTAJAS Y EVALUACIÓN DE LOS MEDIDORES ULTRASÓNICOS.

Esta técnica de medición tuvo sus orígenes a principios de la década de los ochentas, cuando las compañías del ramo se dieron a la tarea de hacer mejores mediciones a menor costo.

La medición ultrasónica ofrece las siguientes ventajas.

- Fácil de instalar.
- Ahorro en los costos de mantenimiento y autodiagnóstico.
- Insensible a los incrementos de contaminantes.
- Completamente limpiable con diablos.
- Tienen capacidad bidireccional.
- No restringen el área de flujo de la tubería.
- Insensible a las pulsaciones del flujo.

El tiempo de instalación para un medidor ultrasónico es mínimo comparado con otros medidores de flujo. Mientras que para la instalación de medidores de placa de orificio se requieren semanas, para los medidores ultrasónicos se realiza en un solo día. Los medidores de trayectoria sencilla se pueden instalar bajo presión sin interrumpir el flujo, (mediante el procedimiento hot-tap), la compañía N A instaló así unas sondas en una tubería de 24 pg que operaba a 800 lb/pg², sin interrumpir las operaciones.

De igual manera, cuando se decide instalar medidores ultrasónicos con transductores del tipo bridados "clamp-on", tampoco es necesario interrumpir el flujo.

En Holanda, G y W haciendo pruebas a estos medidores ultrasónicos, demostraron que un medidor ultrasónico no es afectado por la contaminación de aceite sucio, en comparación con los medidores de turbina y placa de orificio, en los que la presencia de aceite sucio ocasiona mayores errores de medición. La experiencia demuestra que la contaminación con aceites sucios, viscosos y negros solo afecta a los medidores de trayectoria sencilla, instalados en la unidad de los compresores. A pesar de que se observó una reducción en la fuerza de la señal, esto no cambió la precisión del cálculo del flujo. Es bien sabido que durante la operación del compresor, cualquier disminución de la presión en la línea, puede ser muy costosa. Como los medidores ultrasónicos no tienen partes restrictivas, este equipo tiene una ventaja definitiva sobre los sistemas de medición de turbina y placa de orificio. Los medidores ultrasónicos no son afectados por las pulsaciones del flujo que con frecuencia ocurren en la estación de compresión. En la estación Chandler hay tres compresores grandes, uno de 4,000 hp y dos de 8,000 hp, en cuya tubería de succión se instaló un medidor ultrasónico. A pesar de que la recomendación del fabricante es de que se instale como mínimo a una distancia de 20 veces el diámetro de la tubería recta corriente arriba y a 10 veces el diámetro de la tubería recta corriente abajo, N A no instaló los medidores a estas distancias. En las líneas de succión de 30 pg los colocó a 3.15 diámetros de tubería corriente arriba y a 1.57 diámetros de tubería corriente abajo. En una línea de succión de 24 pg las distancias fueron de 5.3 diámetros corriente arriba y a 2.7 diámetros corriente abajo.

Comparando las mediciones de estos tres medidores contra dos de placa de orificio de 16 pg, (localizados corriente abajo del compresor) la diferencia sólo fue del 1%.

Los Holandeses reportaron que el principio de medición en la línea tiene una alta repetición en la frecuencia y ausencia en donde no existe flujo, esto hace que la acústica del medidor ultrasónico sea convertida a medición de flujo de pulsos.

Al no tener los medidores ultrasónicos sondas que restringen el área interna de la tubería, la limpieza con diablos se puede hacer fácilmente sin mover el medidor. En contraste, el medidor de placa de orificio o turbina presenta obstrucciones a la línea que hacen difícil la limpieza con diablos.

La capacidad del flujo bidireccional es otra característica ofrecida por cualquier medidor ultrasónico (multitrayectoria o sencillo). Si se desea esta misma característica en un medidor de placa de orificio, es necesario instalar otro medidor corriente abajo.

5.6 COMPARACIÓN DE LOS MEDIDORES DE FLUJO.

	Multitrayectoria	Turbina	Placa de orificio
Precisión	$\leq +0.5 \%$	$\leq +0.5 \%$	$\leq +1.0 \%$
Intervalo de operación	300:1	10:1	4:1
Repetibilidad	0.1 %	0.02 %	0.25 %
Caída de presión	+0	Baja	Alta
Costo inicial	20:1 ³	10:1 ¹	1:1
Costo de operación	Bajo	Medio-alto	Medio-alto
Costo de mantenimiento	Bajo	Medio-alto	Medio-alto
Operación bidireccional	Sí	No	No
Temperatura de operación	-22 a 176 °F	-58 a 300 °F	-20 a 600 °F
Presión de operación	9,675 lb/pg ²	9,675 lb/pg ²	9,675 lb/pg ²) ²
Diámetro de tub.	6 a 48 pg	Hasta 24 pg	Hasta 48 pg ³

La gran ventaja del medidor de placa de orificio es su costo inicial, el cual es muy bajo, si se compara con cualquier otro instrumento de medición de flujo. Así mismo, el costo de su mantenimiento tampoco es caro, pero su desventaja mayor radica en que es el que presenta mayor caída de presión, además de ser el menos preciso. Otra de las ventajas de este medidor es que no hay límite de diámetro, su única limitante es el diámetro de la tubería misma.

Los medidores de turbina son medidores clasificados en un rango intermedio. Es decir, aunque su costo inicial se considera medio caro, el costo de operación, así como de su mantenimiento no lo son tanto, además de tener una precisión muy aceptable y una baja caída de presión.

Evidentemente que los medidores de flujo por ultrasonido con arreglo de multitrayectoria superan varias características. Por ejemplo, estos medidores ofrecen un intervalo de operación de 300:1, nula caída de presión, bajos costos de operación y mantenimiento; así como la operación bidireccional con una precisión muy aceptable. El ser muy caro es su mayor desventaja,

1Costo comparativo a la placa de orificio (sin la instrumentación asociada).

2 Limitada por el transmisor.

3 Limitada sólo por el diámetro de la tubería (48 pg)

que a simple vista es lo que se puede deducir; sin embargo, como este tipo de medidores ofrece muy bajo costo de operación y mantenimiento, haciendo un análisis de costos, se puede ver que este tipo de medidores no resultan ser tan caros como parece.

CAPÍTULO 6

PROGRAMA DE CÓMPUTO PARA LA SELECCIÓN DE UN MEDIDOR ULTRASÓNICO.

El lenguaje de programación utilizado para desarrollar este programa es visual basic en su versión 6.0. Está estructurado de tal manera que con la interfase gráfica que se creó para el usuario lleva de la mano hasta, y mediante la introducción de la información solicitada, llegar al resultado.

Para la instalación del software de visual basic versión 6.0 es necesario tener al menos los siguientes requerimientos disponibles.

- Microsoft Windows 95 o posterior.
- Microprocesador 80486 o superior.
- Disco duro con un mínimo de 200 Mbytes disponibles.
- CD-ROM
- Monitor VGA
- 32 MB de memoria RAM.
- Ratón.

Cumpliendo con los requerimientos anteriores ya se puede instalar el software de visual basic 6.0

El programa es un método sencillo de selección de un medidor ultrasónico, ya que la información disponible de ellos es muy escasa, sobre todo para los medidores de líquido.

Es importante recalcar que el programa de cómputo por sí solo no soluciona problemas, ya que sólo apoya el proceso de selección de medidores. La responsabilidad de tomar una decisión va aunado a la experiencia y conocimiento que se tenga en medición y del tipo de fluido sujeto a medición.

A continuación se muestra un ejemplo y el código de dicho programa, además de una clara explicación del mismo.

Ejemplo:	tipo de fluido	gas
	tipo de gas	húmedo

MEDIDORES ULTRASÓNICOS

1. Se mostrará una pantalla de inicio.



2. Después se muestra una pantalla donde, de acuerdo al tipo de fluido a medir, el usuario puede elegir el tipo de medidor que busca.

Medidores Ultrasonicos

Medidor

Medidores Ultrasonicos

Indicar tipo de fluido a medir:



<i>LÍQUIDO</i>	<i>GAS</i>
<ul style="list-style-type: none"><i>Limpio</i><i>Sucio</i>	<ul style="list-style-type: none"><i>Seco</i><i>Húmedo</i><i>A quemador o almacenamiento</i><i>Corrosivo</i>

Salir

3. Si el usuario elige una opción de medidores ultrasónicos para líquido, le mostrará en otra pantalla todos los medidores de este tipo, por ejemplo, para líquidos limpios.

<i>LÍQUIDO LIMPIO</i>	
<i>Medidor</i>	Portátil
<i>Modelo</i>	PT868 de tiempo de tránsito
<i>Fabricante</i>	Panametrics
<i>Disponible</i>	Con 1 y 2 canales. Con transductores tipo húmedo o bridados.
<i>Aplicación</i>	
<i>Rangabilidad</i>	
<i>Repetibilidad</i>	
<i>Temperatura de operación</i>	
<i>Presión de operación</i>	
<i>Velocidad de flujo</i>	
<i>Precisión</i>	
<i>Dimensión</i>	
<i>Peso</i>	
<i>NOTA</i>	

Regresar
Salir

 <i>Primero</i>	 <i>Siguiente</i>	 <i>Anterior</i>	 <i>Último</i>
---	---	--	--

Los botones de la parte inferior, le permitirán al usuario moverse entre registros, es decir, comenzando de izquierda a derecha:

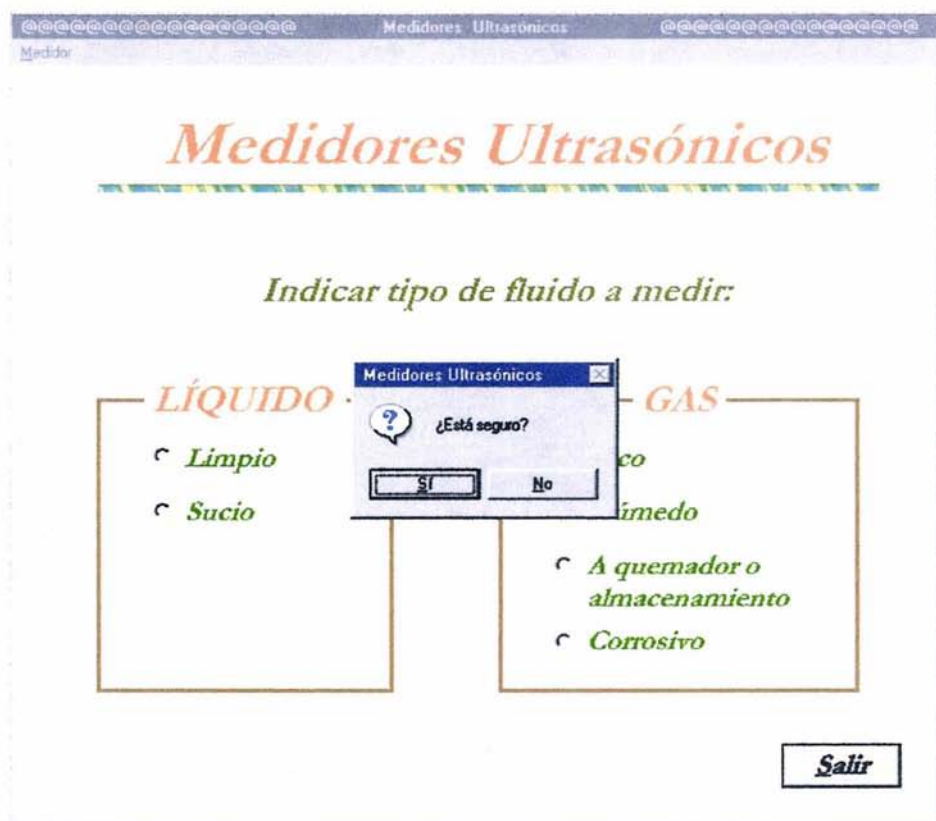
- Primer botón: Indica moverse al primer registro.
- Segundo botón: Indica moverse al siguiente registro.
- Tercer botón: Indica moverse al registro anterior.
- Cuarto botón: Indica moverse al último registro.

El botón que dice Regresar, le permitirá al usuario pasar a la pantalla donde puede elegir otro tipo de medidor ultrasónico.

El botón que dice Salir, terminará con la ejecución del programa.

NOTA: Para cada tipo de medidor ultrasónico se mostrará una pantalla similar.

4. Si el usuario da un click en el botón de Salir, le preguntará al usuario si está seguro, en caso de ser así, terminará con la ejecución del programa, en caso contrario, lo dejará en la pantalla.



A continuación se presenta una corrida del programa de cómputo con las siguientes características.

Tipo de fluido: gas
Tipo de gas: húmedo

GAS HÚMEDO

<i>Modelo</i>	Junior.Sonic
<i>Fabricante</i>	Daniel
<i>Disponible</i>	En diámetros de 4 a 24 pg.
<i>Aplicación</i>	En gases húmedos para almacenamiento. No aplicable en transferencia de custodia.
<i>Rangeabilidad</i>	
<i>Repetibilidad</i>	
<i>Temperatura de operación</i>	
<i>Presión de operación</i>	
<i>Rango de velocidad</i>	3 a 100 pie/s
<i>Precisión</i>	
<i>NOTA</i>	

Regresar

Salir



Código de la forma frmseleccion.

```
Private Sub cmdSalir_Click()

If MsgBox("¿Está seguro?", vbYesNo + vbQuestion, " Medidores
Ultrasónicos") = vbYes Then
    End
End If

End Sub

Private Sub Form_Load()

Data1.DatabaseName = App.Path & "\medidores.mdb"
Data1.RecordSource = "select * from Tipos"
Data1.Visible = False

End Sub

Private Sub mnuDef_Click()

Me.Hide
frmModeloM.Show

End Sub

Private Sub mnuSel_Click()

Me.Hide
frmMedidorNvo.Show

End Sub

Private Sub optGC_Click()

If optGC.Value = True Then
    frmGC.Show
    frmseleccion.Hide
    frmGC.IblTipoLiq.Caption = "GAS CORROSIVO"
    frmGC.Caption =
    "#####
Gas Corrosivo
#####"
End If
```


End Sub

Private Sub optGH_Click()

If optGH.Value = True Then

frmGH.Show

frmseleccion.Hide

frmGH.lblTipoLiq.Caption = "GAS HÚMEDO"

frmGH.Caption =

"@@"

Gas Húmedo

@@"

End If

End Sub

Private Sub optGQ_Click()

If optGQ.Value = True Then

frmGQ.Show

frmseleccion.Hide

frmGQ.lblTipoLiq.Caption = "GAS A QUEMADOR O ALMACENAMIENTO"

frmGQ.Caption = "

@@@

Gas a

quemador o almacenamiento

@@"

End If

End Sub

Private Sub optGS_Click()

If optGS.Value = True Then

frmGS.Show

frmseleccion.Hide

frmGS.lblTipoLiq.Caption = "GAS SECO"

frmGS.Caption =

"@@@

@ Gas Seco

@@"

End If

End Sub

Private Sub optLS_Click()

If optLS.Value = True Then

frmLiquidos_S.Show

```

frmseleccion.Hide
frmLiquidos_S.IblTipoLiq.Caption = "LÍQUIDO SUCIO"
frmLiquidos_S.Caption =
"@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
Líquido Sucio
@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@"
End If
End Sub

```

```

Private Sub optLL_Click()

If optLL.Value = True Then
frmPLiquidos.Show
frmseleccion.Hide
frmPLiquidos.IblTipoLiq.Caption = "LÍQUIDO LIMPIO"
frmPLiquidos.Caption =
"@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
Líquido Limpio
@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@"
End If
End Sub

```

Código de la forma frmGC.

Nota: El código es el mismo para las formas: frmGS,frmGH y frmGQ.

```

Private Sub cmdAnterior_Click()

dtaGC.Recordset.MovePrevious
If dtaGC.Recordset.BOF Then
dtaGC.Recordset.MoveFirst
MsgBox "Es el primer registro", vbOKOnly + vbInformation, " MEDIDORES
ULTRASÓNICOS"
End If

End Sub

Private Sub cmdPrimero_Click()

dtaGC.Recordset.MoveFirst

End Sub

Private Sub cmdRegresar_Click()

Unload Me

```

```
frmseleccion.Show
frmseleccion.optGS.Value = False
frmseleccion.optGH.Value = False
frmseleccion.optGC.Value = False
frmseleccion.optGQ.Value = False
End Sub
```

```
Private Sub cmdSalir_Click()
```

```
If MsgBox("¿ Está seguro?", vbYesNo + vbQuestion, " MEDIDORES  
ULTRASÓNICOS") = vbYes Then  
    End
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdSiguiente_Click()
```

```
dtaGC.Recordset.MoveNext  
If dtaGC.Recordset.EOF Then  
    dtaGC.Recordset.MoveLast  
    MsgBox "Es el último registro", vbOKOnly + vbInformation, " MEDIDORES  
ULTRASÓNICOS"
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdUltimo_Click()
```

```
dtaGC.Recordset.MoveLast
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
dtaGC.DatabaseName = App.Path & "\medidores.mdb"  
dtaGC.RecordSource = "Gases"  
dtaGC.RecordSource = "select * from Gases where Clave='GC'"
```

```
dtaGC.Visible = False
```

```
End Sub
```

Código de la forma frmPLiquididos.

Nota: El código es el mismo para la forma frmLiquididos_S

```
Private Sub cmdAnterior_Click()

dtaLL.Recordset.MovePrevious
If dtaLL.Recordset.BOF Then
    dtaLL.Recordset.MoveFirst
    MsgBox "Es el primer registro", vbOKOnly + vbInformation, " MEDIDORES
ULTRASÓNICOS"
End If

End Sub

Private Sub cmdPrimero_Click()

'Se mueve al primer registro de la Base de Datos

dtaLL.Recordset.MoveFirst

End Sub

Private Sub cmdRegresar_Click()

Unload Me
'frmPLiquididos.Hide
frmseleccion.Show
frmseleccion.optLL.Value = False
frmseleccion.optLS.Value = False
End Sub

Private Sub cmdSalir_Click()

If MsgBox("¿Está seguro?", vbYesNo + vbQuestion, " MEDIDORES
ULTRASÓNICOS") = vbYes Then
    End
End If

End Sub

Private Sub cmdSiguiente_Click()

dtaLL.Recordset.MoveNext
If dtaLL.Recordset.EOF Then
    dtaLL.Recordset.MoveLast
```



```
MsgBox "Es el último registro", vbOKOnly + vbInformation, " MEDIDORES  
ULTRASÓNICOS"  
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdUltimo_Click()
```

```
'Se mueve al último registro  
dtaLL.Recordset.MoveLast  
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
dtaLL.DatabaseName = App.Path & "\medidores.mdb"  
dtaLL.RecordSource = "Liquididos"  
dtaLL.RecordSource = "select * from Liquididos where Clave='LL'"
```

```
dtaLL.Visible = False
```

```
End Sub
```

Código de la forma frmModeloM.

```
Option Explicit  
Dim i As Integer
```

```
Private Sub cmdCancelar_Click()
```

```
frmModeloM.Hide  
cmbMod.Text = ""  
txtDiametro.Text = ""
```

```
frmseleccion.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
i = 0  
Do Until frmseleccion.Data1.Recordset.EOF  
cmbMod.List(i) = frmseleccion.Data1.Recordset.Fields("modelo")  
frmseleccion.Data1.Recordset.MoveNext  
i = i + 1  
Loop
```

End Sub

Private Sub txtDiametro_KeyPress(KeyAscii As Integer)

If (KeyAscii >= 48 And KeyAscii <= 57) Or KeyAscii = 13 Or KeyAscii = 8 Or
KeyAscii = 46 Then

 If KeyAscii = 13 Then

 If frmModeloM.cmbMod.Text = "" And frmModeloM.txtDiametro.Text = ""
Then

 MsgBox "No ha proporcionado los datos", vbCritical, "Medidores
Ultrasónicos"

 ElseIf frmModeloM.txtDiametro.Text = "" Then

 MsgBox "No ha proporcionado el diámetro", vbCritical, "Medidores
Ultrasónicos"

 ElseIf frmModeloM.cmbMod.Text = "" Then

 MsgBox "No ha proporcionado un modelo de medidor", vbCritical,
"Medidores Ultrasónicos"

 Else

 Me.Hide

 frmOperaciones.Show

 End If

 End If

Else

 KeyAscii = 0

End If

End Sub

Código de la forma frmOperaciones

Option Explicit

Dim Area As Double

Const PI = 3.1416

Dim d As Double, dmin As Double, dmax As Double

Dim Qmin As Double, Qmax As Double, VFmin As Double, VFmax As Double

Private Sub cmdCalcular_Click()

frmOperaciones.Height = 5805

dmin = Val(IblDmin.Caption)

```
dmax = Val(IblDmax.Caption)
d = Val(IblDiametro.Caption)
VFmin = CDbI(IblVFmin.Caption)
VFmax = Val(IblVFmax.Caption)
```

```
If d >= dmin And d <= dmax Then
  Area = (PI * d * d) / 4
  Qmin = VFmin * Area
  Qmax = VFmax * Area
```

```
  IblQM.Visible = True
  IblQX.Visible = True
  IblQmin.Visible = True
  IblQmax.Visible = True
  Iblg.Visible = True
  Line2.Visible = True
```

```
  IblQmin.Caption = Qmin
  IblQmax.Caption = Qmax
  cmdRegresar.Caption = "&Regresar"
```

```
Else
```

```
  frmOperaciones.Height = 4245
  If MsgBox("El diámetro no cumple para el modelo " & IblModelo.Caption,
vbOKOnly + vbCritical, "Medidores Ultrasónicos") = vbOK Then
    Unload Me
    frmModeloM.Show
  End If
  'cmdRegresar.Caption = "&Regresar"
  frmModeloM.txtDiametro.Text = ""
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdRegresar_Click()
```

```
  Unload Me
  frmseleccion.Show
  frmModeloM.cmbMod.Text = ""
  frmModeloM.txtDiametro.Text = ""
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Activate()
```

```

If lblClave.Caption = "GS" Then
    lblTipoF.Caption = "Gas Seco"
ElseIf lblClave.Caption = "GH" Then
    lblTipoF.Caption = "Gas Húmedo"
ElseIf lblClave.Caption = "GQ" Then
    lblTipoF.Caption = "Gas a Quemador o Almacenamiento"
ElseIf lblClave.Caption = "GC" Then
    lblTipoF.Caption = "Gas Corrosivo"
End If

End Sub

Private Sub Form_Load()

Data1.DatabaseName = App.Path & "\medidores.mdb"
Data1.RecordSource = "select * from Tipos where modelo='" &
frmModeloM.cmbMod.Text & "'"

lblModelo.Caption = frmModeloM.cmbMod.Text
lblDiametro.Caption = frmModeloM.txtDiametro.Text

lblQM.Visible = False
lblQX.Visible = False
lblQmin.Visible = False
lblQmax.Visible = False

lblClave.Visible = False
lblDmin.Visible = False
lblDmax.Visible = False
lblVFmin.Visible = False
lblVFmax.Visible = False
Data1.Visible = False

lblg.Visible = False
Line2.Visible = False

End Sub

```

Código de la forma frmMedidorNvo

```

Private Sub cmdCancel_Click()

Unload Me
frmseleccion.Show

```


End Sub

Private Sub txtDiam_KeyPress(KeyAscii As Integer)

If (KeyAscii >= 48 And KeyAscii <= 57) Or KeyAscii = 13 Or KeyAscii = 8 Or
KeyAscii = 46 Then

 If KeyAscii = 13 Then

 If txtGastoReq.Text = "" And txtDiam.Text = "" Then

 MsgBox "No ha proporcionado los datos", vbCritical, "Medidores
Ultrasónicos"

 ElseIf txtDiam.Text = "" Then

 MsgBox "No ha proporcionado el diámetro", vbCritical, "Medidores
Ultrasónicos"

 ElseIf txtGastoReq.Text = "" Then

 MsgBox "No ha proporcionado un gasto", vbCritical, "Medidores
Ultrasónicos"

 ElseIf txtDiam.Text > 120 Or txtDiam.Text < 3 Then

 MsgBox "No existen modelos de medidor que cumplan con ese
diámetro", vbCritical, "Medidores Ultrasónicos"

 txtDiam.Text = ""

 Else

 Me.Hide

 frmModMedNvo.Show

 End If

 End If

Else

 KeyAscii = 0

End If

End Sub

Private Sub txtGastoReq_KeyPress(KeyAscii As Integer)

If (KeyAscii >= 48 And KeyAscii <= 57) Or KeyAscii = 13 Or KeyAscii = 8 Or
KeyAscii = 46 Then

 If KeyAscii = 13 Then

 txtDiam.SetFocus

 End If

Else

 KeyAscii = 0

End If

End Sub

Código de la forma frmModMedNvo.

Option Explicit

Dim i As Integer, reg As Integer

Private Sub cmdCancelar_Click()

Unload Me

cmbMod.Text = ""

frmMedidorNvo.txtDiam.Text = ""

frmMedidorNvo.Show

End Sub

Private Sub Form_Activate()

'reg = Data1.Recordset.RecordCount

'

'If reg = 0 Then

' If MsgBox("No hay modelos de medidor que cumplan con el diámetro proporcionado", vbOKOnly + vbCritical, "Medidores Ultrasónicos") = vbOK Then

' Me.Hide

' cmdCancelar.Caption = "&Regresar"

' frmMedidorNvo.txtDiam.Text = ""

' frmMedidorNvo.Show

' Exit Sub

' End If

'End If

i = 0

Do Until Data1.Recordset.EOF

 cmbMod.List(i) = Data1.Recordset.Fields("modelo")

 Data1.Recordset.MoveNext

 i = i + 1

Loop

End Sub

Private Sub Form_Load()

```

Data1.DatabaseName = App.Path & "\medidores.mdb"
Data1.RecordSource = "select * from Tipos where Dmin <= " &
Val(frmMedidorNvo.txtDiam.Text) & " and Dmax >= " &
Val(frmMedidorNvo.txtDiam.Text) & ""

Data1.Visible = False

End Sub

Private Sub txtVelFlujo_KeyPress(KeyAscii As Integer)

If (KeyAscii >= 48 And KeyAscii <= 57) Or KeyAscii = 13 Or KeyAscii = 8 Or
KeyAscii = 46 Then
    If KeyAscii = 13 Then

        If cmbMod.Text = "" And txtVelFlujo.Text = "" Then
            MsgBox "No ha proporcionado los datos", vbCritical, "Medidores
Ultrasónicos"
        ElseIf txtVelFlujo.Text = "" Then
            MsgBox "No ha proporcionado la velocidad de flujo", vbCritical,
"Medidores Ultrasónicos"
        ElseIf cmbMod.Text = "" Then
            MsgBox "No ha proporcionado un modelo de medidor", vbCritical,
"Medidores Ultrasónicos"
            txtVelFlujo.SetFocus
        Else
            Me.Hide
            frmOpera.Show
        End If

    End If

Else
    KeyAscii = 0
End If
End Sub

```

Código de la forma frmOpera.

```

Option Explicit
Dim Area As Double
Const PI = 3.1416
Dim d As Double
Dim Qc As Double, Qr As Double, VFmin As Double, VFmax As Double, VF
As Double

Private Sub cmdBack_Click()

```

```
Unload Me
frmseleccion.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdCalcular_Click()
```

```
Me.Height = 6990
```

```
d = Val(IblDiam.Caption)
VFmin = CDb(IblVFmin.Caption)
VFmax = Val(IblVFmax.Caption)
VF = CDb(IblVelFjo.Caption)
Qr = CDb(frmMedidorNvo.txtGastoReq.Text)
If VF >= VFmin And VF <= VFmax Then
    Area = (PI * d * d) / 4
    Qc = VF * Area
    IblGtoC.Caption = Qc
```

```
IblCompara.Visible = True
IblGtoC.Visible = True
IblQC.Visible = True
IblDif.Visible = True
IblDifG.Visible = True
Label5.Visible = True
```

```
If Qr = Qc Then
    IblCompara.Caption = "El gasto requerido es igual al gasto calculado"
    IblDifG.Caption = Qr - Qc
Elseif Qr < Qc Then
    IblCompara.Caption = "El gasto requerido es menor al gasto calculado"
    IblDifG.Caption = Qc - Qr
Elseif Qr > Qc Then
    IblCompara.Caption = "El gasto requerido es mayor al gasto calculado"
    IblDifG.Caption = Qr - Qc
End If
```

```
cmdRegresar.Caption = "&Otro cálculo con el mismo modelo"
frmModMedNvo.txtVelFlujo.Text = ""
cmdOtro.Visible = True
cmdNuevo.Visible = True
```

```
Else
    Me.Height = 4680
```



```
    If MsgBox("La velocidad de flujo no cumple para el modelo " &  
frmModMedNvo.cmbMod.Text, vbCritical + vbOKOnly, "Medidores  
Ultrasónicos") = vbOK Then  
        cmdRegresar.Caption = "&Regresar"  
        Unload Me  
        frmModMedNvo.Show  
        frmModMedNvo.txtVelFlujo.Text = ""  
    End If  
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdNuevo_Click()
```

```
    Unload Me  
    frmMedidorNvo.txtDiam.Text = ""  
    frmMedidorNvo.txtGastoReq.Text = ""  
    frmModMedNvo.cmbMod.Text = ""  
    frmModMedNvo.txtVelFlujo.Text = ""  
    frmMedidorNvo.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdOtro_Click()
```

```
    Unload Me  
    frmMedidorNvo.Show  
    frmMedidorNvo.txtDiam.Text = ""
```

```
End Sub
```

```
Private Sub cmdRegresar_Click()
```

```
    Unload Me  
    frmModMedNvo.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Activate()
```

```
    If lblCve.Caption = "GS" Then  
        lblf.Caption = "Gas Seco"
```

```
Elsif lblCve.Caption = "GH" Then
    lblf.Caption = "Gas Húmedo"
Elsif lblCve.Caption = "GQ" Then
    lblf.Caption = "Gas a Quemador o Almacenamiento"
Elsif lblCve.Caption = "GC" Then
    lblf.Caption = "Gas Corrosivo"
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
Data1.DatabaseName = App.Path & "\medidores.mdb"
Data1.RecordSource = "select * from Tipos where modelo="" &
frmModMedNvo.cmbMod.Text & """
```

```
lblMod.Caption = frmModMedNvo.cmbMod.Text
lblGto.Caption = frmMedidorNvo.txtGastoReq.Text
lblDiam = frmMedidorNvo.txtDiam.Text
lblVelFjo.Caption = frmModMedNvo.txtVelFlujo.Text
```

```
lblCve.Visible = False
lblVFmin.Visible = False
lblVFmax.Visible = False
lblCompara.Visible = False
lblGtoC.Visible = False
lblQC.Visible = False
lblDif.Visible = False
lblDifG.Visible = False
Label5.Visible = False
```

```
cmdOtro.Visible = False
cmdNuevo.Visible = False
```

```
Data1.Visible = False
```

```
End Sub
```

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Después del estudio y análisis de la información de los medidores ultrasónicos, se concluye que:

La medición con los medidores ultrasónico multitrayectoria representa una alternativa atractiva para cuantificar volúmenes de gas natural, con respecto a la medición con placas de orificio.

Las pruebas de campo de los medidores ultrasónicos han sido exitosas en tuberías con y sin acondicionadores de flujo, y el desempeño de los mismos no ha cambiado sustancialmente los resultados, aún en pruebas de hasta 16 meses de duración.

De las pruebas de campo se ha podido concluir que con los medidores ultrasónicos de multitrayectoria se obtienen resultados muy similares a los obtenidos con los medidores tradicionales de placa de orificio, que actualmente son los más aceptados en aplicaciones de transferencia de custodia.

En los últimos años los medidores ultrasónicos se han convertido en una opción atractiva para las compañías operadoras que se dedican a la medición y transferencia de hidrocarburos, ofreciendo reducidos costos de instalación con una insignificante pérdida de presión y sin partes mecánicas sujetas a fallas. Los medidores ultrasónicos se instalan fácilmente, sin alterar la operación de la línea o ducto y sin causar una caída de presión adicional.

El reporte No. 9 de la American Gas Association está considerado como el mejor esfuerzo técnico en la medición de gas con medidores ultrasónicos de multitrayectoria, y su publicación es indicador del alto grado de confianza que se tiene en el uso y aplicación de esta tecnología en la medición de gas natural.

El funcionamiento del sistema de medición ultrasónica depende directamente de la exactitud de su medidor ultrasónico, no de su precisión "estimada" basada en pruebas de laboratorio bajo condiciones idealizadas. Depende de su capacidad para trabajar bajo las reales y difíciles condiciones ambientales encontradas en la mayoría de las aplicaciones, que frecuentemente son las más extremosas sobre la Tierra, como las instalaciones de Alaska o del desierto de Arabia Saudita.

Un factor determinante y decisivo en la selección de un sistema de medición es el aspecto económico. Los atributos de los medidores ultrasónicos son aptos para resolver los problemas y limitaciones de los sistemas de medición tradicionales. Esta medición ofrece un sistema práctico, efectivo, seguro, confiable y costeable en la medición de hidrocarburos con fines de transferencia de custodia.

Las compañías operadoras están buscando nuevas formas de hacer mejores mediciones a menor costo, activando la técnica de instrumentación ultrasónica para detectar los posibles problemas antes de que estos ocurran, lo que sin duda, permitirá a los medidores ultrasónicos su aceptación, y tomar un lugar legítimo entre los métodos aceptables y recomendables de medición de hidrocarburos en el futuro.

Los resultados obtenidos de las pruebas a las que se han sometido los medidores ultrasónicos, sin duda alguna, están sentando el precedente de que en un futuro no muy distante, este sistema de medición tenga, dentro de la industria petrolera mundial, una aceptación unánime. Las pruebas demuestran que este sistema de medición supera al de placa de orificio y turbina, que son los medidores más utilizados actualmente por la industria. En general, los resultados de estas investigaciones demuestran que la medición ultrasónica es la mejor alternativa para sustituir a los sistemas tradicionales de medición.

La medición de hidrocarburos con fines de transferencia de custodia, exige cierta exactitud y esto representa técnicamente un problema desafiante. Con la utilización de los medidores ultrasónicos multirayectoria se tiene resuelto este problema, por lo cual se recomienda utilizar este nuevo sistema de medición de hidrocarburos con fines de fiscalización y transferencia de custodia.

NOMENCLATURA Y TERMINOLOGÍA.

D Diámetro de la tubería.

X Distancia entre los transductores.

L Longitud de las trayectorias acústicas.

Sonido. Cualquier perturbación longitudinal en un medio elástico.

Sonido audible (humano): Sonido en el intervalo de frecuencia de 20 a 20,000 hz.

Infrasónico. Sonido con frecuencias menores a 20 hz.

Ultrasónico. Sonido con frecuencias superiores a 20,000 hz.

Sonoridad. Intensidad percibida del sonido.

Tono (altura). Percepción agradable de la frecuencia del sonido.

Intensidad. Energía/Tiempo/Area o Potencia/Area.

Nivel de Intensidad. Medida de la intensidad del sonido relacionada con la intensidad del umbral de la audición humana. $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

Número Reynolds N_{Re} : Es el cociente de las fuerzas de inercia y las viscosas.

Número Mach Ma : Razón de la rapidez de un objeto y la del sonido.

Hertz hz: Es la unidad de frecuencia en la nomenclatura internacional que corresponde a 1 ciclo/seg.

Decibel db: Unidad del nivel de intensidad sonora.

Pulsaciones. Vibraciones fluctuantes debidas a la interferencia de ondas en movimiento.

v: rapidez del sonido.

v_0 : rapidez del objeto.

Desviación estándar: Es la diferencia de lecturas entre el medidor bajo prueba y el de referencia.

Error. Es la desviación observada de las mediciones del medidor.

Repetibilidad. Es la cercanía en mediciones consecutivas del medidor. La repetibilidad debe corresponder al 95% del intervalo de confianza de la desviación estándar suponiendo una distribución normal. Sus valores van de ± 0.2 a $\pm 0.4\%$

Rangeabilidad. Es el rango de gastos que un medidor puede manejar.

Resolución. Es el incremento más pequeño mediante el cual el medidor indica el cambio en la velocidad de flujo.

Factor de calibración. Es la corrección o compensación del medidor debido a sus limitantes de medir la velocidad promedio.

c: velocidad del sonido en el flujo.

v: velocidad del fluido.

μ s: microsegundos. " 1×10^{-6} seg"

SPU: Unidad de Procesamiento de Señal "Signal Processing Unit"

AGA: Asociación Estadunidense del Gas "American Gas Association"

Q_{\min} : Gasto mínimo de gas a través del medidor ultrasónico.

Q_{\max} : Gasto máximo de gas a través del medidor ultrasónico.

Q_j : Gasto real medido por un medidor ultrasónico a condiciones de prueba, donde:
 $Q_j \leq 0.1Q_{\max}$.

REFERENCIAS.

1. Fundamentos de Física
David Holliday, Robert Resnick.
2. Física para Ciencias e Ingeniería
Volumen 1
Paul M. Fishbane
3. Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters
A.G.A. Reporte No. 9
4. Pipe Line & Gas Industry
Diciembre de 1997.
p.35
Mayo de 1999
p.41
5. T. A. Grimley
Southwest Research Institute, USA.
12" Ultrasonic Meter Flow Verification Testing at the MRF.
4th International Symposium on Fluid Flow Measurement.
Junio 27-30, 1999.
6. Pipe Line & Gas Journal
Julio de 1995
p.21
7. Installation Effects on Ultrasonic Flowmeters.
G J Brown, N A Barton y P I Moore
National Engineering Laboratory, Inglaterra.
8. Installation Effects on Ultrasonic Flowmeters.
F. Vulovic, Gas de Francia.
B. Harbrink, Ruhrgas de Alemania.
K. van Bloemendaal, N.V. Gasunie de Holanda.
Norwegian Society of Chartered Engineers.
Norwegian Society for Oil and Gas Measurement.
National Engineering Laboratory, Inglaterra.
9. Revista Mexicana del Petróleo
Septiembre-Octubre, 1992
p.14
10. Folletos Daniel Junior Sonic.

11. Folletos Panametrics.
12. Folleto FMC Kongsberg Metering.
13. Volume Fractoin Measurements of Water in Oil by an Ultrasonic Technique. Costas Tsouris y Lawrence Tablarides.
Marzo, 1 de 1992.