

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

“EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD DE DUCTOS AEREOS POR MEDIO  
DE LA TECNOLOGÍA DE ONDAS GUIADAS”

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

CARLOS ALBERTO MARES NAVA



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Juan Genesca Llongeras

VOCAL: Profesor: Francisco Javier Rodríguez

SECRETARIO: Profesor: Carlos Rodríguez Rivera

1er. SUPLENTE: Profesor: José Hernández Espinoza

2° SUPLENTE: Profesor: Brenda Carolina Galicia Amaro

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Ciudad universitaria, Facultad de Química, edificio "D"

Asesor del tema:

Dr. Francisco Javier Rodríguez Gómez

Supervisor técnico: No hay

Sustentante:

Carlos Alberto Mares Nava

## SI

Si puedes estar firme  
cuando en tu derredor todo el mundo  
se ofusca y tacha tu entereza,  
si cuando dudan todos fías en tu valor  
y al mismo tiempo sabes exaltar su flaqueza  
si puedes esperar, y a tu afán poner brida  
o blanco de mentiras esgrimir la verdad  
o siendo odiado al odio no dejarle cabida y ni  
ensalzas tu juicio, ni ostentas tu bondad

Si sueñas, pero el sueño no se vuelve tu rey  
si piensas y el pensar no mengua tus ardores  
si el triunfo y el desastre no te imponen su ley  
y los tratas lo mismo como a dos impostores.  
si puedes soportar que tu frase sincera  
sea trampa de necios en boca de malvados  
o miras hecha trizas tu adorada quimera  
y tornas a forjarla con útiles mellados.

Si todas tus ganancias poniendo en un montón  
las arriesgas osado en un golpe de azar,  
y las pierdes, y luego con bravo corazón  
sin hablar de tus pérdidas vuelves a comenzar.  
si puedes mantener en la ruda pelea  
alerta el pensamiento y el músculo tirante,  
para emplearlo cuando en ti todo flaquea  
menos la voluntad que te dice adelante.

Si entre la turba das a la virtud abrigo  
si marchando con reyes del orgullo has triunfado  
si no pueden herirte ni amigo ni enemigo  
si eres bueno con todos pero no demasiado,  
y si puedes llenar el preciso minuto  
de sesenta segundos de combate bravío...  
tuya es la tierra y todos sus codiciados frutos  
y lo que más importa serás hombre hijo mío

Rudyard Kipling

## DEDICATORIA

A mis padres (David y Blanca), por su apoyo incondicional, su cariño, amor y palabras de aliento en los momentos difíciles.

A mis hermanos( Alejandro y David), por su apoyo incondicional y su ejemplo de superación.

A mi abuela Enedina, por inculcarme desde pequeño el amor al conocimiento.

A mis primos, sobrinos y futuras generaciones, esperando contribuir en su formación, en su interés por la ciencia y el desarrollo intelectual.

A los hermanos Maristas por ser la base fundamental en el desarrollo intelectual y personal.

A la UNAM por ser mi casa durante 5 maravillosos años.

Al Dr. Francisco Javier Rodríguez por contribuir en mi formación, compartiendo los conocimientos acerca del mundo de la corrosión.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	- 7 -
Propósito de la Investigación .....	- 7 -
Objetivo.....	- 8 -
I. MARCO TEÓRICO .....	- 9 -
I.I Corrosión en ductos superficiales de transporte y distribución de hidrocarburos .....	- 9 -
I.II Inspección de ductos mediante ondas guiadas ultrasónicas (MsS) .....	- 11 -
I.III Sensor Magnetoestrictivo (MsS) .....	- 16 -
II. EXPERIMENTACIÓN .....	- 23 -
II.I Ubicación de las inspecciones .....	- 26 -
III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	- 31 -
III.I Resultados.....	- 35 -
III.II Análisis de resultados .....	- 40 -
IV. CONCLUSIONES .....	- 48 -
V. BIBLIOGRAFIA .....	- 51 -

# INTRODUCCIÓN

---

## **Propósito de la Investigación**

Los ductos de transporte de hidrocarburos que se encuentran en las terminales de almacenamiento y reparto, están sometidos a procesos naturales de corrosión interior y exterior. Existen diferentes sistemas de protección contra la corrosión que son implementados en estas instalaciones, sin embargo este fenómeno es un proceso que no se puede evitar, debido a la tendencia de los metales a regresar a su estado de menor energía termodinámica.

Las estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) mencionan que en los últimos años han ocurrido alrededor de 2592 emergencias ambientales con materiales peligrosos a nivel nacional; la mayoría de las emergencias se presentaron en ductos de transporte de hidrocarburos, las causas por las cuales ocurrieron estos eventos son las siguientes:

- Tomas clandestinas
- Daños o averías provocadas por terceros
- Corrosión
- Falla mecánica del material

Estos derrames la mayoría de ocasiones causan daños irreversibles, es por esto que es importante realizar mantenimiento preventivo a las instalaciones para evitar causar daños ambientales, sociales y económicos.

En la actualidad existen diferentes tipos de inspecciones tanto directas(inspección visual, ultrasonido, líquidos penetrantes etc.) como indirectas(diablo instrumentado, vehículo operado a control remoto, etc.) con las cuales se puede determinar la integridad de los ductos de transporte de hidrocarburos.

### **Objetivo**

Presentar los resultados experimentales y análisis de los defectos encontrados mediante la inspección de la integridad mecánica de ductos de transporte y distribución de hidrocarburos en terminales de proceso, utilizando la tecnología llamada "ondas guiadas ultrasónicas.

# I. MARCO TEÓRICO

---

## **I.I Corrosión en ductos superficiales de transporte y distribución de hidrocarburos**

Los sistemas de ductos superficiales que transportan hidrocarburos y sus derivados están expuestos a fenómenos de corrosión atmosférica e interior como consecuencia del proceso de oxidación que ocurre cuando las estructuras metálicas se encuentran en contacto con medios agresivos, tendiendo a regresar al acero a su condición original de mineral de hierro.

La corrosión en ductos superficiales se puede llevar a cabo en dos zonas:

- Zona externa (Corrosión Atmosférica)
- Zona interna(Corrosión Interior)

La corrosión interior se desarrolla debido a la agresividad del medio que transportan los ductos. Existen 4 mecanismos que pueden generar daños internos:

- Corrosión dulce.- es causada por dióxido de carbono que se encuentra disuelto en agua ( $H_2O$ ), este fenómeno se desarrolla de manera lenta y uniforme pudiendo formar una estría

dependiendo de las condiciones del flujo (corrosión por erosión).

- Corrosión amarga.-es causada por el sulfuro de hidrógeno que se encuentra disuelto en agua ( $H_2O$ ), este tipo de corrosión presenta una rápida falla debido al agrietamiento de la pared del ducto, también puede acelerar el fenómeno corrosivo.
- En ductos de inyección de agua el fenómeno de corrosión puede ser ocasionado por la presencia de oxígeno en el agua y bacterias sulfato reductoras (SRB).
- Corrosión Microbiológica.- es causada por el crecimiento de bacterias sulfato reductoras en el interior del ducto.

La corrosión externa en ductos superficiales inicia debido a fallas que presentan los recubrimientos ("*holiday*")<sup>1</sup>, estas pequeñas zonas en las cuales el metal se encuentra desnudo, el ingreso de agua y oxígeno generan condiciones propicias para desarrollar fenómenos de corrosión.

Debido a que la corrosión es un fenómeno que afecta directamente los ductos de transporte de hidrocarburos, es necesario llevar a cabo inspecciones de la integridad mecánica, con el fin de ejecutar programas de mantenimiento preventivo y correctivo para garantizar la eficiencia de los sistemas de transporte y distribución por ductos,

---

<sup>1</sup> Holiday.- Defecto en el recubrimiento.

evitando con estas acciones pérdidas económicas, ambientales y sociales.

La localización oportuna de defectos o anomalías en la estructura de los ductos es necesaria para evitar que se conviertan en fallas. Las ondas guiadas ultrasónicas son un método con el cual se pueden realizar inspecciones a los ductos, con este tipo de inspecciones se pueden localizar defectos internos y externos, en ductos superficiales.

## **I.II Inspección de ductos mediante ondas guiadas ultrasónicas (MsS)**

El término de ondas guiadas se refiere a ondas mecánicas (o elásticas) en frecuencias sónicas y ultrasónicas que se propagan en un medio en forma paralela al plano de su frontera. Se les llama guiadas debido a que viajan a través del medio delimitadas por las fronteras geométricas del mismo.

Ya que las ondas son delimitadas por el medio, la geometría juega un papel importante en el comportamiento de las ondas. A diferencia de los sistemas convencionales de inspección por ultrasonido donde las ondas se propagan siempre a velocidades constantes, la velocidad de propagación de las ondas guiadas varía significativamente con la frecuencia y la geometría del medio. Además, para una misma frecuencia, las ondas guiadas pueden propagarse en diferentes formas (figura 1).

Existen tres diferentes tipos de ondas<sup>2</sup>:

- Longitudinales.
- Torsionales.
- Flexurales.

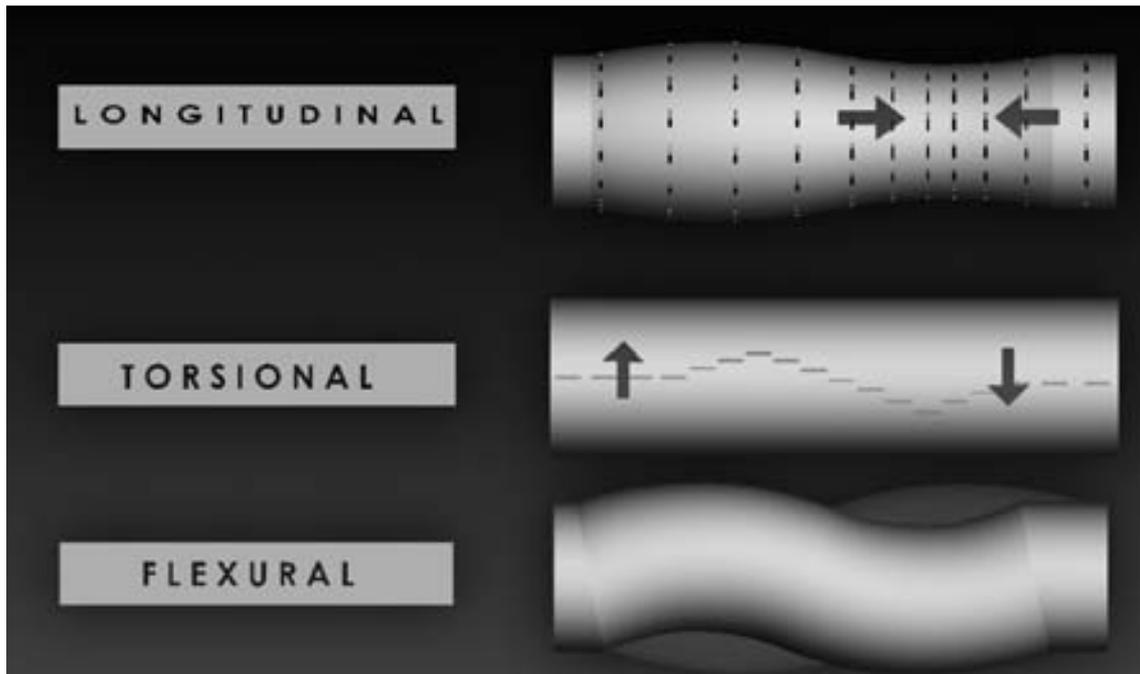


Figura 1. Tipo de ondas

Para ilustrar las propiedades de los diferentes tipos de ondas, en la figura 2 se presentan ejemplos de las curvas de dispersión (Torsional (T), Longitudinal (L) y Flexural (F)), esta relación está dada por la ecuación:

$$F = \frac{V}{\lambda} = \frac{V}{2d} \text{----- Ecuación 1.}$$

<sup>2</sup> Royer, D.; Dieulesaint, E. Elastic Waves in Solids Free and Guided Propagation. Germany .Springer. 2000.

Donde:

F= Frecuencia.

V= Velocidad de propagación de la onda en el medio.

$\lambda$ =Longitud de onda.

d=Diámetro del ducto.

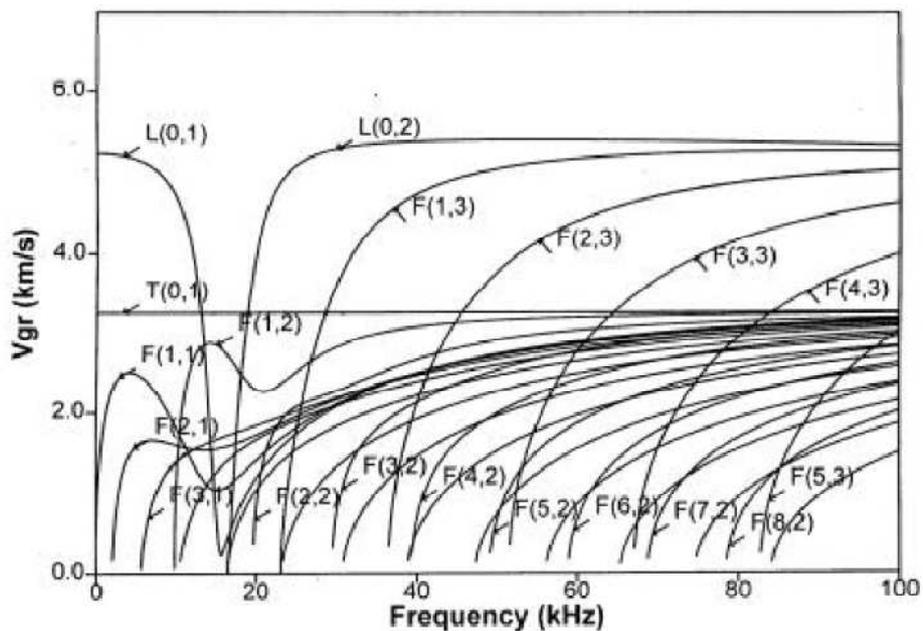


Figura 2. Velocidad vs Frecuencia de onda<sup>3</sup>. (Los números dentro de los paréntesis indican el orden de los diferentes tipos de onda)

Como se observa en las curvas de dispersión (Figura 2), sólo en el caso de las ondas torsionales la velocidad es constante para cualquier valor de frecuencia, por lo que éste es el modo preferente para la inspección de tuberías.

<sup>3</sup> Operating and technical instruction manual for MsS Sensor Instrumentation System. Southwest Research Institute.2006

Aunque las propiedades de las ondas guiadas son complejas, con una adecuada selección del tipo de onda y frecuencia de la señal que se empleará en la inspección, las ondas en frecuencias relativamente bajas (del orden de cientos de kHz) tienen un excelente comportamiento en la inspección global de grandes extensiones de superficie de una estructura desde un mismo sitio.

Al realizar la inspección de un ducto mediante la técnica de ondas guiadas en modo torsional, se pueden utilizar tres diferentes frecuencias de señal<sup>4</sup>:

- 32 kHz
- 64 kHz
- 128 kHz

La frecuencia de 32 kHz se emplea cuando se requiere localizar defectos grandes y que el estudio abarque distancias grandes, la frecuencia de 128 kHz es utilizada cuando se requieren localizar defectos pequeños, aunque esto limitará el estudio en una distancia corta. Con la frecuencia de 64 kHz se puede corroborar la información obtenida en las frecuencias anteriores, así como también localizar algún defecto que no haya sido identificado.

---

<sup>4</sup> *IDEM 3*

La selección de la frecuencia apropiada está en función del factor de atenuación que se presente en el ducto.

El fenómeno de la atenuación de una onda es la pérdida de amplitud conforme se aleja del emisor como se muestra en la figura 3.

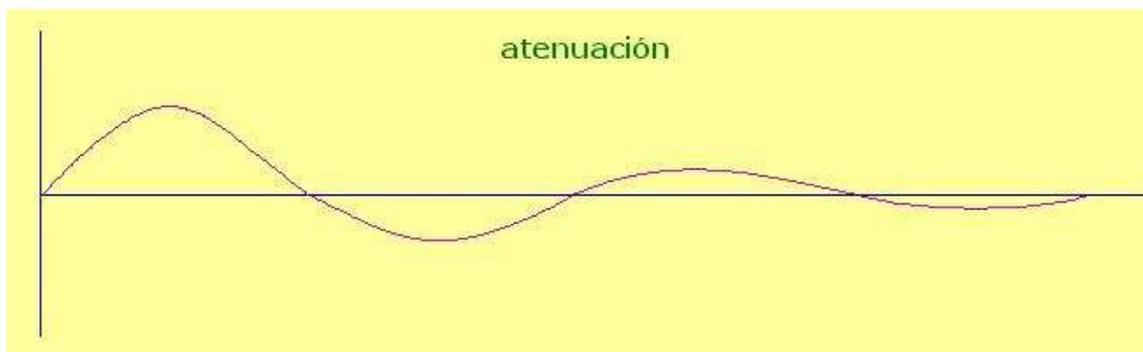


Figura 3. Atenuación de una onda.

La disminución de la amplitud de una onda se da por dos fenómenos:

- La ley cuadrática inversa establece que para una onda que se propaga desde una fuente puntual en todas direcciones por igual, la intensidad disminuye de acuerdo con el cuadrado de la distancia a la fuente de emisión<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Tomasi Wayne. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas. México. Prentice Hall. 2003

$$I = \frac{A_0^2}{r^2}$$

Donde:

I= Intensidad de la onda

A<sub>0</sub>= Área

r= Distancia al punto de donde procede la señal

- La absorción de la vibración, que ocasiona disminución en la intensidad de la onda debido a la pérdida de potencia ocasionada por alguna material o defecto en la estructura que hace la función de disipante.

El fenómeno de atenuación explica el por que a frecuencias de 32 kHz las distancias que se alcanzan son mayores que cuando utilizamos la frecuencia de 64 o 128 kHz.

### **I.III Sensor Magnetostrictivo (MsS)<sup>6</sup>**

El sensor magnetostrictivo utiliza el efecto de magnetoestricción para generar y detectar ondas guiadas en un ducto. Este efecto es un pequeño cambio en las dimensiones físicas de un material ferro magnético, causado por un campo magnético externo aplicado. El

---

<sup>6</sup> M. J. S. Lowe, D. N. Alleyne and P. Cawley. Defect Detection in Pipes using Guided Waves. Elsevier. 1998

MsS aplica un campo magnético en el material con el objetivo de generar ondas guiadas.

La tecnología del sensor MsS utiliza una cinta de un material ferro magnético (Fe-Co) el cual posee grandes características magnetostrictivas. La onda guiada es generada en la cinta de la aleación que previamente es acoplada a la superficie de la estructura a la cual se le va a realizar la inspección.

En el caso de inspección en ductos se utiliza el método Pulso-Eco, el cual utiliza la porción reflejada del sonido para la evaluación de defectos, el oscilador magnetostrictivo funciona como emisor y receptor. Un impulso eléctrico genera una análoga onda ultrasónica, inmediatamente después, mientras aún se está propagando la onda, el mismo oscilador está listo para la recepción. La onda sonora penetra en el material hasta que, como resultado de una superficie límite, tiene lugar una reflexión. Puesto que se puede medir el tiempo de recorrido y se conoce la velocidad del sonido de la mayor parte de los materiales, este método permite establecer la distancia existente entre el oscilador y la superficie refractante o dicho de otro modo, determinar la posición del reflector.

Una inspección por ondas guiadas involucra la instalación de un sensor sobre la estructura, generar un pulso de ondas guiadas y la

detección de las reflexiones de la señal provocadas por los defectos en el ducto. Las ondas se propagan a través de toda la sección transversal del ducto, por lo que pueden detectar defectos sobre cualquier superficie, tanto internos como externos. Las ondas guiadas en bajas frecuencias tienen una baja atenuación (aproximadamente 0.3 dB/m con una frecuencia de 100 kHz).

Aunque el alcance de cada inspección es variable, en general el intervalo de inspección para un ducto aéreo no recubierto puede alcanzar distancias del orden de 30m. Este valor disminuye si el ducto está recubierto, especialmente cuando se trata de pinturas a base de polietileno<sup>7</sup>. La atenuación es mucho más elevada cuando el ducto se encuentra enterrado o embebido en concreto, por lo que no es factible realizar estudios de ondas guiadas en estas condiciones de instalación.

En la inspección por ondas guiadas sobre ductos, el tamaño de defecto detectable es típicamente mayor al 5% del total del área transversal<sup>8</sup>. Esto limita al estudio para el caso de fisuras longitudinales, ya que aunque pueden tener una extensión considerable, si el área en la sección transversal es menor al 5%, puede no ser detectado por el equipo durante la inspección.

---

<sup>7</sup> User's Manual of MsS Data Analysis and Reporting Software for Piping Inspection. Southwest Research Institute 2006

<sup>8</sup> *IDEM 6*

La instalación del equipo consiste en la colocación de una cinta metálica de una aleación de hierro cobalto, de 2" de ancho y 0.006" de espesor<sup>9</sup>. La principal características de este material es que le puede ser inducido fácilmente un campo magnético en cualquier dirección. La cinta debe ser adherida sobre la superficie exterior del ducto de tal forma que forme un anillo alrededor del ducto.



Figura 4. Instalación de la cinta de Fe-Co.

La cinta debe tener una longitud tal que rodee por completo el ducto sin traslaparse ni dejar un espacio mayor a 2mm entre sus extremos.

Así mismo debe ser colocada directamente sobre la superficie metálica del ducto, por lo que si éste cuenta con algún recubrimiento epóxico de altos sólidos (poliuretano, acrílicos, epóxicos, alquidales, etc.), deberá ser retirado para la instalación de la cinta. Si la pintura

---

<sup>9</sup> *IDEM 6*

aplicada cuenta con una buena adherencia y un bajo espesor de película es posible colocar la cinta sobre la pintura.

La cinta metálica debe estar perfectamente adherida en toda su superficie al ducto, para ello se utiliza un pegamento epóxico de secado rápido(2,4,6-tris(dimetilaminometil)fenol), que debe actuar como interfase entre ambas superficies .Si existe en algún punto de la interfase alguna burbuja de aire, las ondas no podrán ser transmitidas al ducto y no se obtendrá lectura durante el estudio Cuando la cinta ha sido colocada sobre el ducto se le induce un campo magnético mediante un imán, orientado en el sentido longitudinal de la cinta.

Para realizar una lectura con el equipo se instala sobre la cinta metálica un embobinado a través del cual se hace circular la corriente que induce el campo magnético y genera las ondas guiadas. Este mismo embobinado funciona también como antena para la recepción de los reflejos de la señal.



Figura 5. Embobinado para la captación de la señal de Ondas Guiadas

Los resultados obtenidos mediante este estudio son gráficos de reflejo de señales contra la distancia. Esta gráfica debe ser ajustada en principio para la velocidad de propagación de las ondas en el material del ducto. En forma práctica esta calibración se puede realizar midiendo la distancia a alguna característica fácilmente identificable en el ducto que genere una señal de reflexión, tales como soldaduras o bridas.

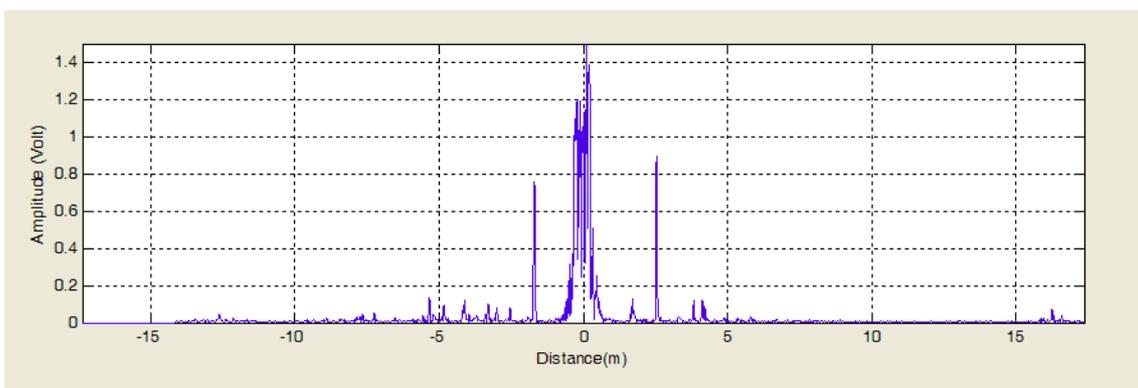


Figura 6. Señal de video obtenida en el estudio de ondas guiadas.

Para su análisis, esta señal es transformada a una señal de video, la cual puede ser ajustada y modificada para su análisis. En la señal de video se muestra la gráfica de porcentaje de reflexión contra distancia. El valor de porcentaje de reflexión corresponde a la fracción de la señal de ondas guiadas que es reflejada por un cambio en la sección transversal del ducto y es proporcional a la magnitud del defecto en términos de su área.

La magnitud del defecto es afectada por la atenuación de la señal, por lo que antes de realizar un análisis debe determinarse el factor de atenuación en cada inspección. Esto puede determinarse comparando señales producidas por elementos similares, por ejemplo soldaduras entre cada tramo.

A partir de este tipo de gráficas se pueden identificar los diversos elementos presentes en una estructura, como soldaduras, bridas, codos, etc. Descartando estas señales hasta identificar únicamente las que corresponden a pérdidas de espesor en el ducto.

## II. EXPERIMENTACIÓN

---

La inspección se realizó sobre dos ductos aéreos. El censo de instalaciones es el siguiente:

- Ducto 1(Transporte de hidrocarburos).
- Ducto 2(Transporte de agua).

Durante el estudio de ondas guiadas se dividieron los ductos en tramos tomando en cuenta los criterios de atenuación de la señal, alcanzando las siguientes distancias de estudio en cada ducto:

- Ducto 1. Se dividió en 8 Tramos (Se instalaron 8 cintas), cubriéndose un total de 243m a lo largo del ducto.
- Ducto 2. Se dividió en 7 Tramos (Se instalaron 7 cintas), cubriéndose un total de 180m a lo largo del ducto.

Debido a la diferente atenuación que se presentó en cada punto de inspección (disparo), las distancias de estudio que abarca cada tramo, no son equidistantes.

Los ductos en los que se realizó el estudio inician a partir de la zona en donde los ductos pasan sobre concreto al mar y llegan hasta las

bridas de unión con las mangueras de descarga. Para efectos del estudio de ondas guiadas, éste se realizó desde el origen hasta la brida de fin de ducto.

Los cambios en la dirección de la tubería son un factor para la atenuación de las ondas guiadas, sólo se consideran confiables las lecturas obtenidas en tramos rectos y después de haber realizado un cambio de dirección.

Una vez que el ducto realiza un segundo cambio de dirección, es necesario llevar a cabo una nueva inspección en otra ubicación del ducto. Por este motivo se seleccionaron los sitios de inspección de tal forma que se cubriera la totalidad del recorrido de los ductos sin considerar más de un codo en cada inspección.

Otro factor que afecta directamente el desempeño del estudio de ondas guiadas es el estado en el que se encuentran los ductos, se detectaron varias zonas en las cuales el mal estado de los ductos y soldaduras longitudinales a lo largo de los mismos ocasionan una señal con demasiado ruido. Debido a esto, dichas gráficas sólo pueden ser confiables en los primeros 5 metros, después de esta distancia el ruido hace que la señal pierda confiabilidad.



Figura 7. Soldaduras y mal estado de los ductos que ocasionan ruido en el estudio de Ondas Guiadas

La inspección en cada tramo fue realizada utilizando un equipo MsS, el estudio se realizó en ambos sentidos, tanto en dirección del flujo del producto, como en contra de éste (positivo y negativo, a partir de la cinta metálica) sin que la dirección del flujo tenga especial efecto. Así mismo se realizaron mediciones para cada punto en 3 frecuencias diferentes: 32, 64 y 128 kHz. Esto debido a que las frecuencias bajas tienen una atenuación mucho menor, por lo que la inspección tiene un máximo alcance, mientras que las frecuencias más altas permiten la detección de defectos de menor tamaño, aunque su alcance es limitado.

Una vez que los datos obtenidos en campo se analizaron en gabinete, se obtuvieron las distancias y los tipos de defectos localizados en ambos ductos. Se utilizó equipo de ultrasonido para realizar medición

de los espesores que presentaban los defectos y el espesor nominal remanente en la zona "sana" para con estos datos poder calcular el porcentaje de pérdida de espesor.

## II.I Ubicación de las inspecciones

El estudio de ondas guiadas de los ductos en estudio se dividió en los siguientes tramos:

El Tramo 1 comprende desde la zona en la que los ductos pasan sobre concreto a encima del mar.



Figura 8. Zona de Inspección "Tramo 1".

El segundo tramo de inspección, comienza donde termina el tramo 1 de estudio, y continúa a lo largo de 60 metros.



Figura9. Zona de Inspección "Tramo 2".

El tercer tramo de inspección, comienza donde termina el tramo 2 y continúa a lo largo de 60 metros.



Figura 10. Zona de Inspección "Tramo 3".

El cuarto tramo de la inspección, comienza donde termina el tramo 3 y continúa a lo largo de 60 metros.



Figura 11. Zona de Inspección "Tramo 4".

El quinto tramo de la inspección, comienza donde termina el tramo 4, y continúa hasta la conexión con el paso aéreo.



Figura 12. Zona de Inspección "Tramo 5".

El tramo 6 de inspección de los ductos 1 y 2 se encuentran en la subida del paso aéreo y llegan hasta la mitad del mismo paso. El tramo 7 de estos ductos comienza en la mitad del paso aéreo, justo en donde termina el tramo 6, y continúa hasta la brida de fin de ducto.

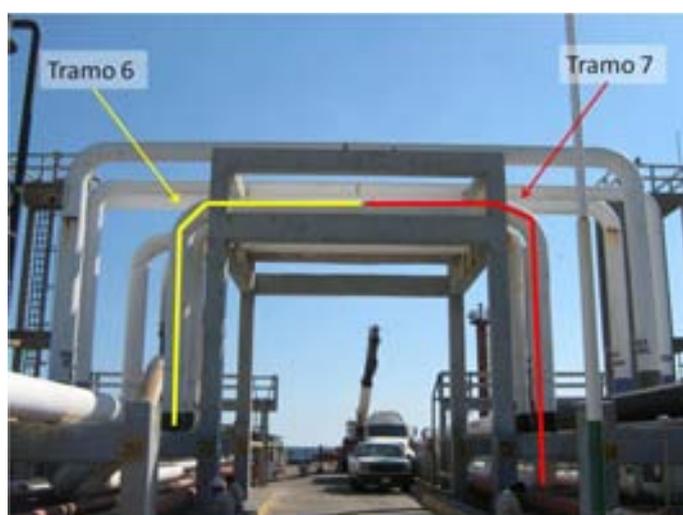


Figura 13. Zona de Inspección "Tramo 6" y "Tramo 7".

El tramo 8 del Ducto 2 se encuentra localizado a partir de donde inicia el tramo 6 y termina el tramo 5, hasta el fin de ducto.



Figura 14. Zona de Inspección "Tramo 8"

Por último, se realizó el levantamiento físico de los accesorios que se encuentran en los ductos 1 y 2, con el objetivo de tener parámetros de calibración y determinar los defectos que presenta cada estructura.

### III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

La información obtenida en campo se analizó en gabinete, con el software "Data Analysis and Reporting Software for Piping Inspection"<sup>10</sup>. Este software permite obtener señales de video, con las cuales se puede determinar la integridad de los ductos en estudio.

La calibración del software es necesaria para poder determinar las distancias a las cuales se encuentran los defectos, así como también los tamaños de los defectos localizados en la inspección para lo cual se utilizó el levantamiento de las distancias a las cuales se encuentran localizados los accesorios de los ductos (soldaduras, soldaduras de codo, soportes, etc.) tomando como referencia la fuente de la señal (cinta Fe-Co).

Con esta información las imágenes de video obtenidas se calibraron, logrando disminuir errores significativos en las distancias de los defectos encontrados en los ductos.

---

<sup>10</sup> Guided Wave Analysis MsS System. Southwest Research Institute.2006

El software calcula las velocidades a las cuales viajan las ondas, la atenuación y el porcentaje de equivalencia de reflexión, mostrando las señales detectadas como defectos y su grado de severidad con base en su pérdida de espesor, esta calibración se basa principalmente en la distancias existentes entre los accesorios.

Los parámetros que son necesarios calibrar para que el software pueda realizar el análisis de los datos obtenidos en campo son los siguientes<sup>11</sup>:

- Velocidad de la onda. Esta se puede calcular utilizando las distancias existentes entre los diferentes accesorios que fueron medidas a partir de la cinta de Fe-Co.
- Atenuación. El software calcula la atenuación utilizando las señales de las soldaduras mediante la suposición de que la reflexión de señal producida por una soldadura es la misma.
- Amplitud. Esta calibración es necesaria para que el software determine el tamaño del defecto, y esto se hace mediante la determinación de un reflector, para esto se utiliza la reflexión de una soldadura.

---

<sup>11</sup> *IDEM 9.*

El estudio de ondas guiadas mediante el sensor MsS, muestra reflexiones<sup>12</sup> de señal de los componentes que se encuentra a lo largo de su trayectoria, pero no es capaz de diferenciar entre un aumento o una pérdida de material, es por esto que es necesario una vez obtenidos los datos realizar una inspección mediante ultrasonido con el objetivo de determinar la naturaleza de los defectos.

Para que el software determine el tamaño de los defectos es necesario realizar la calibración de la amplitud tomando como base la reflexión de la señal de onda guiada( 15%<sup>13</sup>), este valor es la máxima cantidad de reflexión que se puede presentar( en este caso aumento de material) y está representada por una soldadura longitudinal. En base a este porcentaje el software es capaz de determinar el tamaño del defecto.

Negative Direction (Lower case) —magnatramo1128hz;				Positive Direction (Upper Case) —magnatramo1128hzp			
Sym.	Dist (m)	% Refl.	Comment	Sym.	Dist (m)	% Refl.	Comment
w3	-13.3	8.2		PS	17.0	5.5	Pipe Support
w2	-7.3	4.3		D3	19.8	1.5	Tiny
y1	-18	84		D4	21.0	3.3	Tiny
w1	-1.5	22.5		PS	22.9	5.1	Pipe Support
ps	-1.1	7.0	Pipe Support	W6	27.2	6.9	
MsS	0.0	--	Initial Pulse	PS	28.7	5.0	Pipe Support
W1	0.2	50.9					
D1	0.2	49.9	Large				
W2	1.5	6.9					
W3	4.5	37.0					
Y1	4.9	12.9	w3-D1-w3 ps				
PS	4.7	6.0	Pipe Support				
PS	5.2	10.0	Pipe Support				
D2	6.0	4.9	Small				
W4	9.1	21.0	-330				
PS	10.8	5.9	25 Pipe Support				
PS	11.1	3.1	-22 Pipe Support				
W5	15.0	15.7	-170				

Legend: D/d - defect, W/w - weld, X/x - imperfect direction control, Y/y - multiple reflection

Figura 15. Determinación del tamaño del defecto en base a su % Reflexión.

<sup>12</sup> Reflexión. Una onda cuando topa con un obstáculo que no puede traspasar ni rodear se refleja (rebota al medio del cual proviene).

<sup>13</sup> IDEM 9.

En la figura 15 se observa el resumen de los defectos localizados mediante el estudio de ondas guiadas, esta información es proporcionada por el software en base a la calibración realizada. Para fines prácticos de esta tesis, solo se muestra un ejemplo de cómo el software se calibra y los resultados que se obtienen, cabe mencionar que este procedimiento se realizó para cada disparo y cada frecuencia.

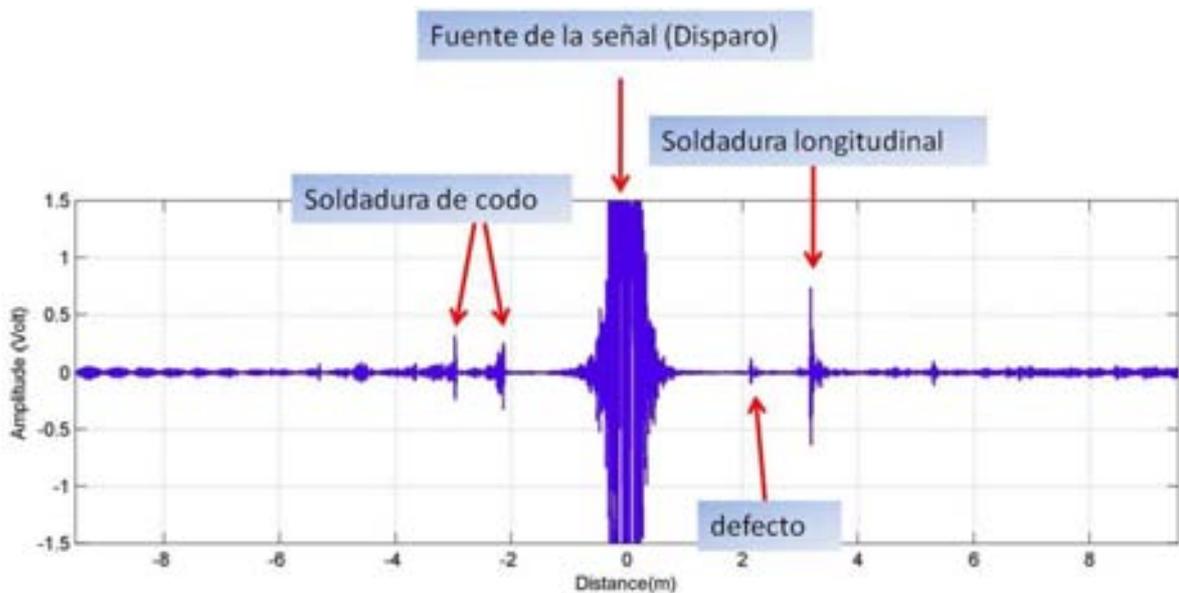


Figura 16. Graficas obtenidas en el software después de la calibración.

El software es capaz de discriminar las señales que representan algún accesorio del ducto así como también las señales que pueden ser defectos, es importante observar que la reflexión de los defectos siempre será menor a la reflexión de la soldadura.

Es necesario realizar una revisión minuciosa de las señales que han sido determinadas por el software ya que en ocasiones existen reflexiones múltiples o direccionalidades, que pueden ser confundidas con defectos.

### **III.I Resultados**

Del análisis y la interpretación de los resultados obtenidos en campo mediante el Estudio de Ondas Guiadas, se localizaron algunos defectos, a dichos defectos se les dio la siguiente categoría:

- A. Defectos medianos y largos que presentan pérdidas de espesor mayores al 15%, se recomienda reparación inmediata.
  
- B. Defectos medianos y largos que presentan pérdidas de espesor menores al 15%, se recomienda reparación a corto plazo (no mayor a 1 año).
  
- C. Defectos pequeños y micro, se recomienda seguimiento.

Una vez determinados los sitios donde se encontraban los defectos se procedió a realizar una inspección mediante ultrasonido para determinar los porcentajes de pérdida de espesor que presentaban los defectos, así como también si estos eran internos o externos.

Los porcentajes de pérdida de espesor mostrados en la siguiente tabla, corresponden a la pérdida de material a partir del espesor nominal remanente medido en las zona "sana" cercana al defecto utilizando equipo de medición de ultrasonido. Los comentarios que se presentan en la tabla son el resultado de la inspección realizada en campo.

El ducto 2 presenta un total de 57 defectos, las distancias a las que se encuentran, su categoría y su tamaño se muestran en la tabla. 1

Ducto	Diámetro	Tramo	Frecuencia	Distancia	Comentarios	Categoría
Ducto 2	20"	1	32	-2	Pequeño	C
Ducto 2	20"	1	64	6.2	Acceso peligroso	B
Ducto 2	20"	1	64	7.9	Micro	C
Ducto 2	20"	1	128	-3.7	Micro	C
Ducto 2	20"	1	128	-2.2	Pequeño	C
Ducto 2	20"	1	128	2.4	Pequeño	C
Ducto 2	20"	2	32	-2.4	Micro	C
Ducto 2	20"	2	32	27.2	Acceso peligroso	B
Ducto 2	20"	2	32	27.7	Corrosión interior a las 6, 15.8 % pérdida de espesor	A
Ducto 2	20"	2	64	25.4	Micro	C
Ducto 2	20"	2	128	3.5	Pequeño	C
Ducto 2	20"	3	32	-20.2	Micro	C
Ducto 2	20"	3	32	5.2	Micro	C
Ducto 2	20"	3	32	5.8	Micro	C
Ducto 2	20"	3	64	-8.1	Micro	C
Ducto 2	20"	3	64	-2.6	Micro	C
Ducto 2	20"	3	64	-2.2	Pequeño	C
Ducto 2	20"	3	128	-8.1	Pequeño	C
Ducto 2	20"	3	128	-2.2	Corrosión interior a las 6, 15.58% pérdida de espesor	A
Ducto 2	20"	3	128	5.3	Pequeño	C
Ducto 2	20"	4	32	-23.9	Difícil Acceso	B

Ducto	Diámetro	Tramo	Frecuencia	Distancia	Comentarios	Categoría
Ducto 2	20"	4	32	-21.7	Micro	C
Ducto 2	20"	4	32	-15.9	Acceso peligroso	B
Ducto 2	20"	4	64	-5.8	Micro	C
Ducto 2	20"	4	64	-3	Micro	C
Ducto 2	20"	4	64	5.7	Pequeño	C
Ducto 2	20"	4	64	15.8	Micro	C
Ducto 2	20"	5	32	-15.2	Pequeño	C
Ducto 2	20"	5	64	-8.4	Pequeño	C
Ducto 2	20"	5	64	-2	Corrosión interior a las 6, 19.42 % pérdida de espesor	A
Ducto 2	20"	5	128	-7.8	Corrosión interior a las 6, 23.77 % pérdida de espesor	A
Ducto 2	20"	6	64	0.5	Acceso Peligroso	B
Ducto 2	20"	6	64	13.6	Micro	C
Ducto 2	20"	6	64	14	Micro	C
Ducto 2	20"	7	32	-4.9	Pequeño	C
Ducto 2	20"	7	32	-4.3	Pequeño	C
Ducto 2	20"	7	32	5.3	Micro	C
Ducto 2	20"	7	32	10.8	Pequeño	C
Ducto 2	20"	7	32	11.4	Paso Aéreo	B
Ducto 2	20"	7	32	13	Paso Aéreo	B
Ducto 2	20"	7	32	13.4	Micro	C
Ducto 2	20"	7	32	14.7	Micro	C

Ducto	Diámetro	Tramo	Frecuencia	Distancia	Comentarios	Categoría
Ducto 2	20"	7	32	15.1	Micro	C
Ducto 2	20"	7	32	16.9	Micro	C
Ducto 2	20"	7	64	-3.6	Pequeño	C
Ducto 2	20"	7	64	-2.7	Pequeño	C
Ducto 2	20"	7	128	-2.7	Pequeño	C
Ducto 2	20"	8	32	-9.8	Micro	C
Ducto 2	20"	8	32	-8.3	Micro	C
Ducto 2	20"	8	32	-2.3	Micro	C
Ducto 2	20"	8	32	5.2	Micro	C
Ducto 2	20"	8	64	-9.8	Micro	C
Ducto 2	20"	8	64	-8.6	Micro	C
Ducto 2	20"	8	64	-2.4	Micro	C
Ducto 2	20"	8	64	5.2	Micro	C
Ducto 2	20"	8	64	7.5	Micro	C
Ducto 2	20"	8	64	10.9	Pequeño	C

Tabla 1. Defectos localizados en el ducto 2.

El ducto 1 presenta un total de 37 defectos, las distancias a las que se encuentran, su categoría y su tamaño se muestran en la tabla. 2.

Ducto	Diámetro	Tramo	Frecuencia	Distancia	Comentarios	Categoría
Ducto 1	20"	1	32	16.1	Acceso peligroso	B
Ducto 1	20"	1	64	-10.5	Corrosión uniforme(25 cm ), pérdida de espesor 33.14%	A

Ducto	Diámetro	Tramo	Frecuencia	Distancia	Comentarios	Categoría
Ducto 1	20"	1	64	-7.4	Corrosión interior en soldadura de codo	A
Ducto 1	20"	1	64	22.7	Pequeño	C
Ducto 1	20"	2	128	-1.6	Pequeño	C
Ducto 1	20"	3	32	-24.6	Pequeño	C
Ducto 1	20"	3	32	-14.4	Micro	C
Ducto 1	20"	3	32	-7	Pequeño	C
Ducto 1	20"	3	64	-16.7	Micro	C
Ducto 1	20"	3	64	-12.4	Micro	C
Ducto 1	20"	4	32	-17.2	Pequeño	C
Ducto 1	20"	4	32	14.3	Acceso Peligroso	B
Ducto 1	20"	4	32	17.2	Pequeño	C
Ducto 1	20"	4	32	23.3	Pequeño	C
Ducto 1	20"	4	64	-18.6	Pequeño	C
Ducto 1	20"	4	64	-17.4	Pequeño	C
Ducto 1	20"	4	64	-6.7	Pequeño	C
Ducto 1	20"	4	64	9.2	Pequeño	C
Ducto 1	20"	4	128	-10.8	Pequeño	C
Ducto 1	20"	4	128	-3.4	Micro	C
Ducto 1	20"	4	128	3.2	Pequeño	C
Ducto 1	20"	4	128	5.6	Pequeño	C
Ducto 1	20"	5	32	-28.1	Micro	C
Ducto 1	20"	5	64	-2.1	Micro	C
Ducto 1	20"	5	64	24.7	Micro	C
Ducto 1	20"	5	128	-7.9	Micro	C
Ducto 1	20"	5	128	-2	Micro	C
Ducto 1	20"	6	32	-3.7	Pequeño	C
Ducto 1	20"	6	32	4.8	Acceso peligroso	B

Ducto	Diámetro	Tramo	Frecuencia	Distancia	Comentarios	Categoría
Ducto 1	20"	6	128	-1.1	Acceso peligroso	B
Ducto 1	20"	7	32	-2.4	Pequeño	C
Ducto 1	20"	7	32	6	Pequeño	C
Ducto 1	20"	7	64	3.8	Acceso Peligroso	B
Ducto 1	20"	7	64	6.2	Pequeño	C
Ducto 1	20"	7	64	12.1	Acceso Peligroso	B
Ducto 1	20"	7	128	-2.8	Pequeño	C
Ducto 1	20"	7	128	3.9	Pequeño	C

Tabla 2. Defectos localizados en el ducto 1.

### III.II Análisis de resultados

El ducto 2 presenta 4 defectos tipo "A" (mayores a 15% de pérdida de espesor). La corrosión que presenta este ducto es interna, esto puede ser debido a que el agua que transporta, cuando se deja de bombear se queda estancada en algunos puntos bajos del ducto, estas zonas son susceptibles a presentar corrosión uniforme en dichos puntos (aireación por precipitación de sólidos.)

Una vez que se presenta corrosión electroquímica, los productos resultantes de este fenómeno (óxidos, hidróxidos y sulfuros de hierro) se depositan en las partes bajas internas del ducto, en estas

zonas existe una diferencia de concentración de oxígeno generándose una celda de aireación diferencial, las zonas en las cuales hay poca presencia de oxígeno se vuelven ánodos, mientras que las demás zonas continúan siendo cátodos.

Por otra parte, existe la posibilidad de que el agua que se transporta en este ducto, esté contaminada con ácido carbónico y/o sulfuro de hidrógeno.

La existencia de ácido carbónico ocasionaría un fenómeno de corrosión "dulce", este tipo de corrosión se presenta en el interior de ductos, inicialmente lenta, mostrando una morfología del tipo de corrosión localizada, dependiendo del tipo de flujo esta puede tomar una forma de ranurado.

La presencia de un flujo laminar ( $<2000$  Re) del producto transportado en el interior del ducto no tiene gran influencia en la velocidad de corrosión interna, la morfología que se presenta es localizada.

Cuando se presentan flujos turbulentos ( $>4000$  Re) la evaluación de la velocidad de corrosión es más compleja y se debe determinar mediante el uso de una formula en la cual se determine el factor de fricción utilizando el número de Reynolds en el interior del ducto.

Debido a que la velocidad del flujo aumenta, no se permite la formación de la película de siderita, presentándose corrosión por erosión.<sup>14</sup>

$$CR_{erosión} = \frac{K(0.65W)U^2\beta}{gP\left(\frac{\pi}{4}D^2\right)}L$$

Donde:

$CR_{erosion}$  = velocidad de corrosión por erosión (mm/año)

K = Constante de Rabinowicz que para aceros es de 0.071

W = Contenido de arena en la sustancia transportada (bbl/mes) 1 bbl de arena son 945 lbs

U = Velocidad de flujo promedio

$\beta$  = Coeficiente de ángulo para tuberías es de 0.75

g = Constante gravitacional (32.2 pie/s<sup>2</sup>)

P = Resistencia a la penetración del material

D = Diámetro interno del material

L = Factor de corrección de unidades.

La norma API-RP-14E, proporciona una fórmula con la cual se puede determinar la velocidad de flujo a la cual comienza el fenómeno de corrosión por erosión, estos valores se encuentran en un intervalo entre 85-350 (pie/s) para diferentes tipos de aceros.<sup>15</sup>

---

<sup>14</sup> Palmer C. Andrew, King Roger A. Subsea Pipeline Engineering. Oklahoma. Penn Well Corporation. 2004.

<sup>15</sup> IDEM 14

$$U_{critica} = \frac{C}{\sqrt{\rho}}$$

Donde:

$U_{crit}$  = medida en pie/seg

$\rho$  = densidad en lb/ft<sup>3</sup>

C = es una constante dependiendo del material

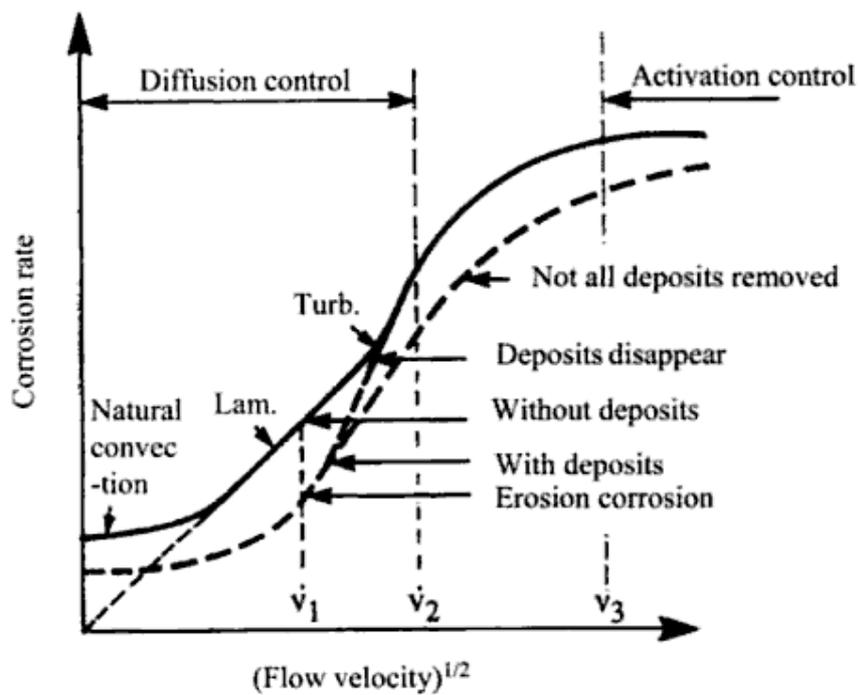


Figura 17. Velocidad de corrosión vs Velocidad del flujo.<sup>16</sup>

La figura 17 muestra la grafica donde se revela la diferencia entre la presencia de flujo laminar o turbulento. Se observa que cuando en el interior de los ductos existe flujo turbulento la velocidad de corrosión aumenta.

<sup>16</sup> E Bardal. Corrosion and Protection (Engineering and material processes). Springer. London 2004

Por otra parte si la sustancia que se bombea en este ducto, se encuentra contaminada por sulfuro de hidrógeno, la presencia de este compuesto ocasionaría morfologías del tipo localizadas, para posteriormente convertirse en una falla por "corrosión bajo esfuerzo".

Estos dos tipos de corrosión (dulce y amarga) son generados por la presencia de gases, por lo que la velocidad de corrosión también está determinada por la presión parcial de cada uno de estos compuestos.

El ducto 1 presenta dos defectos importantes resultantes de la inspección:

- Defecto interior que se encuentra en una soldadura de codo.
- Defecto exterior que se presenta por corrosión atmosférica.

La presencia de oxígeno disuelto en el agua (6-8 ppm) que se inyecta en ductos de transporte de hidrocarburos es el principal agente corrosivo, por lo cual es necesario realizar algún proceso mediante el cual se disminuya la cantidad de oxígeno presente en el agua, estos procesos favorecen el crecimiento de SRB.

Por otra parte el hecho de que este defecto se haya originado en la soldadura de codo, podría indicar la existencia de diferentes metales

en la soldadura (par galvánico) así como zonas térmicamente afectada lo cual ocasiona la presencia de una pila galvánica favoreciendo el proceso de corrosión electroquímica.

El segundo defecto que es considerado en este análisis por su importancia es una corrosión externa (atmosférica). En la inspección que se realizó posteriormente a la ubicación de los defectos, se encontró que este defecto está propiciado por la falla del recubrimiento.

En este defecto se realizaron mediciones del espesor en la zona que presenta corrosión y se obtuvieron las siguientes mediciones:

<b>Espesor nominal(mil)</b>	<b>Espesor(milésimas de pulgada)</b>	<b>Porcentaje Pérdida de espesor</b>
<b>359</b>	271	24.5 %
	240	33.14 %
	303	16 %

Figura 18. Porcentaje de pérdida de espesor.



Figura 19. Corrosión atmosférica en el ducto 1.

Toda vez que un recubrimiento se encuentre dañado o perforado aunado al ingreso de agua y la presencia de oxígeno, esta estructura es susceptible a presentar fenómenos de corrosión.

El defecto mostrado en la figura 19 se originó debido a una falla en el recubrimiento ("holiday"), la presencia de NaCl , SO<sub>2</sub> y/o bacterias, así como de un electrolito que ingreso a través de ese defecto en el recubrimiento, favorecieron el inicio de fenómenos de corrosión por aireación diferencial, ataque de ácidos orgánicos y/o MIC.

Existen defectos que fueron interpretados por el software como pequeños y micros en base a la comparación con la cantidad de material máximo aportado (soldadura-15%), se corroboró la localización de estos defectos en los ductos teniéndose como resultado que son defectos internos.

## IV. CONCLUSIONES

---

El "ducto 2" presenta 58 defectos por corrosión interior a lo largo de 243 m de inspección por ondas guiadas. Del total de defectos presentados en este ducto, 4 de ellos presentan una pérdida de espesor superior al 15% y los restantes son defectos que están en un intervalo superior al 5% y menor al 15%.

Se recomienda establecer un programa de análisis del porcentaje de oxígeno, bióxido de carbono y/o presencia de SBR que se encuentran presentes en el agua que se transporta en este ducto y así determinar la velocidad de corrosión teórica que puede estar ocasionándose en el interior de esta estructura.

Una vez establecidas estas velocidades de corrosión, si se obtienen velocidades de corrosión superiores a 2 milésimas de pulgada por año<sup>17</sup>, es necesario implementar sistemas de protección de corrosión interior (inyección de inhibidores) como lo establecen las normas para el control de la corrosión en el interior de ductos de transporte de hidrocarburos.

---

<sup>17</sup> NRF-005-PEMEX-2009. "Protección interior de ductos con inhibidores". [www.pemex.com](http://www.pemex.com)

El "Ducto 1" presentó un total de 37 defectos; 1 es por corrosión exterior debido a la falla en el recubrimiento, 36 defectos por corrosión interior, siendo el más crítico el que se encuentra ubicado en una soldadura de codo, por lo cual se recomienda realizar una inspección a fondo, para determinar el tipo de corrosión que presenta y la zona donde se encuentra ubicado, ya que si se encuentra en un punto donde el flujo impacte directamente sobre el defecto, esto puede ocasionar el crecimiento de la velocidad de corrosión.

En este ducto se recomienda incluir dentro del programa de corrida de diablos de limpieza, el análisis de sedimentos para determinar las cantidades de compuestos y/o microorganismos que favorecen el aumento de las velocidades de corrosión, como pueden ser el sulfuro de hidrógeno, ácido carbónico y presencia de bacterias sulfato reductoras.

El defecto por corrosión atmosférica presenta una pérdida de metal del 33.14% en la zona más afectada, debido a la gran agresividad de las sales que se encuentran en interacción con el ducto, es necesario gestionar el mantenimiento correctivo de manera inmediata para evitar mayores pérdidas de metal.

La tecnología de ondas guiadas permite realizar inspecciones de la integridad de ductos de manera confiable, llegando a puntos donde con otro tipo de inspecciones no se puede tener acceso (diablo instrumentado).

Esta nueva tecnología presenta una desventaja, que es la incapacidad de localizar defectos con pérdida de metal inferior al 5% de sección transversal, la cual se vuelve importante debido al peligro que representa una fuga en ductos de transporte de hidrocarburos en presencia de salmueras, siempre presentes en este tipo de sistemas.

## V. BIBLIOGRAFIA

---

- Palmer C. Andrew, King Roger A. Subsea Pipeline Engineering. Oklahoma. Penn Well Corporation. 2004.
- Royer, D.; Dieulesaint, E. Elastic Waves in Solids Free and Guided Propagation. Germany .Springer. 2000
- Operating and technical instruction manual for MsS Sensor Instrumentation System. Southwest Research Institute.2006
- Guo Boyun, Song Shanhong, Chacko Jacob, Ghalambor Ali. Offshore Pipelines. USA. Gulf Professional Publishing.2005
- Chang Fu-Kuo. Health Monitoring Current Status and Perspectives. Pennsylvania. Technomic Publishing AG.1997
- Cathodic Protection Tester Course Manual. NACE International Houston. 2009
- Cathodic Protection Technician Course Manual. NACE International Houston.2009
- Peabody A.W. Peabody's Control of Pipeline Corrosion. Nace International.2001.
- Giurgiutiu Victor. Structural Health Monitoring with piezoelectric wafer active sensor. San Diego, California. Academic Press.
- Tomasi Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. México. Prentice Hall.2003

- M. J. S. Lowe, D. N. Alleyne and P. Cawley. Defect detection in pipes using guided waves. Elsevier. 1998
- NRF-005-PEMEX-2009 "Protección interior de ductos con inhibidores". [www.pemex.com](http://www.pemex.com)
- User's Manual of MsS Data Analysis and Reporting Software for Piping Inspection. Southwest Research Institute. 2006
- E Bardal. Corrosion and Protection (Engineering and material processes). Springer. London 2004