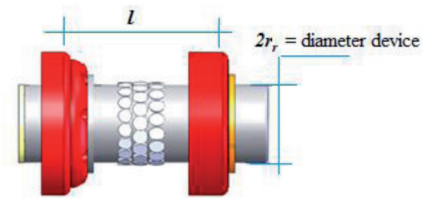


Análisis de curvatura para la reconstrucción del tendido de tubería, mediante equipo instrumentado con ultrasonido



Curvature analysis for pipeline laying reconstruction with ultrasonic inspection gauge



Antonio Ramírez-Martínez¹, Abisai Jaime Resendiz-Barrón², Jorge Soto-Cajiga¹, Hugo Jiménez-Hernández¹ y Carlos Rubio-González¹

¹ CIDESI. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Dpto. Investigación Aplicada en Mecatrónica. Av. Playa Pie de la Cuesta, 702 - Querétaro (México). Tfno: +52 442 2119800. armartinez@cidesi.mx

² INSTITUTO TECNOLÓGICO DE QUERÉTARO. Av. Tecnológico, s/n - Querétaro (México).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7571> | Recibido: 27/02/2015 • Aceptado: 20/04/2015

ABSTRACT

• This paper presents a pipeline curvature analysis using a device instrumented with ultrasound transducers. The device is conceptualized as a capsule with radial-fixed ultrasonic transducers, thus we have an alternative to conventional devices, which use mobile transducers (mounted on mechanical arms). The proposed configuration enables conventional ultrasonic inspection and simultaneously geometric inspection. Another advantage of the configuration is that the device does not use mechanical arms, so physical equipment space is reduced, increasing its mobility in reduced sections (smaller diameter).

The pipeline inspection can be separated into two groups, straight sections and curved sections; in the straight sections are maintained at all times perpendicularity between ultrasound transducers and the pipeline wall, always guaranteeing the detection of echoes in the transducers. However, in the curved sections, can lose the perpendicularity, which can cause loss of ultrasound signals, this is corrected with the proposed configuration, since the perpendicularity of at least one section of transducers is ensured.

This article focuses on the analysis of curvature for three dimensional pipeline laying reconstruction, using the orthogonality property of the tangent line between the pipeline surface and the direction of the ultrasonic wave emitted by the transducers.

• **Key Words:** Instrumented capsule, circumference chord, pipeline curvature, ultrasonic transducer, pipeline geometry.

RESUMEN

Este artículo presenta un análisis de curvatura de tubería utilizando un equipo instrumentado con transductores de ultrasonido. El equipo está conceptualizado por una capsula con transductores de ultrasonido fijos, colocados radialmente, de esta forma se tendrá una alternativa a la convencional que utiliza transductores móviles (montados sobre brazos mecánicos). La configuración propuesta permite realizar la inspección de ultrasonido convencional y al mismo tiempo medir las deformaciones geométricas. Otra ventaja de la configuración es que al no usar brazos mecánicos, el espacio físico del equipo se reduce, incrementando su movilidad en secciones reducidas (de menor diámetro).

La inspección de las tuberías se puede separar en dos grupos, secciones rectas y secciones curvas; en las secciones rectas se mantiene en todo momento la perpendicularidad entre los trans-

ductores de ultrasonido y la pared de la tubería, garantizando la detección de ecos en los transductores en todo momento. Sin embargo, en las secciones curvas, se puede perder la perpendicularidad, lo que puede provocar la pérdida de señales de ultrasonido, esto se corrige con la configuración propuesta, ya que se garantiza la perpendicularidad de al menos una sección de transductores.

Este artículo se enfoca en el análisis de curvatura para la reconstrucción tridimensional del tendido de tuberías, utilizando la propiedad de ortogonalidad entre la línea tangente de la superficie de la tubería y la dirección de la onda del ultrasonido emitida por los transductores.

Palabras Clave: Capsula instrumentada, cordón de circunferencia, curvatura de tubería, transductor de ultrasonido, geometría de tubería.

1. INTRODUCCIÓN

Muchas investigaciones se han realizado utilizando diferentes tipos de diablos instrumentados con diferentes fines:

Shugen y Atsushi [1] analizan la movilidad de robots dentro de secciones de tubos curvados combinando distintos tipos de mecanismos a fin de hacer la mejor combinación de ellos para un mejor desempeño durante la navegación.

Lesani, Rafeeyan y Sohankar [2] dedujeron y resolvieron las ecuaciones dinámicas en dos y tres dimensiones para un pequeño indicador de inspección de ductos (PIG) a través de una tubería. Estas ecuaciones pueden ser utilizadas para la síntesis de un controlador de velocidad de un (PIG) con orificio de derivación.

La combinación de la última tecnología de sensor de geometría (compuesto de brazos mecánicos y de sensores de proximidad) desarrollado por ROSEN [3], con sistemas de navegación inercial proporcionan información de la curvatura como base para los cálculos de esfuerzos. Las proporciones relativas de esfuerzos y curvatura, así como de los datos conocidos de espesor de pared y diámetro permiten el cálculo indirecto regional y local de los valores de esfuerzo. La repetitividad es importante para establecer las causas de los valores específicos de los crecientes esfuerzos detectados en las secciones de gasoductos a través de los análisis de las inspecciones realizadas a intervalos regulares durante muchos años [4].

Adams, Price y Smith, obtuvieron la patente inercial basada en el sistema de monitoreo de tuberías [5], basado en un sistema de monitoreo para determinar perfil, ovalidad y desplazamiento de petróleo, gas y productos de oleoductos.

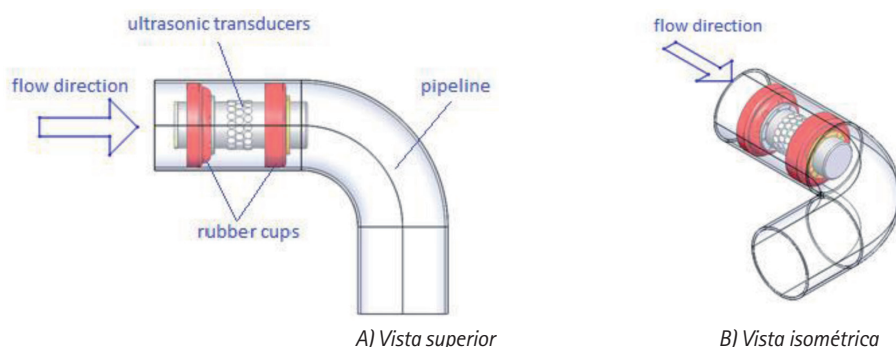


Fig. 1: Cápsula instrumentada dentro de la tubería: a) vista superior y b) vista isométrica

Transductores ultrasónicos son generalmente distribuidos en cápsulas para navegar por los gasoductos utilizando el flujo del fluido [6, 7]. Se colocan un par de soportes de poliuretano ubicados en el extremo de la cápsula (copas de goma). Entonces, el diferencial de presión del fluido entre ellas permite a la cápsula navegar a través de la tubería, la adquisición de datos se recupera una vez que la cápsula se extrae de la tubería al final de la inspección.

El agua o una mezcla de agua con hidrocarburo es la causa de la corrosión y escoria [7, 8]. Debido a la fricción del flujo, zonas curvas son altamente afectadas por la turbulencia provocada por el fluido desgastando el espesor de la pared. Un dispositivo Instrumentado es necesario para monitorear el desgaste y dar el mantenimiento preventivo.

En este trabajo se colocan sensores de ultrasonido sobre la superficie radial del dispositivo, con el objetivo de recuperar la geometría del ducto y además de servir como un sistema redundante para el sistema de navegación.

Enfoques comunes utilizados para la inspección de la geometría de tuberías consisten en brazos mecánicos instrumentados con un sensor de desplazamiento, a fin de registrar la geometría de la pared interna [3, 6, 7], y almacenar en un dispositivo interno toda la información geométrica detectada para su posterior análisis.

Otros defectos de tubería pueden ser analizados con transductores ultrasónicos (por ejemplo, deformaciones, grietas, agujeros, soldaduras, etc.) [9, 10, 11, 12]; sin embargo, por el

alcance de este trabajo no se mencionan en este documento.

Los detalles del dispositivo instrumentado se detallan en la sección siguiente. Se define el problema geométrico a resolver, se da el marco teórico de la relación matemática entre la cuerda de circunferencia y la longitud de la cápsula. Un proceso experimental se lleva a cabo con el fin de asociar la inclinación del transductor con la inclinación del espécimen para aplicarlo en la estimación de la geometría. Los resultados de estos dos métodos para estimar radio de curvatura se

presenta en la sección 3. La geometría del ducto se extrae mediante las ecuaciones del cilindro y toroide. La rotación entre ellos se estima para proporcionar una representación geométrica del sistema. Después, la distancia entre el transductor y la pared de la tubería se calculan a través de una prueba práctica. La discusión acerca de la propuesta que se presenta se realiza en el capítulo 4. Por último, se presentan las conclusiones de este trabajo y se dan algunas recomendaciones sobre posibles aplicaciones sobre reconstrucciones geometrías.

2. METODOLOGÍA

El dispositivo conceptual consiste en una cápsula instrumentada con copas de goma como soportes, Fig. (1) está cápsula utiliza la presión diferencial del fluido para navegar a través de la tubería.

Los transductores ultrasónicos se fijan radialmente sobre la superficie de la cápsula; esta arquitectura permite la medición de la curvatura de tubería mientras el dispositivo está navegando. Durante la navegación del dispositivo en tramos rectos de tubería la superficie de la cápsula es totalmente paralela a la superficie de la tubería por lo tanto facilita la medición de los ecos de pulsos de ultrasónicos en todos los transductores. Sin embargo, en las secciones de tuberías curvas, ambas superficies: la cápsula y tubería no mantienen una posición paralela. En las zonas no-paralelas, hay una pérdida de energía en las ondas de ultrasonido porque los sensores de ultrasonido tienen un ángulo de inclinación mayor que la cantidad permitida para una lectura fiable. En esta aplicación y en algunas otras, esta situación se vuelve inevitable; pero estamos aprovechándola, usando la pérdida de energía como información relacionada con la curvatura de la tubería.

Para el análisis de la geometría de la curvatura se consideran dos restricciones: (a) cápsula se encuentra dentro de la curva; y (b) cápsula se encuentra parcialmente dentro de la curva.

En la primera restricción se considera la curvatura de la tubería como un segmento de arco de parámetros p y l de radio y cuerda respectivamente, Fig. (2). La segunda restricción ocurre cuando la cápsula se encuentra situada parcialmente dentro de la curva. Sin pérdida de generalidad, la cápsula entra o sale en forma tangencial a la superficie de la curva, como se ilustra en la Fig. (3). La cuerda c de la circunferencia está constituido con el punto de apoyo de la copa y la intersección de la prolongación de la curvatura y la cápsula, Fig. (3). La longitud de la cuerda c es menor que la longitud de la cápsula, de hecho está determinada por la posición del transductor fuera del centro de la cápsula, que se corresponde a una posición en el centro del segmento c .

De acuerdo a la onda del sonido, el ángulo de incidencia es igual a su ángulo de reflexión. Un transductor de ultrasonido tiene su máxima recepción de energía de señal cuando su onda sonora incide de forma perpendicular a la superficie de interés. En resu-

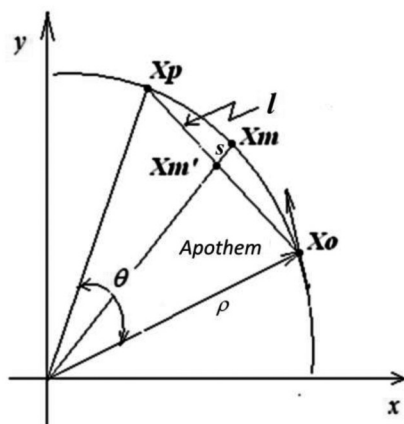


Fig. 2: representación geométrica de la cápsula dentro de la curva

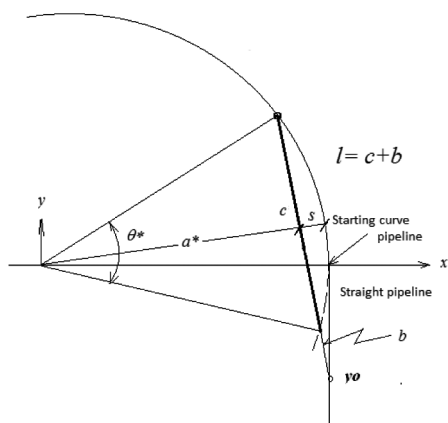


Fig. 3: Representación de la cápsula parcialmente en el interior de una curvatura

men, considere la longitud de la cápsula igual a cuerda l , dentro de la curvatura de radio ρ , como se muestra en la Fig. (2). Las ecuaciones de la cuerda son:

$$l = 2\rho \sin \frac{\theta}{2}, \text{ En función a un ángulo } \theta. \tag{1}$$
$$l = 2\sqrt{\rho^2 - a^2}, \text{ En función a un apotema } a. \tag{2}$$

Con las señales de los transductores fijos sobre la superficie de la cápsula, se obtiene el radio ρ de la curvatura del ducto usando la Eq. (1) y Eq. (2).

A continuación, se proponen dos métodos para estimar los radios de curvatura ρ de cualquier tubería

La primera aproximación para estimar ρ es por medio del parámetro s llamado sagita de cuerda, que se encuentra entre la superficie de la cápsula y la superficie del ducto, en el punto medio de la cuerda l . Esto es, la distancia entre X_m y X_m' , Fig. (2). Se reconoce que los transductores también se pueden utilizar para calcular s . Por último, tenemos $a = \rho - s$, la cual se sustituye en Eq. (2) y se resuelve para ρ .

En el segundo método se define a través de la relación que existe entre la pérdida de energía y la inclinación del transductor ultrasónico o análogamente la inclinación de la superficie. Para este escenario se colocan los transductores cerca de cualquier extremo de la cápsula para establecer la relación. Experimentalmente se valida con un transductor de 5 Mhz. La Fig. (4) muestra las pérdidas de amplitud (pérdida de energía) de acuerdo con el ángulo de incidencia de la señal con respecto a la pared interna del ducto.

Basado en la Fig. (4), Se realiza tabla 1 del ángulo de incidencia y la amplitud de señal medida.

Tabla 1: Relación entre ángulo de incidencia y amplitud de la señal medida

Ángulo α (grados)	Amplitud de pico a pico (Primer eco) (8 bits)	Amplitud de pico a pico (Echo) (8 bits)
0	252	56
$\pm 2,5$	171	26
$\pm 3,75$	104	18
± 5	68	6
>7	0 (Referencia)	0 (Referencia)

Con los datos de la amplitud de la señal de los transductores se comparan con los datos de la Tabla 1 o en la Fig. (5), para obtener el ángulo de inclinación α del transductor con respecto a la superficie de la tubería, como se muestra en la Fig. (6). Este ángulo corresponde a $\theta/2$, el cual se sustituye en la Eq. (1) para estimar ρ .

Los dos métodos planteados permiten obtener el radio de curvatura del ducto, cuando la cápsula está completamente dentro de la curva, es decir, cuando la cápsula forma una cuerda de circunferencia con la curvatura de la tubería.

Cuando la cápsula está parcialmente dentro de la curva, esto es, a la entrada o salida, se repite el procedimiento pero ahora se considera la lectura de los transductores fuera del centro de la cápsula, y la longitud de la cuerda c de circunferencia, la cual está determinada tomando como punto central de la posición del transductor fuera del centro de la cápsula.

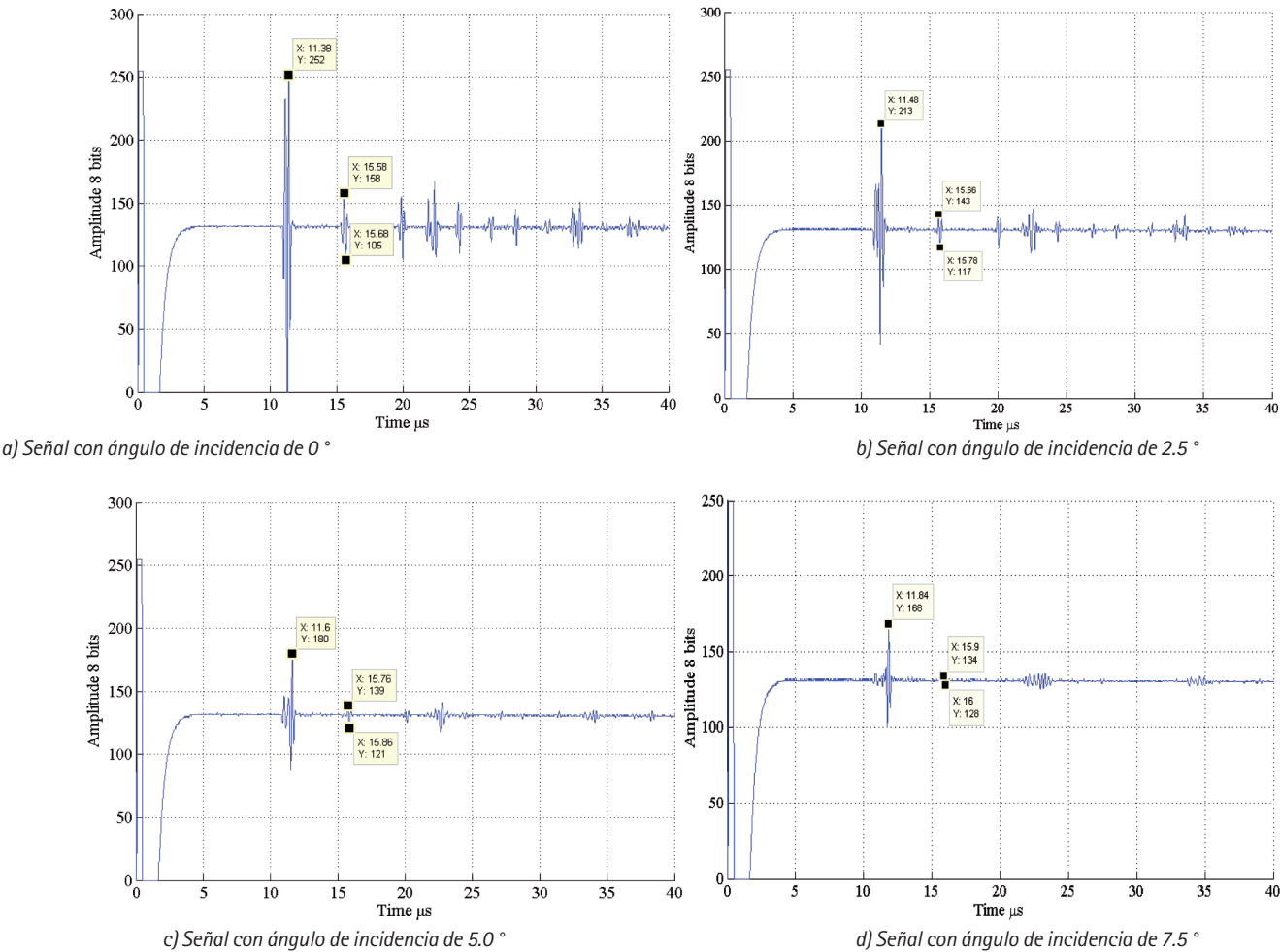


Fig. 4: Relación de pérdida de energía de señales ultrasónicas con respecto al ángulo de incidencia de los casos: a) $\alpha = 0^\circ$, b) $\alpha = 2,5^\circ$, c) $\alpha = 3.75^\circ$, y d) $\alpha = 5.0^\circ$

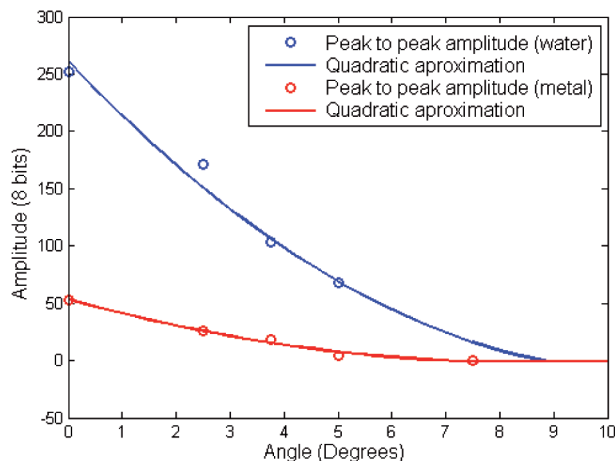


Fig. 5: aproximación Cuadrática de los datos de Tabla 1

$$c = 2\rho \sin \frac{\theta^*}{2}, \text{ En función al ángulo } \theta^*. \quad (3)$$

$$c = 2\sqrt{\rho^2 - a^{*2}}, \text{ En función a la apotema } a^*. \quad (4)$$

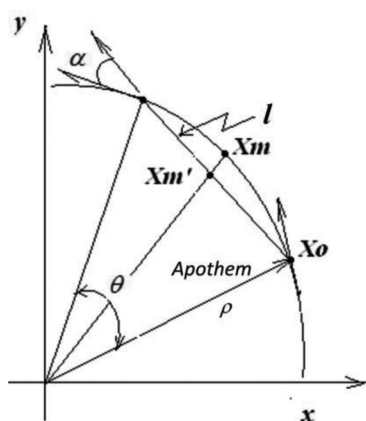


Fig. 6: Ángulo de inclinación α entre el transductor y la superficie interior de la tubería

Para último, se obtiene l ó c por cualquiera de los dos métodos anteriores para obtener una representación gráfica del tendido de la tubería. La superficie se obtiene mediante las ecuaciones del toroide y del cilindro, la cual debe ser rotada y trasladada según vaya indicando el equipo. La superficie de la cápsula es trasladada y rotada para navegar en las curvas de la tubería. La ecuación utilizada para graficar la curvatura del tendido de la tubería está basada en las ecuaciones del toroide en el plano xy , ordenado al origen es:

$$\rho(\rho - \sqrt{x^2 + y^2})^2 + z^2 = r_d^2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} x &= (R + r_d \cos v) \cos \theta; & y &= (R + r_d \cos v) \sin \theta; \\ z &= r_d \sin v \end{aligned} \quad (6)$$

Donde R es el radio del toroide, es el radio interior de la tubería, es el ángulo entre y y horizontal. La cápsula y el tendido de tubería de tramos rectos en el plano xy con origen trasladado una distancia R en el eje x , se definen por la ecuación del cilindro de la siguiente manera:

$$x^2 + z^2 = r_r^2; \quad x = R + r_r \cos v; \quad z = r_r \sin v \quad (7)$$

Donde r_r es el radio de la cápsula, Fig. (7), que cambia a cuando un tramo de tubería es trasladado al eje y , la variable de la Eq. (7) cambia a y y viceversa.

La navegación de la cápsula dentro de la curva está descrita por la Eq. (6), que se deriva de una traslación al eje x seguido de una rotación sobre el eje z .

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} R + r_r \cos v \\ y \end{pmatrix}; \quad z = r_r \sin v \quad (8)$$

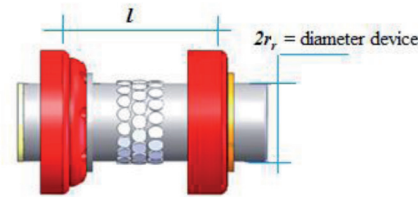


Fig. 7: Los parámetros l y de la cápsula instrumentada

La reconstrucción del tendido del ducto se puede lograr graficando cada tramo recto y curvo y después unirlos mediante una traslación y una rotación sobre cada uno de ellos. La matriz de rotación de un ángulo η alrededor de un eje de n es dada por:

$$Q = \begin{bmatrix} c + n_1^2(1-c) & n_1n_2(1-c) - sn_3 & n_1n_3(1-c) + sn_2 \\ n_1n_2(1-c) + sn_3 & c + n_2^2(1-c) & n_2n_3(1-c) - sn_1 \\ n_1n_3(1-c) - sn_2 & n_2n_3(1-c) + sn_1 & c + n_3^2(1-c) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde $c = \cos(\eta)$ y $s = \sin(\eta)$, y la traslación T es:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Donde $(-t_x, -t_y, -t_z)$ es un vector de desplazamiento. Eq. (8) es una función composición de Q y T en plano xy .

3. RESULTADOS

Esta sección muestra los resultados derivados del análisis anterior. El proceso experimental consiste en reconstruir un tendido de tubería con un diámetro de $2 = 8 \text{ in}$. La cápsula con una longitud de $l = 6 \text{ in}$ y un diámetro de $2 = 5 \text{ in}$. El cuerpo del transductor colocado en la superficie de la cápsula sobresale 0.336 in .

Colocado el transductor en el centro de la cápsula, Fig. (2), se obtiene la distancia que hay entre la cápsula y la pared convexa de la tubería, esto es; $s = ((39.52 - 20.04) \mu s \times 0.0585 \text{ in} / \mu s) / 2 = 0.58 \text{ in}$; por lo tanto $s = 4 - 2.5 - 0.336 - 0.58 = 0.5838 \text{ in}$, Fig. (8). Despejando ρ de Eq. (2) y sustituyendo valores se tiene:

$$\rho = \frac{l^2 + 4s^2}{8s} = \frac{6^2 + 4 \times 0.5838^2}{8 \times 0.5838} = 8 \text{ in}$$

Donde ρ es el radio interior de la curvatura. El radio de curvatura de la tubería está dada por $R = \rho + 4 = 12 \text{ in}$. Para mayor precisión en la entrada y/o salida de la curvatura del ducto, pueden colocarse más transductores sobre la superficie de la cápsula y usar Eq. (2) y Eq. (3).

El tiempo de viaje de la cápsula desde el principio hasta el final de la curva es de $t = 0.175 \text{ s}$ (medido con respecto a la pérdida de energía en los transductores). Considerando una velocidad de navegación de la cápsula de $v = 1 \text{ m/s} = 39.37 \text{ in/s}$, se obtiene un ángulo de curvatura de:

$$\theta_c = (v \times t) / r_c = (39.37 \times 0.175) / 12 = 0.7854 \text{ rad}.$$

Colocando el transductor al inicio de la cápsula, la energía es nula. Para obtener lectura de la medición del transductor se colocó a una distancia de 1.40 in con respecto al centro de la superficie de la cápsula, registrando una amplitud de 168, la cual corresponde a un ángulo de inclinación $\alpha = \theta/2 = 5^\circ$ de acuerdo a Tabla 1. Despejando ρ de Eq. 1 y sustituyendo valores se obtiene:

$$\rho = \frac{l}{2\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} = \frac{1.40}{2\sin(5^\circ)} = 8in$$

Lo cual implica un radio de curvatura de $R=p+4=12in$. En particular, para realizar esta prueba, el tiempo de navegación es el doble, de modo que $\theta_c=1.5708rad$. Para mayor precisión se pueden utilizar las Eq. (1) y/o Eq. (3).

Las tuberías se representan mediante los criterios de referencia del toroide. De las Ec. (6), Eq. (7) y Eq. (8) se obtuvieron las siguientes gráficas.

La distancia del transductor a la superficie de la tubería se estimó mediante Fig. (9), este es el resultado de una prueba de laboratorio, que se basa en una medición con un transductor de inmersión sobre una placa.

La distancia entre los dos ecos de amplitud mayor representa el tiempo de vuelo de la onda ultrasónica en el agua, esto es $t=(39.52-20.04)\mu s$, luego multiplicado por la velocidad del sonido en el agua $v_a=0.0585\mu s/in$ para obtener dos veces la distancia del transductor a la pared de la placa de acero, entonces $w=((39.52-20.04)\mu s \times 0.0585 in/\mu s)/2=0.58in$.

Análogamente se puede obtener el espesor de pared de la placa de acero, utilizando el tiempo de vuelo entre el primer eco y el segundo eco $t=21.53-23.11\mu s$, considerando ahora la velocidad del sonido en el acero $v_{ac}=0.232\mu s/in$. Entonces el espesor del espécimen es $e=((21.53-23.11)\mu s \times 0.232 in/\mu s)/2=0.184in$.

4. DEBATE

Las pruebas de laboratorio anteriores idealizaron la navegación de la cápsula instrumentada en un ducto. En escenarios reales la cápsula gira sobre su propio eje durante la navegación, por lo cual se requiere de un dispositivo que permita la orientación del transductor respecto a la curvatura en el espacio. El estudio presentado, puede ser usado como complemento en un sistema de reconstrucción tridimensional (3D) de tendido de ductos.

En resumen, en este trabajo se propone un sistema que consiste de una cápsula instrumentada con tres hileras de transductores distribuidos radialmente, de acuerdo a la Fig. (1). Como se observó en las pruebas anteriores, esta distribución de transductores permite obtener la curvatura del ducto siempre que se conozca la orientación de los transductores, por lo cual para controlar esta restricción se utiliza un sistema de navegación inercial colocado en el interior de la cápsula, esto permite orientar la posición de los transductores, a fin de ubicar la dirección del radio de la curvatura del ducto, en el espacio euclidiano.

Por otra parte la instrumentación con odómetros permiten medir la distancia recorrida por la cápsula, esto indicará la dimensión del

arco y/o ángulo de curvatura, basta con observar el cambio de señal desde el momento que entra la cápsula a la curvatura hasta que sale.

Idealmente la teoría propuesta permite reconstruir el tendido del ducto para curvaturas desde un diámetro de $(D=2r_g)$, que es la mínima normada [13], hasta un ducto recto (curvatura infinita).

La Figura (8) fue graficada con una curvatura sobre el plano osculador en plano xy . Si la cápsula gira sobre su propio eje, la señal del transductor central caería ya que sale del plano osculador. Si no hay cambio de curvatura, otro transductor en la hilera radial alcanza su máximo valor, de hecho la posición radial del nuevo transductor con respecto al anterior puede ser determinada por el ángulo de rotación de la capsula. Si la lectura del transductor cambia, indica que la cápsula ha entrado a una nueva curvatura, y la observación se dispone a tomar nuevamente el tiempo de vuelo de la señal, para determinar el ángulo de la curvatura.

Si el ángulo de giro de la cápsula es $n\pi/2$ los transductores centrales no cambian, mientras las hileras de los transductores de los extremos, los incidentes en eje z , pasan de máxima a menor energía y los incidentes en plano xy , pasan de menor a máxima energía.

La Figura (8b) se puede ampliar a una reconstrucción 3D del ducto, también se pueden reconstruir radios curvaturas de cualquier valor en el espacio, Fig. (10). Después de salir de la curvatura de 45° , se observa que no hay cambio en la señal de los transductores, sin rotación de la capsula, lo que significa que se sigue sobre el mismo plano osculador. Con los transductores colocados a $1.25in$ del centro de la superficie de la cápsula, se obtuvo una amplitud de $200(8bits)$, que de acuerdo a la gráfica de la Fig.(5), corresponde a un ángulo de inclinación de $\alpha=\theta/2=1.28^\circ$. Luego sustituyendo en la ecuación (1) se obtiene:

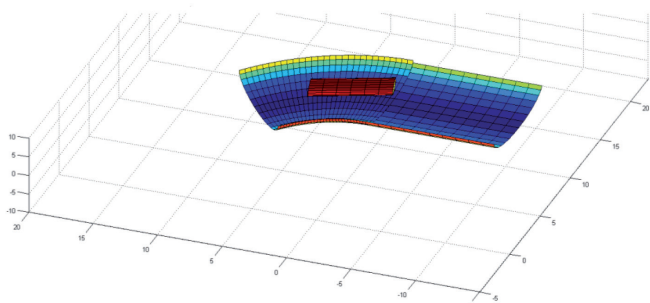
$$\rho = \frac{l}{2\sin\frac{\theta}{2}} = \frac{2.5}{2 \times \sin(1.28)} = 56in \quad (14)$$

Por lo tanto $R=60in$. Tiempo de ejecución es de $t=1.2s$, con una velocidad media de cápsula alrededor de $v=39,37cm/s$, y ángulo de curvatura

$$\theta_c = v \times t / r_c = 39.37 \times 1.2 / 60 = 0.786rad$$

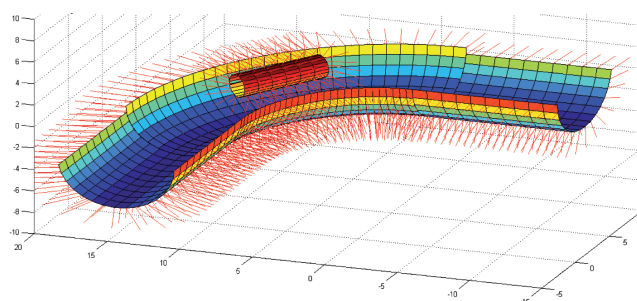
La reconstrucción 3D, Fig.(10), del tendido del ducto se logró graficando la segunda curvatura, con las ecuaciones (6-8) del toroide desde el ángulo $3\pi/2$ hasta $5\pi/4$, luego trasladando el origen al punto $(0,72,0)in$.

En la segunda prueba, la cápsula giró 25° en sentido horario, mientras que el transductor registro un cambio de menor a máxima energía, registrando un valor de 65° sentido horario con respecto al anterior, por tanto se deduce que la curvatura tuvo un giro de 90° . Luego el transductor colocado a $1.25in$ del centro muestra los mismos datos que la prueba anterior. El tiempo registrado también es el mismo.



a) $R=12$ y $\theta=0.7854rad$

Fig. 8: Segmento de curva con la cápsula (unidades pulgadas)



b) $R=12$ y $\theta=1.5708rad$

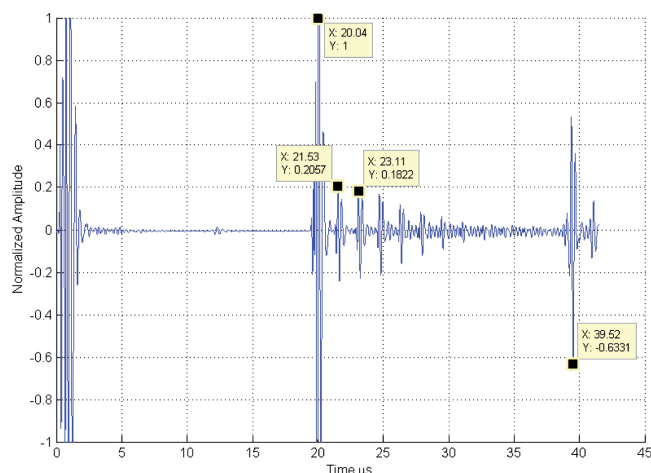


Fig. 9: Señal de inmersión transductor ultrasónico

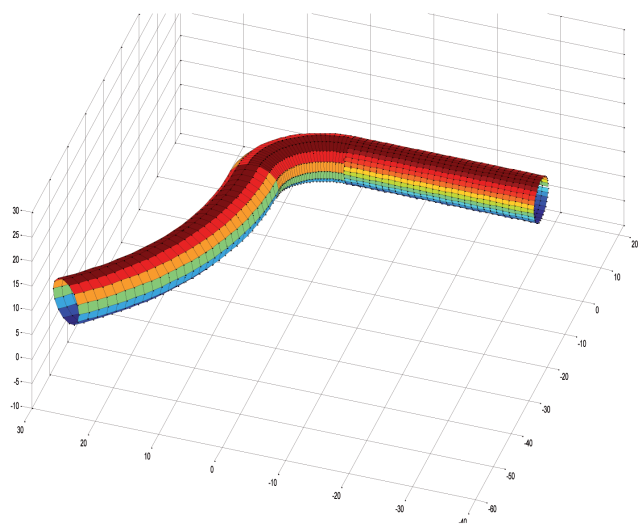


Fig. 10: Gasoducto osculating recostada sobre plano xy (unidades: pulgadas)

La reconstrucción del tendido del ducto se logró graficando el toroide con ecuaciones (6-8), desde $3\pi/2$ hasta $5\pi/4$, luego rotando un ángulo 90° sentido anti horario, con respecto al eje x, y finalmente trasladando el origen al punto $(0, 12, 60)$ in, obteniendo la geometría del ducto se muestra en la Figura 11.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un análisis para deducir la geometría de la curvatura de ductos, mediante la navegación de una cápsula instrumentada con transductores de ultrasonido. Se plantearon dos métodos de cómo calcular el radio de curvatura del ducto. Se aplicaron los métodos usando técnicas de ultrasonido convencionales y fórmulas de la cuerda de circunferencia.

En el primer método se obtuvo la sagita s de la cuerda mediante la medición del espacio entre el transductor y la pared interna del ducto, así el cálculo del radio de curva se obtiene directamente por la ecuación de la cuerda, esta información también puede ser usada para verificar el diámetro del ducto.

En el segundo método se estableció una relación entre la pérdida de energía de la señal de ultrasonido en función a la inclinación del transductor con respecto a la pared del ducto, entonces el cálculo de radio de curvatura se obtiene directamente por la ecuación de la cuerda.

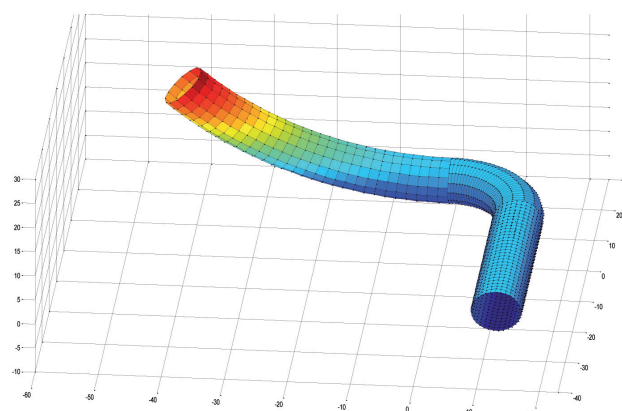


Fig. 11: Tendido de tubería usando los planos osculadores xy y yz (unidades, pulgadas)

Con el estudio presentado, se concluye que es posible inferir punto a punto la geometría de un ducto utilizando transductores de ultrasonido. De esta manera el ultrasonido es utilizado no solo para medir el espesor e identificar fallas en los ductos, sino que además es utilizado como apoyo para realizar la reconstrucción geométrica del ducto. Para ello se necesitan por lo menos tres filas radiales de transductores de ultrasonido.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Atsushi Jr Kakogawa Shugen y Ma. "La movilidad de un tubo con tornillo Robot mecanismo dentro de tubos curvados" conferencia internacional sobre robótica y biomimética, 14 Diciembre -18, 2010, Tianjin, China, (doi:978-1 -4244-9317 -3/10).
- [2] M. Lesani, M. Rafeeyant y A. Sohankar "análisis dinámico de pequeño cerdo a través de dos gasoductos y líquido tridimensional" Revista de Mecánica de los Fluidos Aplicada, Vol. 5, nO 2, págs. 75-83, 2012. Disponible en línea en www.jafmonline.net, ISSN 1735-3572, EISSN 1735-3645.
- [3] Paeper, Beuker, Brown, « La geometría del Sensor», World ductos, 2006 Nov.
- [4] Por Hendrik Aue y Steffen Paeper, «de ALTA CALIDAD DATOS DEL MÓDULO GEOMETRÍA DE ESTIRPE ANÁLISIS», Topo Asociación Productos y Servicios, Copyright © 2007.
- [5] John R. Adams, Patrick S. Precio, Jim W. Smith, «Línea de base inercial Sistema de Vigilancia», número de patente: 4.945.775, Fecha de Patente: 7 ago, 1990.
- [6] Jaeyong Yu. "Un fuera de línea de navegación de un cerdo con una geometría no lineal modificado fija filtro alisado intervalo". Elsevier, Control práctica exportadoras gallegas, en noviembre de 2005. Vol 13-11, págs. 1403-1411. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2004.12.016>
- [7] Jun Okamoto Jr. "sistema autónomo para oleoductos inspección". Elsevier, Mecatrónica. Octubre de 1999. Vol 9-7, págs. 731-743. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0957-4158\(99\)00031-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0957-4158(99)00031-8)
- [8] Hossein Ravanbod. "Aplicación de técnicas neuro-fuzzy en oleoducto de ensayos no destructivos por ultrasonidos", Elsevier, NDT & E International. ", Diciembre de 2005. Vol 38-8, págs. 643-653. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.03.001>
- [9] Dobmann G. " el estado del arte de ensayos no destructivos en línea inspección de la soldadura de tuberías por ultrasonidos". Springer, diario ruso de Ensayos No Destructivos. Noviembre de 2007. Vol. 43-11. pág. 755-761. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S106183090711006X>.
- [10] J. A. Soto-Cajiga. "Método para reducción de información de e. t. s. ingenieros RF de ultrasonido en tiempo real". Patente México. Diciembre del 2010, Número MX/A/ 2010/014275.
- [11] Reber K. "Inspección ultrasónica en línea mayores herramientas para inspeccionar Tuberías De Cintura y las grietas en las soldaduras Long-Seam", NDT System & Services AG, Stutensee, Alemania. Copyright © 2003, Topo Asociación Productos y Servicios.
- [12] Daewon Kim. "Clasificación de las señales ultrasónicas mediante ensayos no destructivos el EM y LMS algoritmos", Elsevier, Materiales Cartas. Noviembre de 2005. Vol 59-27, págs. 3352-3356. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2005.06.001>
- [13] Comité de normalización de petróleos mexicanos y organismos subsidiarios. "Igj) emitió de ductos de transporte Mediante Equipos Instrumentados". Documento: NRF-060-PEMEX, 2012.

ACKNOWLEDMENTS

Este trabajo fue apoyado por el proyecto 2014-242864 de ASA-CONACYT y por el departamento de energíadel Centro de Desarrollo Industrial y Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial CIDESI®).