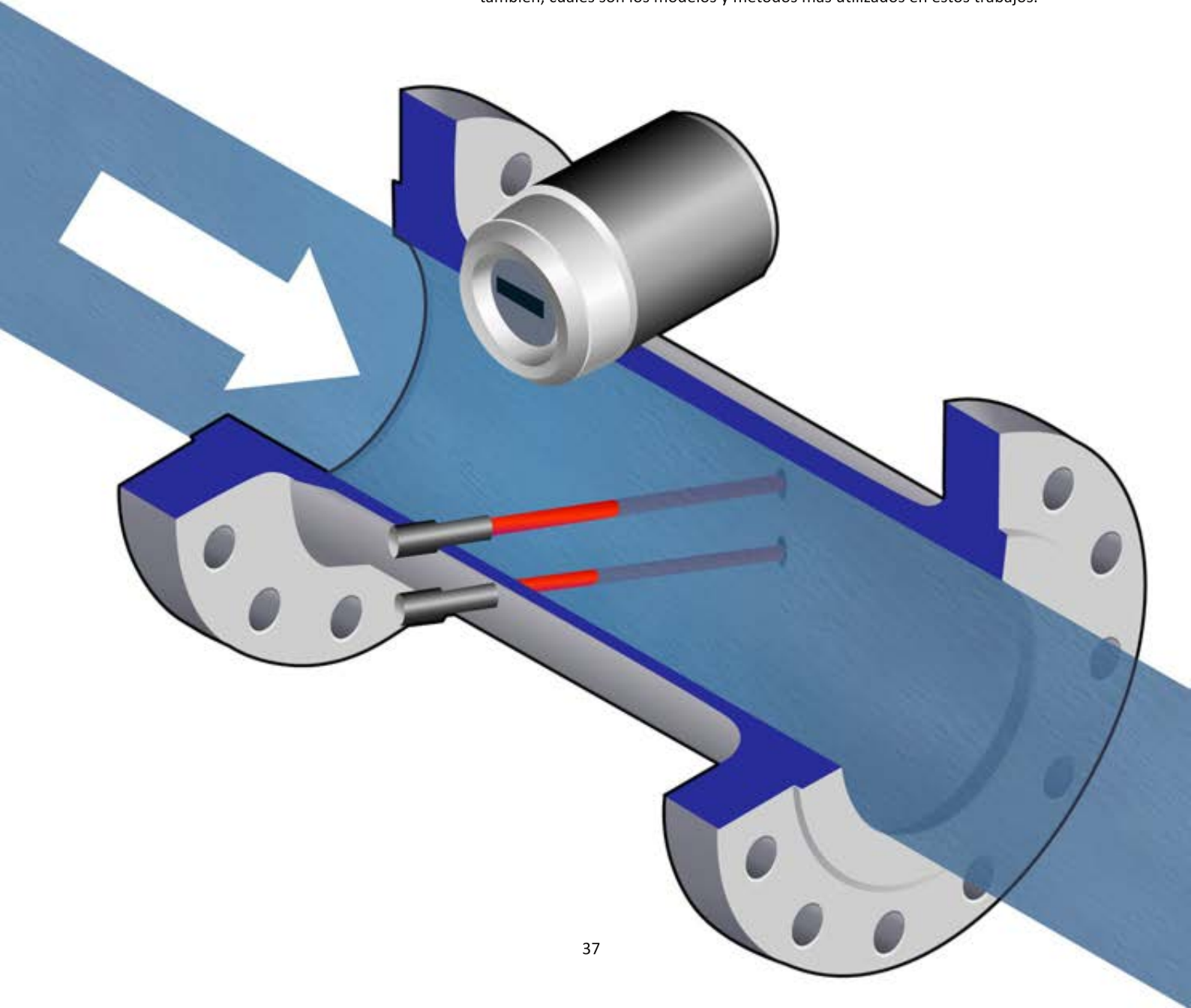


# Modelado y Simulación de Medidores Ultrasónicos de Tiempo de Tránsito: Desarrollos y Avances

Jorge Reyes y Alfredo Acevedo ( jreyes@cdtdegas.com y aacevedo@uis.edu.co )  
Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas - Universidad Industrial de Santander

## Resumen:

En este artículo se presenta una revisión de los trabajos más relevantes relacionados con el modelado y la simulación de medidores de flujo ultrasónicos de tiempo de tránsito. El trabajo se realizó basado en publicaciones extraídas de bases de datos, sitios web especializados, portales de universidades y algunas publicaciones impresas. De la revisión se mencionan los fenómenos que han despertado mayor interés en trabajos de modelado y simulación de medidores ultrasónicos, así como también, cuáles son los modelos y métodos más utilizados en estos trabajos.



## 1 INTRODUCCIÓN

La medición de volumen y caudal de fluidos ha sido y sigue siendo uno de los grandes retos de la ciencia y la tecnología en diversos campos de aplicación, desde la medición del flujo sanguíneo en el área de salud hasta la medición del caudal de los grandes ríos del mundo en hidrografía [1]. En particular uno de los campos donde la metrología de caudal y volumen de fluidos ha mostrado mayores desafíos y avances es el caso de la medición de líquidos y gases en tuberías. Esto se debe a la importancia que estas mediciones tienen para los procesos de facturación, (generalmente denominados puntos de transferencia de custodia), la monitorización y el control de procesos [2].

Dentro de las tecnologías existentes para medición de caudal y volumen de fluidos en tuberías se encuentran los medidores ultrasónicos (USM por sus siglas en inglés *Ultrasonic Flow Meter*) [1-3]. Estos sistemas son una de las tecnologías de más rápido crecimiento en el campo de la instrumentación para el monitoreo y control de procesos [4]. El crecimiento en el uso de los USM económicamente hablando se ve reflejado en la captura de aproximadamente el 10% del mercado de los medidores de volumen y caudal de fluidos en los últimos cincuenta años de acuerdo con las cifras disponibles al año 2005 [4]. Por otro lado se encuentran los progresos en capacidades operativas y desempeño metrológico que esta tecnología ha tenido desde sus capacidades iniciales [5]. Dentro de los mayores avances se encuentra la capacidad de detección del perfil de velocidades y la corrección de la medición en función de este [6-8], mediciones de gas a baja presión [9-10] y los estudios que se están llevando a cabo con el fin de realizar medición de flujo de energía para el caso del gas natural y otros gases con esta tecnología [11-12].

Los avances y progresos de los USM se deben en gran medida a los avances de la electrónica y los procesos de investigación y desarrollo que se ha llevado a cabo sobre esta tecnología de medición de flujo. Dentro de las

investigaciones y desarrollos realizados una de las herramientas fundamentales ha sido el modelado y la simulación del desempeño de los USM bajo múltiples condiciones de operación. En el presente artículo se lleva a cabo una revisión de los trabajos más relevantes relacionados con el modelado y la simulación de USM de tiempo de tránsito. El tema se inicia con una breve descripción de su principio de operación. Continuando el tema se exponen los principales fenómenos (que afectan el desempeño de los USM) que han sido investigados con ayuda del modelado y simulación de los medidores. Por último se presentan los diferentes modelos y metodologías utilizados para llevar a cabo el modelado y simulación de los USM en los diferentes trabajos mencionados.

## 2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Existen en el mercado principalmente tres tipos de medidores ultrasónicos para la medición del caudal y/o el volumen de fluidos. Cada uno de ellos realiza la medición del flujo basado en métodos diferentes como son: el tiempo de tránsito, el efecto Doppler y la correlación de señales [1-3]. La revisión desarrollada para el presente artículo hace referencia exclusivamente a los medidores ultrasónicos de tiempo de tránsito. El principio de operación de estos USM consiste en ondas acústicas que viajan con una velocidad específica a través del fluido. Las ondas acústicas (ultrasónicas) utilizadas por USM usan una señal de pulso corto (ver Fig 1), emitida por un transductor ubicado a un lado de la tubería, que es detectada por un receptor en el costado opuesto [1-3].

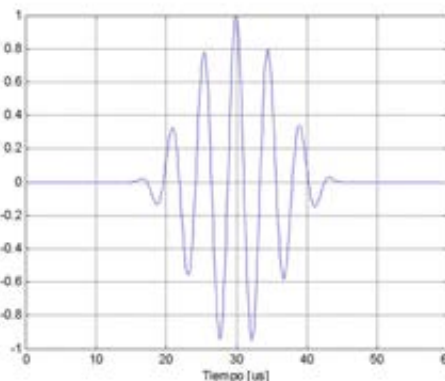


Fig 1. Pulso emitido por un USM

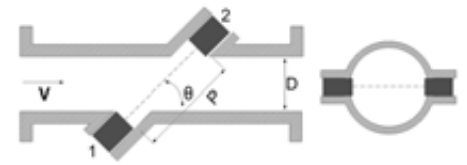


Fig 2. Diagrama esquemático para una trayectoria del principio de operación de un USM

Las ondas son emitidas en el sentido y contra el sentido del flujo (aguas arriba y aguas abajo), (ver Fig 2). Para calcular el caudal se mide el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción (tiempo de tránsito) de las ondas emitidas en los dos sentidos, y la diferencia de los tiempos de tránsito está relacionada con la velocidad del flujo y el caudal volumétrico de acuerdo con las ecuaciones 1 a 4 que se obtuvieron de [3], [13-14]:

$$\int_1^2 dt = t_{12} = \int_1^2 \frac{dP}{c + \mathbf{V} \cdot \mathbf{e}} \approx \frac{P}{c + \bar{V} \cos \theta} \quad (1)$$

$$t_{21} = \int_1^2 \frac{dP}{c - \mathbf{V} \cdot \mathbf{e}} \approx \frac{P}{c - \bar{V} \cos \theta} \quad (2)$$

$$\bar{V} = \frac{P}{2 \cos \theta} \left( \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \quad (3)$$

$$Q = \int \bar{V} dA \approx \frac{\pi \cdot \bar{V} \cdot D^2}{4} \quad (4)$$

En la ecuación 1 y 2 se presenta la relación de los tiempos de tránsito aguas arriba y aguas abajo ( $t_{12}$  y  $t_{21}$  respectivamente), con la velocidad del sonido en el medio  $c$ , el vector velocidad del fluido ( $\mathbf{V}$ ) y el vector unitario tangente a la trayectoria  $\mathbf{e}$ , a través de una integral sobre la trayectoria acústica. Adicionalmente se muestra aproximación de la integral en función de la velocidad de fluido promedio en la trayectoria ( $\bar{V}$ ) y el ángulo de la trayectoria acústica  $\theta$ . Combinando las ecuaciones 1 y 2 se obtiene la ecuación 3 que relaciona la velocidad de fluido promedio en la trayectoria con los tiempos de tránsito y el ángulo de la trayectoria acústica. Por último la ecuación 4 muestra el cálculo del caudal en función de la velocidad de fluido promedio en la trayectoria y el diámetro de la tubería  $D$ .

Es importante resaltar que los modelos matemáticos presentados para el principio de operación corresponden a una sola trayectoria directa (sin reflexión en el tubo), sin ángulo azimutal (transmisor y receptor en la misma ubicación vertical) y un perfil de velocidad de flujo ideal. Los modelos matemáticos pueden variar y las aproximaciones perder validez para diferentes configuraciones y/o perfiles de velocidad del fluido.

### 3 ASPECTOS ESTUDIADOS CON EL MODELADO Y SIMULACIÓN DE LOS “USM”

Existen diversos aspectos de diseño y/o condiciones de operación que pueden llegar a afectar el desempeño de USM [15-21]. Con el fin de conocer y cuantificar los efectos de algunos de estos aspectos se han ejecutado proyectos de investigación que involucran procesos de modelado y simulación. A continuación se presentan los principales parámetros que afectan el desempeño de los USM analizados por medio de investigaciones como las ya mencionadas.

#### 3.1 Desempeño Global del Medidor

Generar, recibir y analizar los pulsos acústicos descritos en numeral 2 de forma adecuada es una tarea compleja. Realizar estas labores requiere la operación de varios subsistemas actuando de forma conjunta como se puede apreciar en la Fig 3.

Es evidente ahora la necesidad de conocer el desempeño y los factores que afectan un USM como conjunto, teniendo en cuenta los diferentes sistemas que lo conforman. Contar con herramientas adecuadas de modelado y simulación para esta necesidad es un

campo de interés, en especial para los fabricantes de medidores, debido principalmente a que el correcto modelado y simulación de un USM puede generar información que permita a los diseñadores y analistas explorar más alternativas de diseño en un menor tiempo, y reducir el número de prototipos necesarios para obtener el producto final [19].

Sin embargo, el modelado y simulación de un USM es una tarea compleja, que requiere consideraciones especiales. En primer lugar, un USM representa un problema de simulación de campos acoplados, es decir, la combinación de varios subsistemas caracterizados por diferentes campos de la física y de sus interacciones mutuas. En segundo lugar, los USM son sistemas de grandes dimensiones, que generan ondas de corta longitud. Esta desproporción resulta en extensos problemas numéricos, que exigen muy altos desempeños computacionales [19].

Debido a la complejidad que representa el modelado y simulación de un USM en su totalidad, el problema se aborda por subsistemas. Para esto se separa el modelado y la simulación de la generación y recepción de onda acústica, que son generalmente realizados usando la ecuación de onda y métodos de aproximación numérica para resolverla; como se describe en el numeral 4.1. Por otro lado se ejecuta el modelado y simulación de la propagación de onda en el fluido (medio en movimiento), que es llevado a cabo usando el mismo método de la ecuación de onda y métodos de aproximación numérica, u otros modelos y métodos mas eficientes para esto, como el Método de Traza de Rayos RTM o el Método de la Integral de Helmholtz-Traza de Rayos HIRM descritos en los numerales 4.2 y 4.3 [17], [22-23].

#### 3.2 Efectos del Perfil de Velocidad

Dentro de las condiciones de operación que afectan el desempeño de los USM, el efecto del perfil de velocidad del fluido es el de mayor estudio y análisis a través de modelado y simulación. El fin de estos estudios es conocer, analizar y cuantificar el error de medición que se puede generar en un USM debido a diferentes condiciones y perturbaciones en el perfil de velocidad del flujo. Por ejemplo flujo laminar, flujo turbulento, asimetría en el perfil de velocidad y vórtices en fluido entre otros [13-14], [23-29]. Estas perturbaciones sobre el perfil de velocidad son causadas por las condiciones de instalación del medidor. El efecto de estas condiciones de instalación también ha sido investigado a través de estudios completamente experimentales [30-31].

Las condiciones y el perfil de velocidad del fluido alteran el desempeño de los USM principalmente debido al efecto que tiene el perfil sobre la propagación de ondas en el medio. Por esta razón el modelado y simulación dentro de las investigaciones del efecto del perfil de velocidad se enfoca a la propagación de ondas en el medio. El método más usado para modelado y simulación dentro de las investigaciones sobre el efecto del perfil de velocidad es el RTM para la propagación de ondas, en conjunto con el uso de modelos teóricos o herramientas CFD “Computational Fluid Dynamics” para el perfil de velocidad del fluido [13-14], [23], [26-28]. Otra forma en el cual se ha abordado el análisis de este efecto es tomando como base el modelo matemático del principio de operación del USM de tiempo de tránsito, que fue descrito en el conjunto de ecuaciones 1-4, integrándole un modelo particular para la velocidad de fluido [25],[29].

#### 3.3 Otros Efectos de las Condiciones del Fluido

Otra condición de operación que afecta el desempeño de un USM es la temperatura de operación del fluido. Los efectos de la temperatura son principalmente dimensionales sobre el cuerpo del medidor [32] y sobre la propagación de las ondas en el medio



Fig 3. Sistemas que conforman la medición de flujo utilizando ultrasonido

[33]. Este último efecto puede generar desviaciones en la medición afectando el desempeño del USM. Dentro de los trabajos revisados, se destacan [33-34] donde se realizó el análisis y cuantificación de los efectos térmicos sobre el desempeño del USM usando la ecuación de onda.

Adicionalmente en las investigaciones realizadas respecto a las condiciones del fluido también se encuentra un trabajo enfocado al efecto del denominado flujo pulsante sobre el desempeño de los USM. En este se analizan los errores que genera el flujo pulsante en la medición del USM usando el principio de operación descrito en el numeral 2. En particular se analiza el error generado para un USM que utiliza el algoritmo de detección de cruce por cero para la cuantificación del tiempo de tránsito [35].

### 3.4 Transductores

Los transductores constituyen una parte fundamental en el diseño y el desempeño de un USM. Su función es transmitir y recibir las señales acústicas en el fluido a medir de la forma más eficiente (un pulso bien definido y con buena dirección), tratando de evitar la transmisión de acústica al cuerpo del medidor [3], [36]. En este contexto los estudios realizados a través del modelado y la simulación de transductores se han enfocado principalmente a optimizar los diseños en corto tiempo reduciendo la realización de experimentos, la evaluación de nuevos materiales y la comprensión más profunda de la propagación de ondas ultrasónicas en sólidos [37-42]. Existen diferentes modelos para los transductores basados en el principio de piezoelectricidad como los usados en los USM, desde los unidimensionales simples como KLM o el modelo Manson, hasta la solución numérica del modelo completo del transductor descrito por las ecuaciones 5 y 6 que se presentan en [37], [43-44]:

$$[\sigma] = [c^E][S] - [e]^T E \quad (5)$$

$$D = [e][S] + [\epsilon^S] E \quad (6)$$

En la ecuación 6 se muestra la función para el cálculo del desplazamiento eléctrico D, causado por polarización con un campo eléctrico E en un cristal piezoeléctrico con una matriz de constantes dieléctrica  $[\epsilon^S]$ , a una tensión mecánica S, que también es función del tensor de tensiones lineales [ S ] y el modulo piezoeléctrico [ e ]. De otra parte la ecuación 5 relaciona el tensor de tensiones mecánicas [  $\sigma$  ] con el tensor de rigidez mecánica [  $c^E$  ] para un campo eléctrico constante E, el tensor de tensiones lineales, y la transpuesta del módulo piezoeléctrico.

Cuando se afronta el problema de modelado y simulación de los transductores partiendo de las ecuaciones anteriores, se llega a un sistema de ecuaciones en derivadas parciales que incluyen la ecuación de onda en sólidos. La solución numérica de las ecuaciones resultantes en la mayoría de los casos se obtiene utilizando el método de los elementos finitos [37-42]. De igual forma diversos paquetes de simulación comerciales (por ejemplo Comsol® o Ansys®) que poseen la capacidad de simular transductores lo realizan a través del método descrito [45-46]. Es necesario aclarar que los trabajos relacionados con el modelado y la simulación de transductores no solo están enfocados a USM, sino a múltiples campos de la física y la ingeniería donde la generación de ondas acústicas a través de estos dispositivos es utilizada.

## 4 MÉTODOS Y MODELOS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN DE "USM"

### 4.1 Ecuación de Propagación de Onda

Una de las primeras formas de modelar y simular la propagación de ondas fue a través de la ecuación Helmholtz [47]. Para las aplicaciones relacionadas con los USM, es necesario, mediante la aproximación de una solución numérica, resolver la ecuación con condiciones de frontera definidas para sólidos (transductores y paredes del tubo para el caso de los

medidores con transductores exteriores a la tubería denominados clamp-on [3]) y fluidos (la variable a medir) [19]. La ecuación de onda en su forma más general para sólidos y fluidos se presenta en las expresiones 8 y 9 respectivamente[44]:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (8)$$

$$\nabla \left( \rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - (\lambda_1 + 2\mu_1) \nabla \cdot \nabla \psi \right) + \nabla \times \left( \rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \lambda_1 \nabla \cdot \nabla \psi \right) = 0 \quad (9)$$

Donde:

$$\lambda_1 = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (10)$$

$$\mu_1 = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (11)$$

En (8) se puede observar la ecuación diferencial que describe la propagación de la presión acústica p (generada por una onda acústica) en el espacio (a través del laplaciano  $\nabla^2$ ) y en el tiempo (t), incluyendo la velocidad del sonido en el medio. De otra parte, la ecuación diferencial 9 describe el comportamiento de las componentes escalar y vectorial del potencial del desplazamiento mecánico u (ver ecuación 12) causado por la propagación de una onda en un sólido. En esta ecuación aparecen los dos parámetros de Lamé  $\lambda_1$  y  $\mu_1$  que forman una parametrización del módulo de elasticidad para un medio isótropo homogéneo y son función del módulo de Young E y radio de Poisson  $\nu$  (ecuaciones 11 y 12) [43-44].

$$u = \nabla \psi + \nabla \times \psi \quad (12)$$

Para el caso de los fluidos es importante mencionar que existen diferentes modelos matemáticos que describen la propagación de las ondas acústicas en fluidos en movimiento. En las aplicaciones relacionadas con modelado y simulación de USMs, los resultados obtenidos con diferentes modelos de la propagación de onda pueden presentar desviaciones bajo diferentes condiciones del perfil de velocidad del fluido [48].

Como ya se mencionó, para realizar la simulación basándose en la ecuación de onda es necesario aproximar numéricamente su solución. Una técnica generalmente utilizada en esta labor es el método de los elementos finitos FEM (por sus siglas en inglés Finite Element Method) [19]. En

términos generales, el método consiste en discretizar el dominio o volumen de trabajo en una serie de pequeños elementos que tienen una geometría simple. El comportamiento de cada elemento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”, obteniendo un conjunto de ecuaciones algebraicas de la cantidad física (presión acústica para el caso de la ecuación 8) en estos nodos [44], [49].

El modelado basado en la ecuación de onda y FEM, es herramienta validada y de amplio uso principalmente para el análisis de los transductores dentro del campo del modelado y simulación de USM [37-42]. Por otro lado, la ecuación de onda y FEM no son muy utilizados para el modelado y simulación de propagación de onda en el fluido debido a sus costos computacionales en las condiciones de aplicación específicas de los USM (longitud de onda corta y volumen de trabajo de grandes dimensiones) [22].

#### 4.2 Método de Trazo de Rayos

El “Ray-Trace Method” RTM como se denomina en inglés, es un método que forma parte de la denominada teoría de rayos. La teoría de rayos es una noción alternativa de la propagación de ondas acústicas en fluidos en reposo y movimiento. Esta teoría tiene la ventaja de ser más clara y simple que la teoría de ondas. No obstante, la teoría de rayos pura no puede explicar algunos efectos la propagación de ondas como la difracción [19]. Este método fue presentado por primera vez 1968 con el fin de predecir el comportamiento acústico de salas de conciertos [50]. En el RTM la energía de una onda acústica es dividida en diferentes elementos (rayos) que se emiten en varias direcciones desde la superficie de la fuente. Los rayos acústicos se propagan a través del medio con la velocidad del sonido, obedeciendo las leyes de la acústica geométrica. La distribución de la energía del sonido en función del tiempo, cuando se utiliza el RTM, se



Fig 4. Diagrama esquemático modelo matemático RTM basado en el diagrama reportado en [19]

obtiene por integración en todos los rayos que llegan al punto de recepción, y así estimar el tiempo de tránsito de la onda acústica [27].

Los modelos matemáticos de la teoría de rayos están basados en concepto de frente de onda (ver Fig 4). Para determinar la trayectoria de un punto en movimiento en un frente de onda que se propaga en un fluido en movimiento se tiene el conjunto de ecuaciones 13 a 15 que se presentan en [19]:

$$\mathbf{b} = \frac{\mathbf{n}}{(c + \mathbf{V} \cdot \mathbf{n})} \quad (13)$$

$$\frac{d\mathbf{x}_p}{dt} = \frac{c^2 \mathbf{b}}{1 - \mathbf{V} \cdot \mathbf{b}} + \mathbf{V} \quad (14)$$

$$\frac{d\mathbf{b}}{dt} = -\mathbf{b} \times (\nabla \times \mathbf{V}) - (\mathbf{b} \cdot \nabla) \mathbf{V} \quad (15)$$

La ecuación 14 permite obtener la trayectoria que sigue cada rayo desde la fuente puntual en función de la velocidad del fluido, la velocidad del sonido en el medio y vector lentitud de onda  $\mathbf{b}$ . La ecuación 13 muestra la relación entre el vector lentitud de onda con la velocidad del fluido, la velocidad del sonido en el medio y el vector normal al frente de onda  $\mathbf{n}$ . Por ultimo la ecuación 15 permite calcular el cambio del vector  $\mathbf{b}$  en el tiempo debido a la velocidad del fluido [19].

Los resultados obtenidos con este método de modelado han sido validados a través de la comparación con resultados de pruebas experimentales y/o datos obtenidos mediante otros métodos y modelos. En particular para el caso de las validaciones con datos experimentales es importante tener en cuenta que las condiciones del fluido de prueba sean tenidas en cuenta en el modelo, por ejemplo el perfil de velocidad [13], [17], [23], [51].

#### 4.3 Método de la Integral de Helmholtz-Traza de Rayos HIRM

El HIRM (por sus siglas en inglés Helmholtz-Integral-RayTracing Method) es un método para el modelado y la simulación de la propagación de ondas acústicas en medios en movimiento. Este método publicado en año 2004 permite el modelado y la simulación de la propagación de ondas en medios en movimiento con menores requerimientos computacionales que la resolución numérica de la ecuación de onda utilizando FEM [52]. Comparado con el RTM el HIRM presenta la ventaja de tener en cuenta los fenómenos ondulatorios que la acústica de rayos omite [52], aunque su complejidad de implementación es mayor.

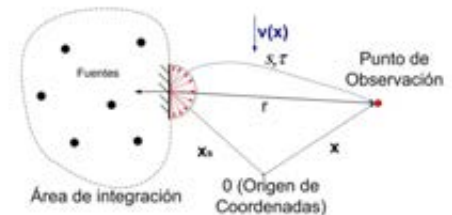


Fig 5. Integral de Helmholtz para medio estático y en movimiento presentado en [52], traducido por el autor

El HIRM se basa en la combinación de la técnica de RTM y la integral de Helmholtz derivada de la función de Green generalizada. La integral de Helmholtz puede interpretarse como la expresión matemática del principio de Huygens: El campo acústico en un punto determinado se obtiene mediante la superposición de ondas elementales generadas por fuentes primarias a lo largo de una superficie en torno al punto. Esta interpretación es la idea fundamental del método, la propagación de las ondas elementales de cada fuente primaria se modela por medio de RTM, mientras que la estructura de la integral de Helmholtz se mantiene sin cambios. En la Fig 5 se puede observar como cambia la trayectoria original  $r$  (medio estático) a la trayectoria  $s$  (medio en movimiento), la cual es obtenida con el RTM. El HIRM parte de modificar la longitud de la trayectoria  $r$  en la función de Green  $G(X_0 | X_s)$  para fuente puntual ubicada en la posición  $X_s$ , un observador

ubicado en  $X_0$  y un medio estático (ecuación 16), por la trayectoria para un medio en movimiento  $s$  y su respectivo tiempo de viaje  $t$ . Realizados los cambios se obtiene la función de Green para un medio en movimiento  $G(X_0 | X_s)$  (ecuación 18). Por último se reemplaza la  $G$  por  $\tilde{G}$  en integral de Helmholtz (ecuación 17), obteniendo la ecuación 19 con cual se modela la propagación de ondas acústicas en medios en movimiento [19].

$$G(\mathbf{x}_0 | \mathbf{x}_s) = \frac{e^{i\omega t}}{r} \quad (16)$$

$$\psi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \iint_A \left( \psi \frac{\partial G}{\partial ns} - G \frac{\partial \psi}{\partial ns} \right) dA + \eta(\mathbf{x}) \quad (17)$$

$$\tilde{G}(\mathbf{x}) = \frac{e^{i\omega t}}{s} \quad (18)$$

$$\psi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \iint_A \frac{e^{i\omega t}}{s} \left( -\frac{1}{s} \frac{\partial s}{\partial ns} \dot{\psi} + \frac{\partial \tau}{\partial ns} j\omega \dot{\psi} - \frac{\partial \dot{\psi}}{\partial ns} \right) dA \quad (19)$$

La validación del HIRM se realizó comparando contra resultados obtenidos utilizando FEM para un ejercicio teórico. El ejercicio consistió en un pistón vibrante que genera ondas acústicas en dirección perpendicular a un fluido en movimiento [52]. Adicionalmente se realizó una validación usando datos experimentales para la propagación de ondas acústicas en agua, al interior de una tubería [53].

#### 4.4 Modelo Matemático del USM

Uno de los métodos utilizados para estudiar los diferentes aspectos mencionados en el numeral 3 es el análisis numérico del modelo matemático del principio de operación de los USM presentado en el numeral 2). En particular lo que se realiza es incluir el efecto del fenómeno a estudiar en alguno de los parámetros del modelo matemático. Por ejemplo se incluye el efecto del perfil de velocidad en el vector velocidad del fluido [33], o efecto del flujo pulsante en el tiempo de tránsito [35].

### 5 CONCLUSIONES

En el presente artículo se llevó a cabo una revisión de los modelos y métodos más utilizados en el modelado y simulación de USM, junto con los

principales parámetros de operación y diseño que han sido estudiados y analizados a través de modelado y simulación. Dentro de los modelos y métodos se destaca el uso del RTM para el modelado y la simulación de las ondas en el fluido. El RTM tiene como ventaja su menor complejidad de implementación comparada con los métodos basados en la ecuación de onda. Adicionalmente presenta buenos resultados en especial para los trabajos relacionados con el perfil de velocidad del fluido. No obstante presenta algunas limitantes debidas a la omisión de algunos fenómenos ondulatorios. Dentro de este contexto en el año 2004 se publicó un nuevo método de modelado de la propagación de ondas en el fluido denominado HIRM. El HIRM combina el RTM con la integral de Helmholtz con el fin incluir los fenómenos ondulatorios que son omitidos por el RTM puro. La aplicación más relevante del HIRM, consistió en el modelado y simulación de un USM tipo clamp-on para medición de líquidos, donde se obtuvieron buenos resultados comparados con datos experimentales.

Por otra parte para los transductores y la propagación de ondas en la pared de la tubería para el caso de los clamp-on, se destaca el uso de la ecuación de onda con FEM como método de resolución numérica. Esta forma de modelado y simulación de la propagación de las ondas acústicas (ultrasónicas en el campo de USM) en sólidos (transductores y pared del tubo), es un método bien establecido y ha mostrado resultados válidos comparados con datos experimentales y valores teóricos. Del mismo modo, en los software comerciales para modelado y simulación de ondas acústicas en transductores y sólidos, es común el uso de FEM para la resolución numérica de la ecuación de onda.

En resumen se puede observar que el modelado y la simulación son herramientas que han sido de gran utilidad en estudio de los diferentes aspectos que afectan el desempeño de los medidores ultrasónicos para volumen y caudal de fluidos. El

objetivo final que se debe alcanzar con ayuda de estas herramientas (modelado y simulación), no solo debe ser el de mejorar el diseño de los medidores, sino también conocer y cuantificar los aspectos que afectan esta tecnología, para que puedan ser tenidos en cuenta con el fin de realizar mediciones correctas en las diferentes condiciones de operación en las que los medidores ultrasónicos son utilizados.

### REFERENCIAS

- [1] Endress+Hauser Flowtec AG, "Medición de Caudal", Endress+Hauser Flowtec 2005.
- [2] The Instrumentation, Systems, and Automation Society ISA, "Flow Measurement", D. W. Spitzer Editor 2001.
- [3] R. Baker, "Flow measurement handbook", Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [4] L.C. Lynnworth and Y. Liu, "Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005", Ultrasonics Vol 44, pp.1371-1378, 2006.
- [5] M. Yamamoto et Al, "Ultrasonic Flow Quantity Apparatus", US Patent 3329017, 1967.
- [6] V. Klooster et Al, "Ultrasonic Flowmeter", US Patent 20080141786A1, 2008.
- [7] J. Drenthen, M. Kurth and M. Vermeulen, "A Novel Design of a 12-Chord Ultrasonic Gas Flow Meter", KROHNE New Technologies, 2009.
- [8] J. Drenthen, M. Kurth and M. Vermeulen, "Verification of ultrasonic gas flow meters", KROHNE New Technologies, 2009.
- [9] V. Herrmann and T. Dietz, "Low Pressure Gas Measurement Using Ultrasonic Technology", SICK MAIHAK, 2009.
- [10] V. Herrmann, M. Wehmeier, T. Dietz, R. Kramer and B. Mickan, "A New Low Pressure Calibration Facility Using 8-Path Ultrasonic Meters as Working Standards", SICK MAIHAK, 2006.
- [11] P. Martinsson, "Characterization of Energy Gases by Ultrasound – Theory and Experiments", Ph.D. Thesis, University of Lulea Sweden, 2004.
- [12] P. Martinsson and J. Carlson, "Investigating the Feasibility of Using Principal Component Analysis for Ultrasonic Classification of Gas Mixtures", IEEE Ultrasonic Symposium, 2003.
- [13] F. Weber, "Ultrasonic Beam Propagation in Turbulent Flow", Worcester polytechnic institute. Doctor of Philosophy Thesis. Worcester, Massachusetts, EEUU, 2003.
- [14] T. Yeh and G. Mattingly, "Computer

- Simulation of Ultrasonic Flow Meter Performance in Ideal and Non-Ideal Pipeflows", ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, 1997.
- [15]M. Willatzen and H. Kamath, "Nonlinearities in ultrasonic flow measurement", Flow Measurement and Instrumentation Vol. 19 pp. 79–84, 2008.
- [16]Groupe Europeen de Recherches Gazieres GERG, "Project on Ultrasonic Gas Flow Meters, Phase II", 2004.
- [17]N. Temperly, "Optimisation of an Ultrasonic Flow Meter Based on Experimental and Numerical Investigation of Flow and Ultrasound Propagation", University of New South Wales. Doctor of Philosophy Thesis. Sydney, Australia, 2002.
- [18]M. Dell'Isola, M. Cannizzo and M. Diritti, "Measurement of High-Pressure Natural Gas Flow Using Ultrasonic Flowmeters", Measurement Vol. 20, No. 2, pp. 75-89, 1997.
- [19]M. Bezděk, "Numerical Modeling of Ultrasonic Flowmeters: A Coupled Finite-Element, Boundary-Integral Method", Saarbrücken Germany: VDM Verlag, 2008.
- [20]American Gas Association AGA, "Report N° 9 Measurement of gas by multipath ultrasonics meters", Second Edition, 2007.
- [21]American Petroleum Institute API "Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 5 Section 8-Measurement of Liquid Hydrocarbons by Ultrasonic Flow Meters Using Transit Time Technology", First Edition, 2005.
- [22]M. Bezděk, H. Landes, A. Rieder and R. Lerch, "A Coupled Finite-Element, Boundary-Integral Method for Simulating Ultrasonic Flowmeters", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol 54, pp. 636-646, 2007.
- [23]Symposium T. Yeh and G. Mattingly, "Ultrasonic Technology: Prospect for Improving Flow Measurement and Standars", Flow Symposium National Institute of Standars and Technology NIST, USA 1999.
- [24]M Rychagov and S Tereshchenko, "Multipath Flowrate Measurements of Symmetric and Asymmetrics Flows", Inverse Problems, Vol 16, pp. 495-504, 2000.
- [25]P. Moore, G. Brown and B. Stimpson, "Ultrasonic Transit-time flowmeters Modeled with Theoretical Velocity Profiles: Methodology", Measurement Science and Technology, Vol 11, pp. 1802-1181, 2000.
- [26]K. Frøysa, P Lunde and M Vestrheim, "A Ray Theory Approach to Investigate the Influence of Flow Velocity Profiles on Transit Times in Ultrasonic Flow Meter for Gas and Liquid", 19th International North Sea Flow Measurement Workshop, 2001.
- [27]H. Koechner and A. Melling, "Numerical Simulation of Ultrasonic Flowmeters", Acustica, Vol 86, pp.39-48, 2000.
- [28]P. Moore, U. Piomolli, A. Jonson and P. Espina, "Simulation of Ultrasonic Transit Time in a Fully Developed Turbulent Flow Using a Ray-Tracing Method", North Sea Flow Measurement Workshop, 2002.
- [29]T. Yeh and P. Espina, "Special Ultrasonic Flowmeters for In-Situ Diagnosis of Swirl and Cross Flow" Fluid Flow Group of National Institute of Standards and Technology NIST, USA 2001.
- [30]C. Ruppel and F. Peters, "Effects of Upstream Installations on the Reading of an Ultrasonic Flowmeter", Flow Measurement and Instrumentation, Vol 15, pp. 167–177, 2004.
- [31]C. Carlander and J. Delsing, "Installation Effects on an Ultrasonic Flow Meter With Implications for Self Diagnostics", Flow Measurement and Instrumentation, Vol 11, pp. 109–122, 2000.
- [32]P. Lunde and K. Frøysa, "Handbook of Uncertainty Calculations Ultrasonic Fiscal Gas Metering Stations", The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement (NFOGM) and The Norwegian Petroleum Directorate (NPD), 2001.
- [33]M. Willatzen, "Temperature Gradients and Flow-Meter Performance", Ultrasoncis, Vol 39, pp. 383-389, 2001.
- [34]M. Willatzen, "Ultrasonic Flowmeters: Temperature Gradients and Transducer Geometry Effects", Ultrasonics, Vol 41, pp. 105-114, 2003.
- [35]J. Berrebi, P. Martinsson, M. Willatzen, and J. Delsing, "Ultrasonic Flow Metering Errors due to Pulsating Flow", Flow Measurement and Instrumentation, Vol 15, pp. 179–185, 2004.
- [36]Instroment, "Ultrasonic GasMeters Handbook", 2002.
- [37]R. Lerch, "Finite Element Analysis of Piezoelectric Transducers" IEEE Ultrasonics Symposium, 1988.
- [38]R. Ramesh , C. Prasad, T. Kumar , L. Gavane and R Vishnubhatla, "Experimental and Finite Element Modelling Studies on Single-Layer and Multi-Layer 1–3 Piezocomposite Transducers", Ultrasonics, Vol 44, pp. 341-349, 2006.
- [39]H. Li, C. Chonga, H. Lai-Wah, and P. Chou-kee, "Finite Element Analysis on 1-3 Piezocomposite Rings for Ultrasonic Transducer Applications" Ceramics International Vol 30, pp. 1827–1830, 2004.
- [40]W. Loveday, "Analysis of Piezoelectric Ultrasonic Transducers Attached to Waveguides Using Waveguide Finite Elements", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol 54, pp. 2045-2051, 2007.
- [41]R. Lerch, "Simulation of Piezoelectric Devices by Two- and Three-Dimensional Finite Elements" IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol 37, pp, 233-247, 1990.
- [42]W. Montealegre, E. Nelly, F. Buiochi and J. Adamowski, "Modelling of FGM Piezoelectric Transducers Using Graded Finite Element Concept", ABCM Symposium Series in Mechatronics, Vol 3, pp. 552-561, 2008.
- [43]J. Cheeke, "Fundamental and Applications of Ultrasonic Waves", Florida: CRC Press LLC, 2002.
- [44]M. Kaltenbacher, "Numerical Simulation of Mechatronic Sensors and Actuators", Universität Erlangen ,LS Sensorik, Springer 2007.
- [45]J. Dunec, "Multiphysics Simulation of Acoustics", Comsol Web Seminar, 2009.
- [46]S. J. Ippolito, K. Kalantar-zadeh, D. A. Powell and W. Wlodarski, "A 3-Dimensional Finite Element Approach for Simulating Acoustic Wave Propagation in Layered SAW Devices", IEEE Ultrasonics symposium, 2003.
- [47]M.G. Blytha and C. Pozrikidis, "A Comparative Study of the Boundary and Finite Element Methods for the Helmholtz Equation in Two Dimensions", Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol 31 pp. 35-49, 2007.
- [48]M. Willatzen, "Flow Acoustics Modelling and Implications for Ultrasonic Flow Measurement Based on the Transit-Time Method", Ultrasonics, Vol 41 pp. 805–810, 2004.
- [49]M. J. Crocker, "Handbook of Acoustics", New York: John Wiley & Son, 1998.
- [50]P. Svensson, "The Early History of Ray Tracing in Room", Norwegian University of Science and Technology, Research Report, Trondheim, Norway, 2008.
- [51]S. Manneville, C. Prada, M Tanter, and M. Fink, "Ultrasound Propagation Through a Rotational Flow: Numerical Methods Compared to Experiments", Journal of Computational Acoustics, Vol. 9, pp. 841-852, 2001
- [52]M. Bezděk, A. Rieder, H. Landes, R. Lerch and W Drahm, "A Novel Numerical Method for Simulating Wave Propagation in Moving Media", IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 934-937, 2004.
- [53]M. Bezděk, A. Rieder, H. Landes, R. Lerch and W Drahm, "A Novel Boundary Integral Formulation for Acoustic Radiation in a Nonuniform Flow: Coupling to FEM and Applications", IEEE Ultrasonics Symposium, 2005.