

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL AMORTIGUAMIENTO DE ONDAS GUIADAS EN UN
TRAMO DE OLEODUCTO CON UNA DISCONTINUIDAD PRISMA
RECTANGULAR

ANDRÉS FELIPE RODRIGUEZ PIEDRAHITA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÓNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2021

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL AMORTIGUAMIENTO DE ONDAS GUIADAS EN UN
TRAMO DE OLEODUCTO CON UNA DISCONTINUIDAD PRISMA
RECTANGULAR

ANDRÉS FELIPE RODRIGUEZ PIEDRAHITA

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero de Petróleos
Ingeniero Mecánico

Director

Jabid Eduardo Quiroga Méndez

Dr. en Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÓNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2021

DEDICATORIA

A mis padres y mis hermanos que fueron el apoyo más incondicional en este camino.

A Natalia García que fue mi fuerza, mi motivación y mi motor a lo largo de la carrera, y a sus padres que también se volvieron los míos.

A todos los que, de todas las formas, hicieron parte de este proceso

Y a Dios que siempre me bendice en el momento adecuado y me acompaña sin importar las circunstancias.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco al Ing. Jabid Eduardo Quiroga Méndez, mi director de proyecto por su tiempo, por su dedicación para guiarme durante el desarrollo de esta investigación y por poner a disposición todo su conocimiento.

Al Ing. Juan Sebastián León por las dudas resueltas y sus consejos entregados.

A la Universidad Industrial de Santander, a la escuela de Ingeniería de Petróleos y a la escuela de Ingeniería Mecánica por las oportunidades brindadas.

Y a mis padres porque sin importar las circunstancias, siempre hicieron el mayor esfuerzo por apoyarme en mis decisiones académicas.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
1. OBJETIVOS.....	16
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. MARCO TEORICO.....	17
2.1. OLEODUCTOS (TUBERÍAS).....	19
2.2. FALLAS EN TUBERÍAS.....	22
2.2.1. Tipos de falla	22
2.2.2. Causa de las fallas en tuberías.....	24
2.3. MANTENIMIENTO DE TUBERÍAS.....	26
2.3.1. Mantenimiento predictivo	26
2.3.2. Mantenimiento preventivo.....	27
2.3.3. Mantenimiento correctivo.....	27
2.3.4. Técnicas de monitoreo de integridad estructural	27
2.4. ONDAS GUIADAS.....	28
2.4.1. Modos de onda guiada	32
2.5. COEFICIENTE DE REFLEXIÓN.....	33
2.6. SOFTWARE ANSYS.....	34
3. METODOLOGÍA	35
3.1. GEOMETRÍA DE LA TUBERÍA Y DE LAS DISCONTINUIDADES	36
3.2. TIPO DE ELEMENTO, MODELO DEL MATERIAL Y DIMENSIONES DEL MALLADO.....	40
3.3. ECUACIÓN QUE DEFINE LA ONDA Y TIEMPOS DE SIMULACIÓN.....	41
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
4.1. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN	44
4.2. ESTUDIO EN LA DIRECCIÓN AZIMUTAL	48
4.3. ESTUDIO EN LA DIRECCIÓN RADIAL.....	53

4.4. ESTUDIO EN LA DIRECCIÓN AXIAL	60
5. CONCLUSIONES	65
6. RECOMENDACIONES.....	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXOS	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Dimensión de la discontinuidad en cada coordenada cilíndrica.....	38
Tabla 2: Porcentajes a simular para cada dimensión.....	40
Tabla 3: Propiedades del Acero Estructural	40
Tabla 4: Valor en el eje “x” de los picos máximos para los nodos A y B en una tubería de 150 mm de diámetro con un espesor de 7.11 mm y una longitud de 1 m	47
Tabla 5: Valores de velocidad teórica (<i>VT</i>), velocidad simulada (<i>VS</i>) y el porcentaje de error entre estas velocidades (% <i>EV</i>).....	47
Tabla 6: Valores simulados correspondientes a la variación en la dirección azimutal	48
Tabla 7: Valores del coeficiente de reflexión (CR) correspondientes a la variación de la magnitud en la dirección azimutal de la discontinuidad	52
Tabla 8: Valores simulados correspondientes a la variación en la dirección radial.....	54
Tabla 9: Valores del coeficiente de reflexión (CR) correspondientes a la variación de la magnitud en la dirección radial de la discontinuidad	58
Tabla 10: Valores simulados correspondientes a la variación en la dirección axial	60
Tabla 11: Valores del coeficiente de reflexión (CR) correspondientes a la variación de la magnitud en la dirección axial de la discontinuidad	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Cadena del sector de los hidrocarburos.....	17
Figura 2: Mapa de Colombia con los principales oleoductos.....	20
Figura 3: Materiales para tuberías	21
Figura 4: Diagrama de árbol de causas de fallas en tuberías	23
Figura 5: Comportamiento de la onda guiada sin y con discontinuidad.....	30
Figura 6: Curvas de dispersión, tubería 1 in cedula 40	31
Figura 7: Comportamientos de los modos de onda longitudinal, flexión y torsional	32
Figura 8: Línea de trabajo en el proceso de simulación	35
Figura 9: Red de transporte por oleoducto del sistema sur colombiano de la empresa Cenit	37
Figura 10: Selección de tubería de 6 pulgadas y cedula 40	37
Figura 11: Tubería de 150 mm de diámetro con espesor de 7.11 mm y 2 m de longitud.....	38
Figura 12: Dimensiones de la discontinuidad en la tubería	39
Figura 13: Mallado tubería con discontinuidad circunferencial 30%	41
Figura 14: Comportamiento de la onda guiada en ANSYS según la ecuación	43
Figura 15: Posición de los nodos A y B en la tubería de 150 mm de diámetro con un espesor de 7.11 mm y una longitud de 1 m	46
Figura 16: Superposición de la onda al inicio de la tubería (Azul-Nodo A) con la onda a 0.5 m de inicio de la tubería (Naranja-Nodo B). Eje “x” tiempo en segundos y eje “y” amplitud en metros.....	46
Figura 17: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 10% en la dirección azimutal	49
Figura 18: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 20% en la dirección azimutal	50
Figura 19: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 30% en la dirección azimutal	50
Figura 20: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 40% en la dirección azimutal	51
Figura 21: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 50% en la dirección azimutal	51

Figura 22: Coeficiente de reflexión contra porcentaje de la discontinuidad en la dirección azimutal	52
Figura 23: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 15% en la dirección radial	55
Figura 24: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 30% en la dirección radial	55
Figura 25: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 50% en la dirección radial	56
Figura 26: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 70% en la dirección radial	56
Figura 27: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 90% en la dirección radial	57
Figura 28: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 100% en la dirección radial	57
Figura 29: Coeficiente de reflexión contra porcentaje de la discontinuidad en la dirección radial	58
Figura 30: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 10% en la dirección Axial.....	60
Figura 31: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 25% en la dirección Axial.....	61
Figura 32: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 40% en la dirección Axial.....	61
Figura 33: Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 50% en la dirección Axial.....	62
Figura 34: Coeficiente de reflexión contra porcentaje de la discontinuidad en la dirección axial	63

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Código en Matlab para determinar la distancia en el eje “x”	71
ANEXO B. Código en Matlab para determinar la distancia en el eje “y”	72

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS NUMÉRICO DEL AMORTIGUAMIENTO DE ONDAS GUIADAS EN UN TRAMO DE OLEODUCTO CON UNA DISCONTINUIDAD PRISMA RECTANGULAR*.

AUTOR: ANDRÉS FELIPE RODRIGUEZ PIEDRAHITA**.

PALABRAS CLAVE: ANSYS, discontinuidad, inspección, mantenimiento, oleoductos, ondas guiadas.

DESCRIPCIÓN:

La industria de los hidrocarburos juega un papel fundamental en la economía a nivel mundial, por lo que se convierte en una necesidad que los sistemas de transporte de esta fuente de energía como los oleoductos, se mantengan funcionando en óptimas condiciones sin generar afectaciones sociales, ambientales o económicas. Este funcionamiento óptimo del sistema de transporte, se logra mediante la implementación de planes de mantenimiento acorde a las necesidades, que comienzan con un mantenimiento predictivo correcto, permitiendo identificar las posibles fallas para corregirlas a tiempo. Como técnica de mantenimiento predictivo, se efectuará el análisis numérico del método no destructivo de inspección por ondas guiadas.

Se realizó la simulación en ANSYS de la distribución de una onda guiada a través de 4 casos diferentes de tubería, con el fin de analizar la influencia que tiene cada una de las tres direcciones cilíndricas de la falla, para entregar resultados que faciliten la aplicación de esta técnica de inspección en campo. Los 4 casos son: Una tubería sin ninguna discontinuidad, tubería con discontinuidad prisma rectangular donde predomine la dimensión en la dirección radial, tubería con discontinuidad prisma rectangular donde predomine la dimensión en la dirección azimutal y tubería con discontinuidad prisma rectangular donde predomine la dimensión en la dirección vertical.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jaid Eduardo Quiroga Méndez, Ingeniero Mecánico y PhD en Ingeniería Civil

ABSTRACT

TITLE: NUMERICAL ANALYSIS OF THE DAMPING OF GUIDED WAVES IN A PIPELINE SECTION WITH A RECTANGULAR PRISM DISCONTINUITY*.

AUTHOR: ANDRÉS FELIPE RODRIGUEZ PIEDRAHITA**.

KEY WORDS: ANSYS, Discontinuity, inspection, Maintenance, Pipeline, Guided Waves

DESCRIPTION:

The hydrocarbon industry plays a fundamental role in the world economy, so that is why it becomes a necessity (an essential need) that the transport systems of this energy source such as pipelines, keep working in optimal conditions without generating social, environmental or economics affectations. This optimal function of the transport system is achieved by implementation of maintenance plans according to the needs, which begin with a correct predictive maintenance, allowing identify the possible failures to correct them on time. Such as technique of predictive maintenance, a numerical analysis of the non-destructive guided wave inspection method will be done.

The stimulation was carried out in ANSYS of the distribution of a guided wave through 4 different cases of pipe, in order to analyze the effects that each of the three cylindrical directions of the fault has, to deliver results that facilitate the application of this inspection technique in a field. The 4 cases are: A pipe without any discontinuity, pipe with rectangular prism discontinuity where the dimension in the radial direction predominates, pipe with rectangular prism discontinuity where the dimension in the azimuthal direction predominates and a pipe with rectangular prism discontinuity where the dimension in the vertical direction predominates.

* Degree work

** Faculty of Physical and chemistry. School of Petroleum Engineering. Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez, Mechanical Engineer and PhD in Civil Engineering.

INTRODUCCIÓN

Una de las áreas fundamentales en la industria del petróleo y gas es el transporte del crudo desde los campos productores hasta su punto de destino, ya sea a refinerías o a puertos para su exportación, en donde el método de transporte que resalta es la cadena de oleoductos, gasoductos o poliductos presentes a lo largo del territorio nacional que recorren miles de kilómetros, permitiendo llevar el petróleo de una manera más económica, fiable y segura, según la empresa MAPFRE:

Además de tener más capacidad de transferencia, solo requieren de energía para poner en marcha las bombas centrífugas que impulsan los materiales a través de los conductos. Una vía estándar de 20 pulgadas de diámetro puede movilizar en torno a un millón de litros por hora, mientras que un camión tan solo puede transportar 30.000 litros. Por eso, y por el coste del personal, los viajes en carretera o barco son hasta quince veces más caros¹

Es fundamental el transporte oportuno de los fluidos, ya que si se generara una acumulación en los campos productores, estos deben cerrarse debido a la baja capacidad de almacenamiento, razón por la cual se vuelve necesario tener un sistema de transporte (oleoductos y gasoductos) en constante operación y de forma eficiente, lo cual se obtiene mediante un mantenimiento oportuno de los sistemas, realizando inspecciones periódicas que permitan conocer el estado estructural antes de que se presente alguna situación de emergencia.

La presencia de una falla en una tubería puede generar diferentes tipos de problemas, donde se puede resaltar: una pérdida de producto a través de un agujero, un estancamiento del producto o disminución del caudal, explosión,

¹ MAPFRE Global Risks. Oleoductos y gasoductos, las venas de la economía [En línea]. 2018. [Consultado 10 diciembre 2020]. Disponible en: www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/energia.

presentarse una contaminación de un sector, generar un daño ambiental y/o afectar alguna comunidad aledaña a la estructura.

Es por esta razón, que es necesario conocer el estado estructural de las tuberías de forma periódica, con el fin de prevenir todo tipo de situaciones posteriores que generen daños ambientales, estructurales, así como pérdidas económicas o hasta lesiones humanas. Estos análisis deben ser no destructivos con el objetivo de que, si la tubería en estudio se encuentra en buen estado, se pueda seguir utilizando sin problema.

A lo largo de los años se han utilizado diferentes técnicas para el estudio estructural de las tuberías como lo es el método que se basa en el estudio del flujo magnético, el cual, según un estudio, “su precisión está limitada a pérdidas relativas de espesor de $> 10\%$ debido a las variaciones inherentes en la permeabilidad magnética del tubo de acero”², lo cual quiere decir que no es capaz de medir el espesor perdido si este es menor del 10% del espesor total de la tubería. De esto, los métodos convencionales miden la pérdida del espesor que se presenta más no las condiciones en las que se encuentra el espesor de tubería restante, sin contar que son aplicables para longitudes de tuberías cortas, con un cierto grado de incertidumbre debido a que, al ser tramos de tuberías tan largos, no se puede realizar la cantidad de estudios necesarios para caracterizar la totalidad de la longitud, lo cual trae consigo, un incremento en los costos y pérdida de tiempo.

La aplicación de ondas guiadas, que la literatura define como: “Una onda elástica que se propaga a través de una guía de onda”³, como técnica de monitoreo de la integridad estructural (MIE) de las tuberías utilizadas para el transporte de

² RUIZ MARTÍNEZ, Alberto. Monitoreo de la integridad estructural en tuberías usadas en la generación de energía mediante tomografía de ondas guiada. [En línea]. Proyecto estratégico. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2018. [Consultado 2 diciembre 2020]. Disponible en: www.cemiego.org/index.php/proyectos/desarrollos-tecnologicos-para-explotacion/p18/9-linea-de-investigacion/proyecto/31-p18.

³ Ibid.

hidrocarburos, permite realizar una inspección de los ductos en rangos de longitudes mayores a los métodos ya mencionados y para materiales tanto aislantes como para los que presenten algún tipo de recubrimiento, permitiendo disminuir los tiempos de estudio, costos y evitando que se tengan que generar paradas en el transporte de los hidrocarburos.

Este trabajo propone estudiar mediante simulación la propagación de las ondas guiadas de baja frecuencia que viajan a través de tuberías que presentan una discontinuidad en su estructura, con el fin de realizar un monitoreo de la integridad estructural de una sección longitudinal cuando estas transportan hidrocarburos o sus derivados, detectando el comportamiento de la onda para esta falla en específico e identificando que dirección de la falla es más influyente en el amortiguamiento de la onda.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar numéricamente el amortiguamiento de una onda guiada en un tramo de oleoducto con una discontinuidad prisma rectangular, identificando el efecto de la dirección de la falla en la propagación de la onda, empleando ANSYS.

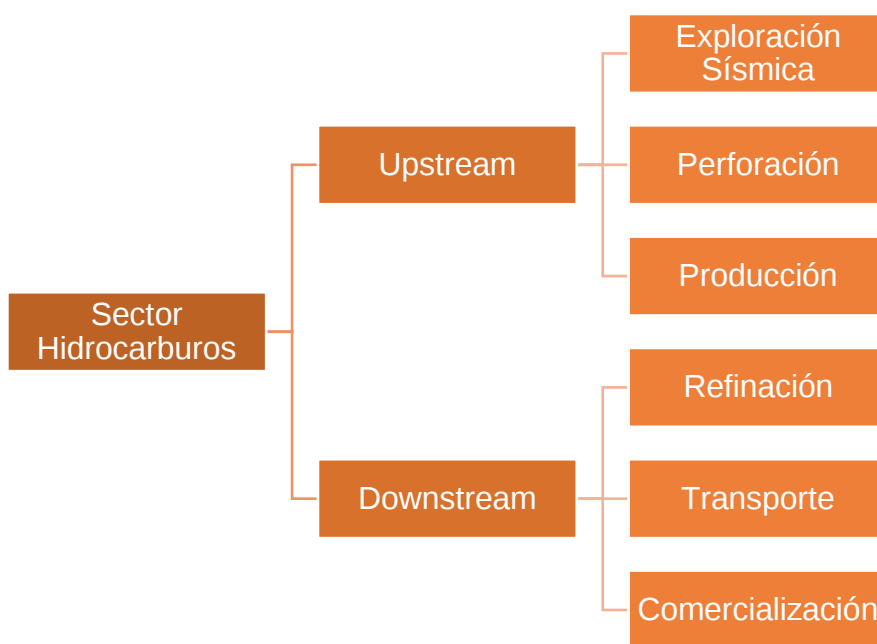
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un modelo computacional en ANSYS que simule la interacción entre la onda guiada y la discontinuidad en una tubería.
- Identificar como afectan las distintas direcciones de la discontinuidad en la reflexión de la onda guiada que se propaga a través de la tubería.
- Contrastar los resultados obtenidos de la simulación en ANSYS con datos reportados en la literatura científica sobre propagación de ondas guiadas en tuberías.

2. MARCO TEORICO

A grandes rasgos la industria o la cadena del sector de los hidrocarburos se divide en dos grandes grupos, Upstream que incluye tareas como, las que se deben realizar para identificar yacimientos potenciales ya sean de petróleo o de gas natural, las de perforación para conectar la superficie con el punto objetivo y las de explotación de los pozos extrayendo el petróleo o el gas natural, y Downstream tratándose comúnmente de las tareas de refinamiento del petróleo y procesamiento del gas natural, del transporte y de la comercialización de sus derivados⁴.

Figura 1. Cadena del sector de los hidrocarburos.



⁴ ANH (Agencia nacional de hidrocarburos). La Cadena del Sector Hidrocarburos [En línea]. Bogotá, 2018. [Consultado 4 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.anh.gov.co/portalarregionalizacion/Paginas/LA-CADENA-DEL-SECTOR-HIDROCARBUROS.aspx>

Exploración Sísmica: Es un proceso en el cual, mediante una fuente de energía ubicada en la superficie se envían ondas que viajan a través del subsuelo, atravesando las diferentes capas de roca, en donde las ondas se devuelven hasta la superficie llegando a equipos especiales llamados geófonos capaces de captar el comportamiento que tuvo la onda al viajar por el subsuelo, identificando las diferentes discontinuidades existentes y permitiendo determinar algún punto prometedor que presente acumulación de hidrocarburos⁵.

Perforación: Consiste en el proceso de perforación de los pozos con el objetivo de conectar la superficie del campo con el punto de interés donde posiblemente se encuentra petróleo o gas natural acumulado. Esto incluye el proceso de cementación del pozo con el fin de entregarle mayor estabilidad a las paredes y disminuir los problemas que se puedan presentar durante la perforación como derrumbes, en donde también juega un papel fundamental el lodo de perforación.

Producción: Una vez perforado el pozo con condiciones estables, se comienza el proceso de producción del yacimiento, en donde se comienzan a extraer los hidrocarburos inicialmente por flujo natural (drenaje gravitacional, drenaje por gas o drenaje por agua) debido al diferencial de presión que existe entre la cara del pozo y las válvulas del árbol de navidad. Una vez este diferencial pierda la capacidad de producir el yacimiento por si solo o sus valores de producción sean inviables económicamente, se procede aplicar diferentes métodos de recuperación secundaria o terciaria.

Refinación: Con el petróleo ya extraído, se procede a realizar el proceso de refinación, el cual consiste en someter el petróleo a altas temperaturas, en donde debido a los diferentes puntos de ebullición de los derivados, se logra separar en una variedad de productos como combustibles o productos petroquímicos.

⁵ Ibíd.

Transporte: El transporte de los hidrocarburos comienza una vez este se encuentra en la cabeza de pozo, con la necesidad de ser transportado a los sitios de almacenamiento o de procesamiento como lo son las refinerías. Como medios de transporte encontramos los oleoductos para el petróleo, los gasoductos para el gas, los carrotanques y los buques.

Comercialización: Área donde se encuentran todas las actividades necesarias de carácter comercial para lograr distribuir los productos derivados de los hidrocarburos, ubicándolos al alcance de los usuarios.

2.1. OLEODUCTOS (TUBERÍAS).

Haciendo énfasis en la temática del proyecto, se presenta una sección con un método de transporte de hidrocarburos en específico que son los oleoductos, los cuales se conocen como un conjunto de tuberías de acero ensambladas entre sí, contruidos sobre superficie, enterrados bajo tierra o atravesando cuerpos de agua que, mediante equipos de bombeo, se encargan de transportar hidrocarburos o sus derivados desde una locación a otra de la forma más rápida, rentable y segura⁶.

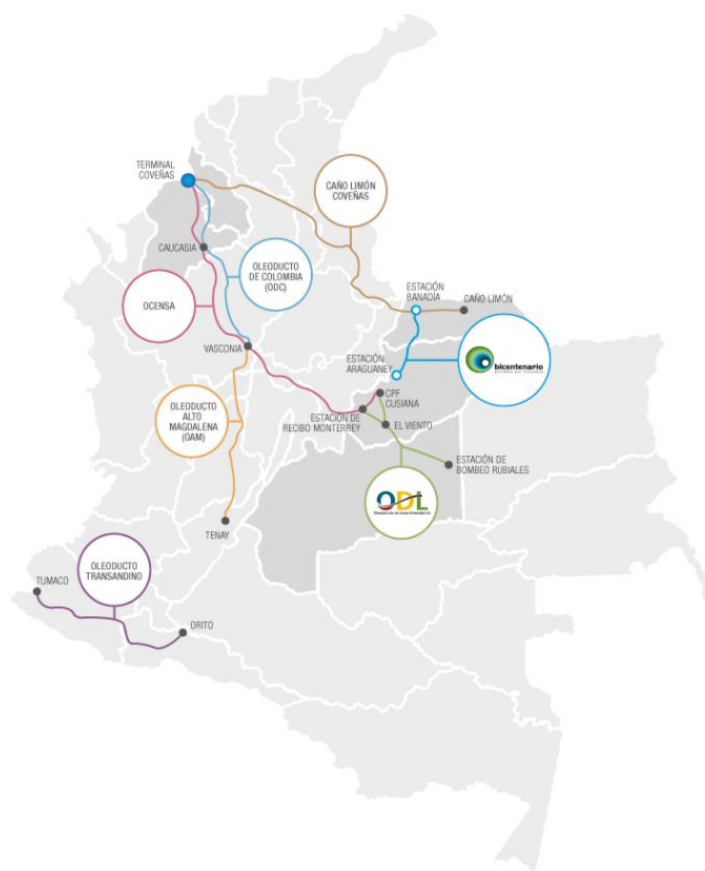
Colombia cuenta con una red de más de 8500 kilómetros de poliductos y oleoductos que van desde los centros de producción hasta las refinerías y puertos en los océanos Atlántico y Pacífico. También cuentan con 53 estaciones en las cuales se bombea el crudo y sus derivados logrando atravesar la geografía colombiana y los centros de almacenamiento.

Las principales redes existentes en el territorio nacional se puede observar en la figura 2, siendo el Oleoducto Caño Limón-Coveñas con una longitud de 770 km, el

⁶ OLEODUCTO BICENTENARIO. El oleoducto [En línea]. Bogotá D.C., 2020. [Consultado 14 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.bicentenario.com.co/index.php/quienes-somos-2/el-oleoducto>

Oleoducto de Alto Magdalena que transporta el crudo proveniente del Valle Superior del Magdalena, el Oleoducto Colombia con 481 km de longitud conectando la estación Vasconia con el puerto de Coveñas, el Oleoducto Central S.A. (Ocensa) con 790 km de longitud que transporta principalmente el crudo proveniente del piedemonte llanero hasta el terminal marítimo de Coveñas y el Oleoducto Trasandino con 306 km que transporta crudo desde Ecuador hasta el puerto de Tumaco⁷.

Figura 2. Mapa de Colombia con los principales oleoductos.



Fuente: OLEODUCTO BICENTENARIO. El oleoducto [En línea], Bogotá D.C., 2020. [Consultado 14 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.bicentenario.com.co/index.php/quienes-somos-2/el-oleoducto>

⁷ CENIT. “Descripción de la red” [En línea]. Bogotá, 2020 [Consultado 12 diciembre 2020]. Disponible en: <https://cenit-transporte.com/oleoductos/>

Estas tuberías se fabrican mediante tubería de 30 cm a 120 cm de diámetro⁸, producidas con soldadura por resistencia eléctrica, soldadura longitudinal por arco sumergido o soldadura helicoidal por arco sumergido, con acero comprendido en una amplia gama desde estándar hasta especiales. En la figura 3 se pueden observar diferentes tipos de materiales para tuberías según la ASME en su guía de “PIPELINE TRANSPORTATION SYSTEMS FOR LIQUID HYDROCARBONS AND OTHER LIQUIDS”.

Figura 3. Materiales para tuberías.

TABLE 423.1 MATERIAL STANDARDS	
Standard or Specification	Designation
Pipe	
Pipe, Steel, Black & Hot-Dipped, Zinc-Coated Welded & Seamless	ASTM A 53
Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service	ASTM A 106
Pipe, Steel, Electric-Fusion (Arc)-Welded (Sizes NPS 16 and Over)	ASTM A 134
Electric-Resistance-Welded Steel Pipe	ASTM A 135
Electric-Fusion (Arc)-Welded Steel Pipe (NPS 4 and Over)	ASTM A 139
Seamless and Welded Steel Pipe for Low Temperature Service	ASTM A 333
Metal-Arc-Welded Steel Pipe for Use with High-Pressure Transmission Systems	ASTM A 381
Seamless Carbon Steel Pipe for Atmospheric and Lower Temperatures	ASTM A 524
General Requirements for Specialized Carbon and Alloy Steel Pipe	ASTM A 530
Electric-Fusion-Welded Steel Pipe for Atmospheric and Lower Temperatures	ASTM A 671
Electric-Fusion-Welded Steel Pipe for High-Pressure Service at Moderate Temperatures	ASTM A 672
Line Pipe	API 5L
Ultra-High Test Heat Treated Line Pipe	API 5LU

Fuente: ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos). PIPELINE TRANSPORTATION SYSTEMS FOR LIQUID HYDROCARBONS AND OTHER LIQUIDS. ASME B31.4 [En línea]. New York, 1998. 56p.

⁸ OLEODUCTO BICENTENARIO. Op. cit.

2.2. FALLAS EN TUBERÍAS

Las tuberías utilizadas para el transporte de hidrocarburos (oleoductos) se encuentran expuestas a diferentes factores que afectan la confiabilidad y la vida útil de su estructura, generando en el tiempo, accidentes de seguridad cuando la fuerza causante de falla ya sea un esfuerzo mecánico o una sobrepresión en la tubería, supera la resistencia del material.

Estos elementos se encuentran en entornos donde se pueden presentar causantes de deterioro como lo son las cargas mecánicas por encontrarse enterrados para atravesar ríos o carreteras, los efectos térmicos, la radiación, o la presencia de diferentes factores biológicos, que mezclándose entre sí, con los factores propios del transporte o del fluido como son las influencias químicas por la composición del fluido transportado (Presencia de CO₂ y H₂S propenso a generar corrosión)⁹, la velocidad del fluido que se transporta y la composición y el estado de la superficie, causando algún modo de falla, en donde se puede encontrar principalmente los efectos debido a la corrosión.

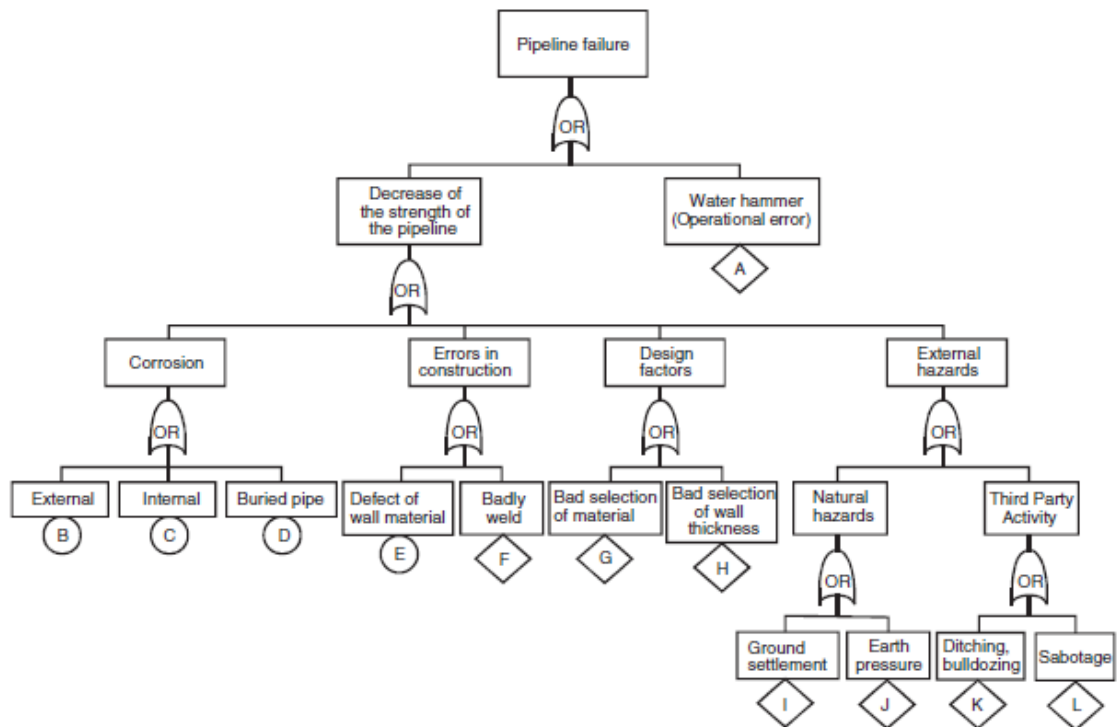
A continuación, se mencionarán algunas de las diferentes fallas que se pueden encontrar en la estructura de las tuberías, donde se mencionarán las principales consecuencias, los agentes causantes de la falla y los diferentes métodos por los cuales pueden ser detectadas para realizar su posterior proceso de mantenimiento.

2.2.1. Tipos de falla. A grandes rasgos, las fallas se pueden clasificar en dos grupos principales que son las fallas instantáneas y las fallas dependientes del tiempo. Las fallas instantáneas son aquellas que pueden ocurrir en cualquier momento del ciclo de vida de la tubería, ya sea al inicio a causa de errores de

⁹ BRUCE, N. et al. 'La corrosión: la lucha más extensa', En: *Oilfield review*. Texas, 2016. Vol. 28, No. 2. pp. 36-51.

diseño, errores en la construcción de la tubería, errores en los materiales, errores en la instalación del sistema, o después de un periodo mayor de funcionamiento por acciones de terceros con voladura de tuberías o por cuestiones naturales como terremotos y/o tormentas, y las fallas dependientes del tiempo son aquellas que a medida que pasa el tiempo, se va aumentando la criticidad del elemento hasta llevarlo a falla y se encuentran relacionadas con los mecanismos de crecimiento de fisuras por fatiga, diferentes formas de corrosión como por tensión o desgaste de la tubería¹⁰.

Figura 4. Diagrama de árbol de causas de fallas en tuberías.



Fuente: Dziubiński, Marcin. Frątczaka, Michał. Markowski, Andrzej. 'Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines'. En: *Elsevier*. Polonia, 2006. Vol.19, No. 5. pp. 399-408.

¹⁰ RUMICHE, Francisco A. J. y INDACOCHEA, Ernesto. *Estudios de Caso de Fallas y Accidentes en Gasoductos y Oleoductos*. [En línea]. Chicago.: Universidad de Illinois, 2015. [Consultado 18 diciembre 2020]. Disponible en: http://materiales.untrefvirtual.edu.ar/documentos_extras/20385_Tecnologia_de_los_materiales/Estudiosdecasodefallasyacidentes.pdf

2.2.2. Causa de las fallas en tuberías. Las tuberías encargadas del transporte del petróleo o el gas natural presentan fallas causadas por diferentes factores que afectan el funcionamiento, en donde podemos encontrar las causas naturales del entorno, las causas propias del fluido que se transporta, las acciones de terceros y los errores que se presentan en la etapa de diseño y/o instalación de la estructura¹¹.

- **Corrosión:** La corrosión es uno de los factores que más afecta la integridad estructural de las tuberías, esta se puede presentar tanto en el interior debido a la composición química propia del fluido que se transporta o por la presencia de agentes corrosivos como CO₂ o H₂S. También, la corrosión se puede presentar en la superficie externa de la tubería ocasionada por las condiciones ambientales que se presentan como la humedad de su entorno, la presencia de agentes como el cloruro de sodio (NaCl) y el dióxido de azufre (SO₂), y la acción de agentes cuando la tubería se encuentra enterrada en donde el suelo cumple el papel de electrolito¹².
- **Erosión:** La erosión, así como la corrosión, implica una degradación de la superficie de un material, que, a diferencia de la corrosión ocasionada por una acción electroquímica, esta se produce por acción mecánica (fricción) y que, en el caso de estudio de los oleoductos, tiene como consecuencia una pérdida del espesor de la tubería, produciendo puntos de concentración de esfuerzos, es decir, puntos críticos para que se presenten fallas¹³. La erosión se presenta cuando la superficie de los ductos entra en contacto con un líquido a alta velocidad que contiene partículas sólidas o burbujas, generando un desprendimiento del material.

¹¹ Ibíd.

¹² BRUCE, N. et al. Op. cit.

¹³ PACHECO PACHECO, Manuel. Diseño, construcción y mantenimiento de ductos terrestres para transporte y recolección de hidrocarburos. Mexico: Comité de normalización de petróleos mexicanos y organismos subsidiarios, 2002. pp. 119.

- **Abolladuras:** Las abolladuras en las tuberías pueden ser separadas en dos grupos, las abolladuras simples y las abolladuras con concentrador de tensión. Las abolladuras simples son aquellas que presentan una deformación en el contorno de la tubería, pero no presenta un concentrador de tensión, esto quiere decir que se deforma el material, pero no se logró la pérdida o separación de la estructura, y la abolladura con concentrador de tensión es aquella que presenta una deformación en el contorno de la tubería y a su vez se generaron grietas, muescas o ranuras originadas por el retiro de material.
- **Errores de diseño y/o instalación:** Son aquellos errores generados en etapas tempranas del diseño y la instalación de los sistemas de transporte. Se encuentran problemas como el mal dimensionamiento del sistema que lleva a una mala selección del diámetro de la tubería produciendo ovalización en exceso o una rotura. También, encontramos problemas como el golpe de ariete por errores en el cálculo, problemas en las costuras debido a errores en la soldadura de las tuberías o mala selección del material o recubrimientos
- **Acción de terceros:** En Colombia esta es una gran problemática que se puede constatar con el informe “Verdad y afectaciones a la industria petrolera en Colombia en el marco del conflicto armado”, realizado por La Fundación Ideas para la Paz, donde se evidenció que, en 30 años, se cometieron más de 3600 atentados¹⁴ en donde se utilizaban artefactos explosivos. Otra problemática es la instalación de válvulas ilícitas en el sistema de transporte de petróleo con el propósito de hurtarlo.
- **Riesgos naturales:** Encontramos afectaciones en el estado estructural del sistema de transporte de crudo como colapso de la tubería por deslizamiento de tierra, ocasionado por fenómenos terrestres como movimientos tectónicos o

¹⁴ SARMIENTO ELJADUE, Nataly, et al. VERDAD Y AFECTACIONES a la infraestructura petrolera en Colombia en el marco del conflicto armado. [En línea]. Bogotá, 2020. [Consultado 12 diciembre 2020]. Disponible en: <https://codhes.files.wordpress.com/2020/08/codhesfinal.pdf>

sismicidad, o por fenómenos meteorológicos como mareas, lluvias e inundaciones.

2.3. MANTENIMIENTO DE TUBERÍAS

El mantenimiento en el sistema de transporte de petróleo y gas natural, en este caso tuberías, se realiza aplicando las tres fases de mantenimiento que son mantenimiento predictivo, mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo. Esto con el fin de garantizar que se mantenga la integridad estructural del sistema, logrando preservar un transporte de crudo constante según las necesidades y evitando las afectaciones económicas, sociales y/o ambientales que conllevan los derrames de crudo o la parada en el transporte.

2.3.1. Mantenimiento predictivo. Este tipo de mantenimiento consiste en realizar actividades que permitan identificar el estado actual de la tubería, pronosticando el tiempo futuro de falla de un elemento en específico, para así poder realizar un plan de mantenimiento adecuado a la falla y que sea reemplazado el elemento o sección crítica antes de que se produzca la falla, evitando, que se tengan tiempos de parada mayores por problemas no detectados o no esperados.

Para realizar este mantenimiento se deben medir factores característicos del elemento en estudio que permitan identificar una relación con del tiempo de vida. Para el caso del mantenimiento en tuberías, uno de los factores más importantes a tener en cuenta, es el espesor del tubo, el cual es un factor crítico en el óptimo funcionamiento del sistema sin que se presenten fallas.

2.3.2. Mantenimiento preventivo. Consiste en las actividades de mantenimiento que se deben realizar para evitar que los elementos, en este caso tuberías, lleguen al punto de falla. Es la etapa posterior al mantenimiento predictivo, donde una vez se tiene establecido los puntos de falla, antes de que concluya su tiempo de vida útil se realizan las actividades necesarias para preservar el funcionamiento del sistema como cambio de sección por pérdida excesiva de material que pone en riesgo la integridad del ducto.

También entran en consideración las acciones que se pueden realizar para prevenir que las fallas ocurran o evitar que se vea afectado de alguna forma el elemento de interés (tuberías) como recubrir los ductos con material anticorrosivo o utilizar ánodos de sacrificio, en donde el desgaste se verá reflejado en objetos externos que pueden ser reemplazados más fácilmente o con menor impacto económico que el sistema principal donde un cambio representa afectaciones de tiempo mayores.

2.3.3. Mantenimiento correctivo. Última línea en el mantenimiento de los oleoductos, la cual se aplica en el momento en que ocurre el problema, cuando no se pudo predecir ni prevenir debido a las circunstancias que las generaron, su principal objetivo es reparar la falla y poner en funcionamiento el sistema de transporte en el menor tiempo posible y al menor costo.

En las tuberías la corrección se realiza mediante el cambio de sección de ducto defectuoso, reemplazándolo por un tramo en óptimas condiciones de funcionamiento. Más común en las fallas ocasionadas por acción de terceros o por las ocasionadas por los riesgos naturales de su ubicación.

2.3.4. Técnicas de monitoreo de integridad estructural. Las tuberías encargadas de transportar crudo y gas natural, debido a las condiciones del entorno y a las propiedades de los fluidos que transportan pueden presentar fallas superficiales tanto externas como internas, las cuales deben ser detectadas

mediante técnicas de monitoreo no destructivas, ya que como su nombre lo dice, pueden identificar el estado de la tubería, sin afectar su integridad.

Estas técnicas de monitoreo de integridad estructural no destructivas hacen parte del plan de mantenimiento predictivo, entregando información del estado actual de la tubería para así, lograr establecer el tiempo de vida restante y aplicar el mantenimiento preventivo correspondiente al caso que garantice el óptimo funcionamiento del sistema de transporte.

Mas precisamente estos ensayos son aquellos que no alteran de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del elemento en estudio, y se realizan mediante la aplicación de fenómenos físicos como ondas acústicas, ondas elásticas, ondas electromagnéticas, capilaridad del material, absorción, entre otros¹⁵.

2.4. ONDAS GUIADAS

La técnica de Ondas Guiadas es un método de inspección no destructiva, que se realiza empleando un anillo de transductores que abraza la tubería, para emitir ondas ultrasónicas de baja frecuencia que viajan hacia ambos lados del ducto, logrando recorrer grandes distancias de tubería con un único punto de aplicación (posición del anillo). Este sistema permite la detección rápida de la degradación con el ducto en servicio, reduce los costos de acceso e inspección, y evita la remoción del material aislante o revestimiento, excepto por la zona en donde va posicionado el anillo.

¹⁵ BURBANO MIRANDA, Napoleón Aquiles. Ensayos no destructivos con el método de radiografía industrial en la inspección de soldaduras de tuberías de acero al carbono en oleoductos. [En línea]. Quito.: Universidad tecnológica equinoccial, 2011. [Consultado 19 diciembre 2020]. Disponible en: http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/5994/1/44721_1.pdf

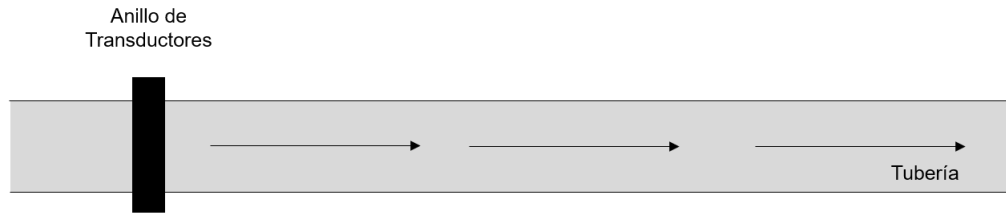
El método de las ondas guiadas posee bastantes ventajas a comparación de los demás métodos no destructivos convencionales¹⁶ tales como la rapidez con la que se analizan las secciones, la precisión de detección de fallas, las distancias más largas de tubería que se pueden analizar llegando hasta 30 metros y la practicidad para analizar tubería en lugares donde otros métodos no pueden hacerlo tan fácilmente. Esta técnica puede ser utilizada mientras la tubería se encuentra en servicio

Una de las aplicaciones principales de esta técnica, es el estudio en tuberías enterradas o de tuberías con recubrimientos, ya que esta necesita únicamente que se encuentre libre la distancia de ducto necesaria para posicionar el anillo de transductores, reduciendo costos en comparación con otros métodos de inspección no destructivos.

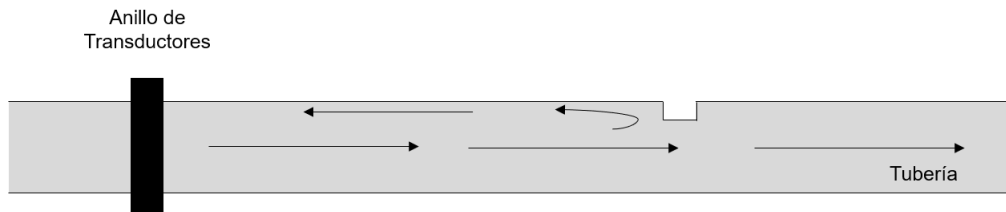
El principio de funcionamiento de este método consiste en generar pulsos de ondas desde el anillo de transductores, a una frecuencia establecida, que viaja a lo largo de la tubería, en donde si esta se encuentra libre de algún tipo de defecto o discontinuidad, la onda se puede propagar sin dificultad como se evidencia en la figura 5 (a). Sin embargo, si al viajar la onda por la tubería esta encuentra algún cambio en la sección transversal (discontinuidad), se reflejará devuelta una parte de la energía de la onda figura 5 (b), siendo captada por los sensores del anillo de transductores identificando la posición del defecto.

¹⁶ NASEDKINA, A.; ALEXIEV, A. and MALACHOWSKI, J. Numerical Simulation of Ultrasonic Torsional Guided Wave Propagation for Pipes with Defects [En línea]. Springer International Publishing Switzerland, 2016. [Consultado 20 diciembre 2020]. Capítulo 33. 1-14pp. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-26324-3_33

Figura 5. Comportamiento de la onda guiada sin y con discontinuidad.



(a) Tubería Libre



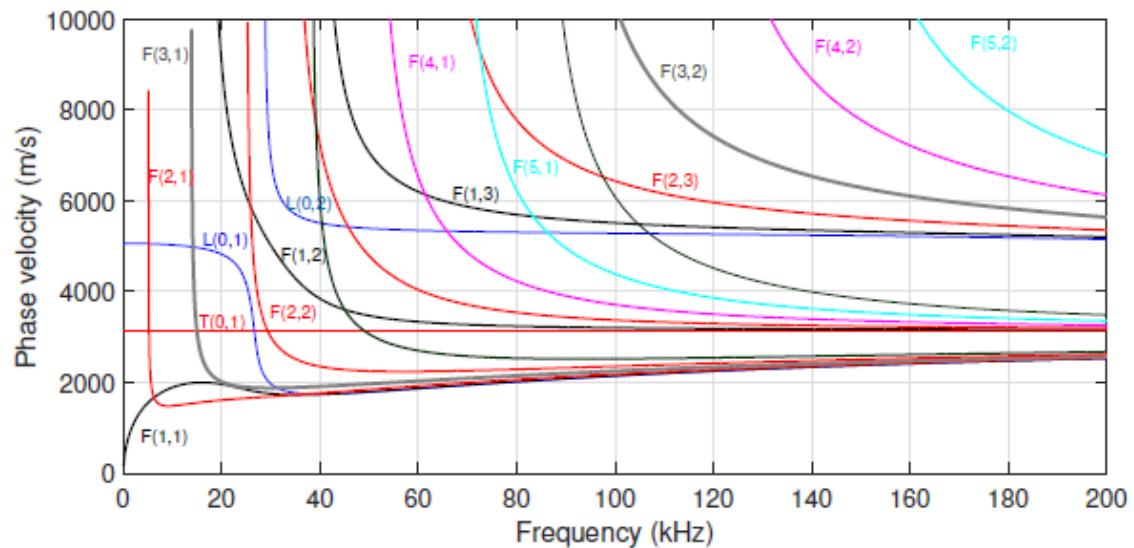
(b) Tubería con Discontinuidad

La aplicación de ondas guiadas para inspeccionar el estado estructural de las tuberías nos permite identificar la posición de defectos como corrosión o pérdida de material, sin embargo, no nos permite obtener resultados precisos del estado del espesor de la tubería, por lo que se recomienda que, una vez identificados los puntos críticos con ayuda de esta técnica, se implementen otros métodos de inspección punto a punto no destructivos más precisos.

Existen tres modos diferentes de propagación de la onda guiada a través de una tubería que son: longitudinal, torsional y de flexión. Únicamente los dos primeros modos de propagación mencionados son utilizados en la inspección de tuberías, donde el más común es el torsional debido a que este presenta diferentes ventajas en comparación con el longitudinal como una velocidad de onda constante. Las velocidades de las ondas guiadas varían en función de la frecuencia a la que se

está trabajando, como se muestra en la figura 6, y depende del tipo de tubería en estudio¹⁷.

Figura 6. Curvas de dispersión, tubería 1 in cedula 40.



Fuente: QUIROGA MÉNDEZ, Jabid. Stress monitoring of cylindrical structures using guided waves. [En línea]. Tesis Doctoral. Universidad politécnica de Catalunya, 2018. [Consultado 9 diciembre 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=257495>

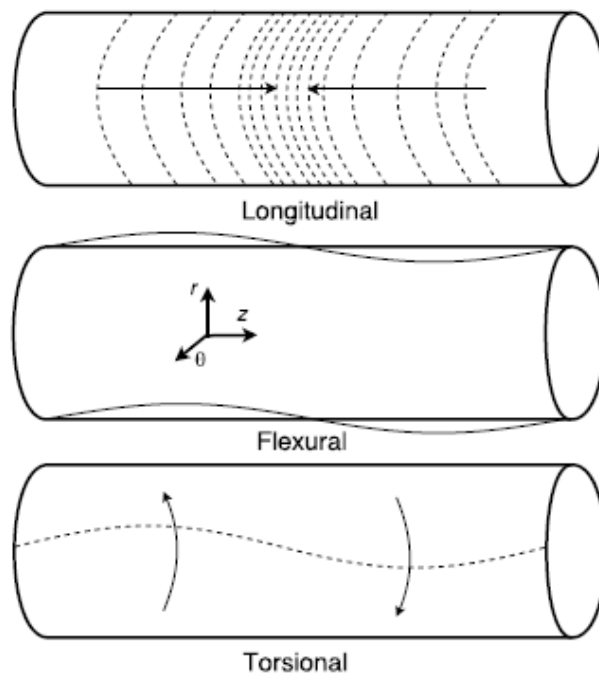
En la figura 6 se observa un ejemplo de las curvas de dispersión para una tubería de 1 pulgada cedula 40, en donde se observa que el único modo de onda con velocidad constante para diferentes valores de frecuencia es la torsional T (0,1) y que, a altos valores de frecuencia, el modo longitudinal L (0,2) también presenta velocidad constante.

¹⁷ ZHOU, Zhaoming; WAN, Fu; LI, Siyu; LIAN, Zhonghua and SHI, Taihe. "Numerical Simulation of Experimental Crack Detection in Pipes Using Low-frequency Torsional Guided Waves". [En línea]. China, 2012. [Consultado 9 diciembre 2020]. Disponible en: <https://trid.trb.org/view/1275108>

2.4.1. Modos de onda guiada. Como se mencionó anteriormente, existen 3 modos diferentes de propagación axial en una tubería, uno asimétrico (Flexión) y dos simétricos (longitudinal y torsional). Los más utilizados para inspeccionar oleoductos son los modos longitudinales y torsionales debido a su distribución de energía circunferencial uniforme.

Cada modo de onda es caracterizado por la forma de producirse o desplazarse en la tubería. En la figura 7 se observa que en el modo longitudinal es dominante el movimiento en dirección radial y/o axial. Este modo permite identificar fallas longitudinales como en los soportes de tuberías soldados.

Figura 7. Comportamientos de los modos de onda longitudinal, flexión y torsional.



Fuente: QUIROGA MÉNDEZ, Jabid. Stress monitoring of cylindrical structures using guided waves. [En línea]. Tesis Doctoral. Universidad politécnica de Catalunya, 2018. [Consultado 9 diciembre 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=257495>

En el modo torsional las ondas se propagan en dirección θ figura 7 y es el más utilizados debido a sus múltiples ventajas como no verse afectado por el contenido líquido de los ductos, presenta velocidad constante para diferentes valores de frecuencia, tiene mayor sensibilidad para detectar fallas debido a que tiene una longitud de onda más corta por lo que se propaga a velocidades más bajas y puede ser utilizado para un amplio rango de frecuencias¹⁸.

2.5. COEFICIENTE DE REFLEXIÓN

El coeficiente de reflexión (Reflection Coefficient - R_c) es un coeficiente que permite relacionar la amplitud de la onda incidente con la amplitud de la onda reflejada, visualizando así, la influencia que tiene la superficie de incidencia de la onda, con el amortiguamiento de esta¹⁹.

Para este caso de estudio, el coeficiente de reflexión nos permite identificar la influencia de la magnitud del dimensionamiento en cada dirección (azimutal, axial y radial) de una discontinuidad en la superficie externa de la tubería y se calcula como la amplitud máxima de la onda reflejada sobre la amplitud máxima de la onda incidente, tomando valores desde 0 cuando no hay reflexión de la onda hasta 1 cuando la amplitud de la onda incidente y la reflejada son iguales²⁰.

$$R_c = \frac{\text{Amplitud}_{\text{reflejada}}}{\text{Amplitud}_{\text{incidente}}}$$

¹⁸ QUIROGA MÉNDEZ, Jaid. Stress monitoring of cylindrical structures using guided waves. [En línea]. Tesis Doctoral. Universidad politécnica de Catalunya, 2018. [Consultado 9 diciembre 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=257495>

¹⁹ L. ROSE, Joseph. Ultrasonic guided waves in solid media. Pennsylvania: Cambridge University Press. p. 238

²⁰ DEMMA. Alessandro, et al. The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements. NDT&E International. 2004, nro 37, pp 167 - 180

Caracterizar diferentes propiedades, como en este caso las dimensiones de la discontinuidad, nos facilita la interpretación de la data obtenida de la dispersión de las ondas guiadas, relacionando gráficamente diferentes valores del coeficiente de reflexión con su respectivo porcentaje de falla conocido, para el caso en que solo se tenga el R_c , poder realizar un pronóstico del estado de la tubería.

2.6. SOFTWARE ANSYS

ANSYS es un ecosistema de programas CAE (Computer Aided Engineering) para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos FEA (Finite Element Analysis), incluye las fases de: preparación, meshing ó malleo, ejecución y post proceso, el programa ejecuta análisis de piezas sometidas a fenómenos físicos usadas en ingeniería y diseño mecánico, puede resolver problemas físicos sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibración y aplicaciones específicas. “Ansys ofrece un paquete de software completo que abarca todo el rango de la física, proporcionando acceso a prácticamente cualquier campo de simulación de ingeniería que requiera un proceso de diseño”²¹

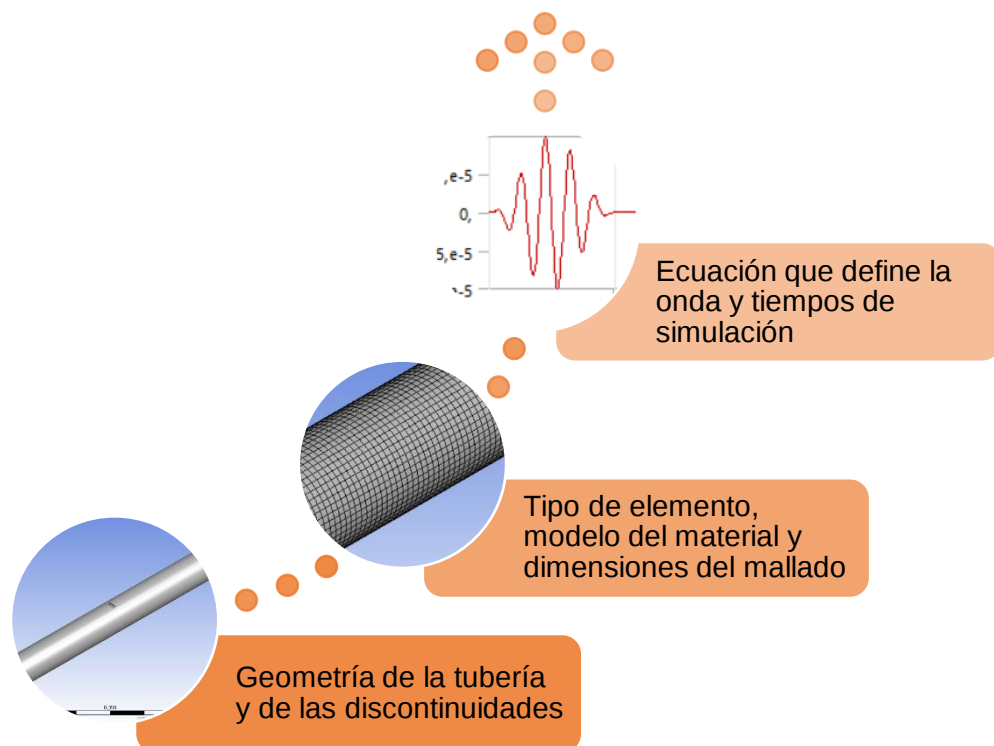
En las fases de preparación, la ejecución y el post proceso están provistos de una interfaz gráfica. El procesador incluye diferentes herramientas tales como el análisis de estructuras dinámicas y estáticas, problemas de acústicas y análisis de transferencia de calor y fluidos.

²¹ ANSYS. “Software” [En línea]. 2020. [Consultado 2 enero 2021]. Disponible en: <https://www.ansys.com/>

3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proceso de simulación que permitió analizar el comportamiento de las curvas de dispersión de las ondas guiadas para diferentes direcciones de la discontinuidad, se siguió la línea de trabajo (Figura 8), que comenzó con la definición de la geometría de la tubería y de las discontinuidades en estudio, posteriormente se definieron parámetros que permitieron representar a la tubería en el software como el tipo de elemento con el que se va a simular, el modelo del material y las dimensiones del mallado, y se finalizó con la definición de parámetros computacionales como la ecuación que define la onda y los tiempos de simulación.

Figura 8. Línea de trabajo en el proceso de simulación.



Una vez establecidos los parámetros que definieron la simulación, se hizo correr el software y se analizaron en el capítulo 4 del presente proyecto los diferentes resultados obtenidos, siendo de gran interés la interpretación de las gráficas de Tiempo Vs Deformación, producto de la propagación de la onda por la tubería.

3.1. GEOMETRÍA DE LA TUBERÍA Y DE LAS DISCONTINUIDADES

La selección del diámetro de la tubería que se estudió en la simulación correspondió a las dimensiones con las cuales se trabaja en campo para la construcción de oleoductos en el territorio nacional. Cumpliendo las especificaciones nominales establecidas, nos basamos en el catálogo de la empresa VEMACERO, C.A.*, en donde encontramos variedad de diámetros desde 1/2 pulgada hasta 24 pulgadas.

Una vez con el catálogo y con en la información de la red de transporte por oleoductos de la empresa Cenit**, y con el objetivo de seleccionar un diámetro que se utilice en la infraestructura colombiana, se escogió el diámetro correspondiente al tramo MANSOYA – ORITO de 6 pulgadas de diámetro y una longitud de 73.4 km (Figura 9).

* Empresa venezolana con más de 22 años de experiencia en la distribución de tuberías de Acero fabricadas bajo las normas ASTM, API y AWWA.

** Empresa colombiana filial de Ecopetrol, que brinda servicios portuarios, logísticos y de transporte y almacenamiento a la industria de petróleo y gas en Colombia.

Figura 9: Red de transporte por oleoducto del sistema sur colombiano de la empresa Cenit

SISTEMAS	ESTACIÓN INICIAL	ESTACIÓN FINAL	DIAMETRO PULGADAS	LONGITUD KMS
SUR				
ORITO – TUMACO (OTA)	Orito	Tumaco	10/14/18	306,9
SAN MIGUEL – ORITO (OSO)	San Miguel	Orito	12	71,7
MANSOYA – ORITO (OMO)	Mansoyá	Orito	6	73,4
CHURUYACO – ORITO (OCHO)	Churuyaco	Orito	6	17,8

Fuente: Cenit. “Descripción de la red” [En línea]. Bogotá, 2020 [Consultado 12 diciembre 2020]. Disponible en: <https://cenit-transporte.com/oleoductos/>

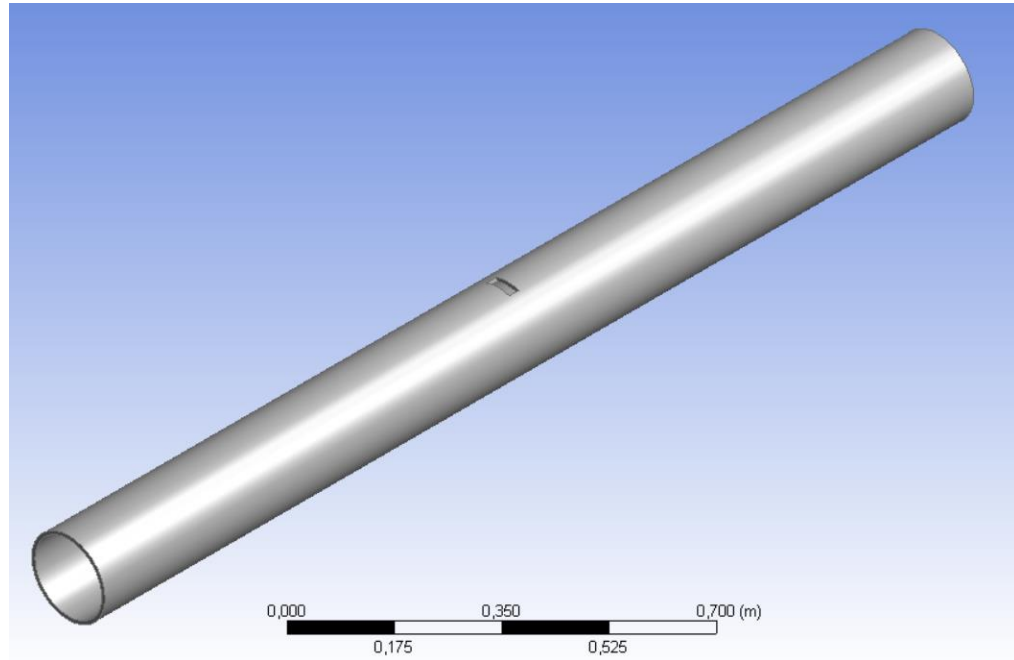
Teniendo establecido que se iba a trabajar con una tubería de diámetro de 6 pulgadas (150 mm), se selecciona que sea de cedula 40 correspondiente a un espesor de tubería de 0.28 pulgadas (7.11 mm) como se muestra en la figura 10, y se definió una longitud de tubería de 2 m (Figura 11), con el fin de tener la suficiente distancia entre la discontinuidad y los extremos de la tubería para evitar presentar errores en la medición al superponerse las ondas. Se ubicó el plano de estudio a 0.5 m del extremo de la tubería y la discontinuidad a 1 m del extremo de la tubería.

Figura 10: Selección de tubería de 6 pulgadas y cedula 40.

Diámetro Nominal NPS		Diámetro Exterior Real		Espesor de Pared		Identificación		Peso del Tubo		ASTM A53 PRESION DE PRUEBA			
Pulgadas in.	Milímetros mm.	(in.)	mm.	Pulgadas (in.)	Milímetros (mm.)	Weight Class	Schedule	lb/pie	kg/m	Grado A		Grado B	
										psi	Kg/cm2	psi	Kg/cm2
6	150	6.625	168,3	0.188	4.78	-	-	12.92	19.27	1020	72	1190	84
				0.219	5.56	-	-	14.98	22.31	1190	84	1390	98
				0.250	6.35	-	-	17.02	25.36	1360	96	1580	111
				0.280	7.11	STD	40	18.97	28.26	1520	107	1780	125
				0.312	7.92	-	-	21.04	31.32	1700	120	1980	139
				0.344	8.74	-	-	23.08	34.39	1870	131	2180	153
				0.375	9.52	-	-	25.02	37.28	2040	143	2380	167
				0.432	10.97	XS	80	28.57	42.56	2350	165	2740	193
				0.562	14.27	-	120	36.39	54.20	2800	197	2800	197
				0.719	18.26	-	160	45.35	67.56	2800	197	2800	197
				0.864	21.95	XXS	-	53.16	79.22	2800	197	2800	197

Fuente: GRUPO VEMACERO CA. Tabla API 5L / ASTM A53 [En línea]. [Consultado 27 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.vemacero.com/Tablas/A53MP.pdf>

Figura 11. Tubería de 150 mm de diámetro con espesor de 7.11 mm y 2 m de longitud.



La definición de la geometría de las discontinuidades (Figura 12) se hizo en función de porcentajes de variables ya conocidas en el problema, basado en el artículo “The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements”²² como se muestra a continuación:

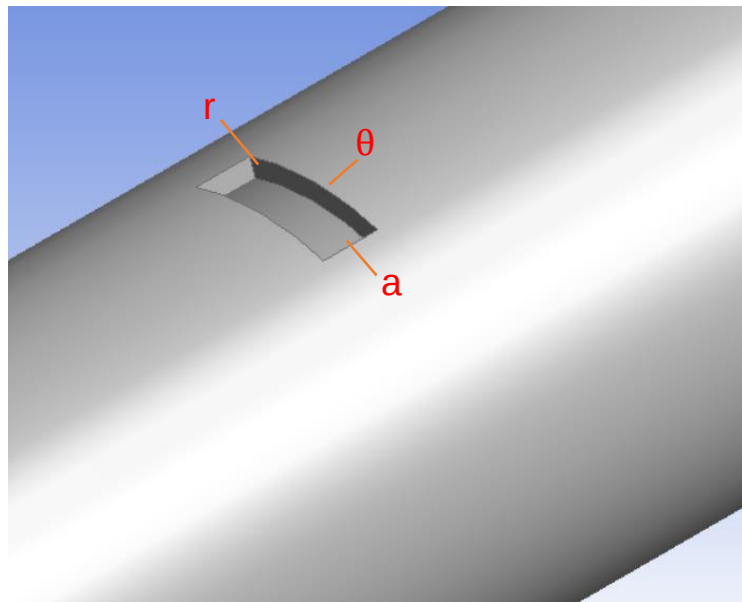
Tabla 1. Dimensión de la discontinuidad en cada coordenada cilíndrica.

Dirección	Ecuación	Parámetros
Axial	$a = \frac{A\% * \lambda}{100}$	$\lambda = \frac{v}{f}$
Radial	$r = \frac{R\% * t}{100}$	t
Azimutal	$\theta = \frac{\theta\% * 2 * \pi * R_m}{100}$	R_m

²² DEMMA. Alessandro, et al. Op. cit.

Donde a es la dimensión de la discontinuidad en la dirección vertical de la tubería, λ es la longitud de onda, v es la velocidad de la onda, f la frecuencia de la onda, r es la dimensión de la discontinuidad en la dirección radial de la tubería, t es el espesor de la tubería, θ es la dimensión de la discontinuidad en la dirección azimutal de la tubería y R_m es el radio medio de la tubería.

Figura 12. Dimensiones de la discontinuidad en la tubería.



El estudio se realizó inicialmente con la simulación de la onda guiada por la tubería sin discontinuidad, analizando dos nodos, uno en el extremo donde comienza la propagación de la onda y otro a 0.5 m de distancia. Esto se realizó con el fin de comprobar que la onda torsional se estuviera simulando de forma correcta, ya que, al determinar la velocidad entre estos dos puntos, esta debía ser igual a la velocidad transversal del ultrasonido por el material, característica propia de la propagación de las ondas guiadas torsionales.

Para el análisis de la influencia de la dirección de la discontinuidad en el amortiguamiento de la onda, se utilizaron los porcentajes de cada variable tal y como se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Porcentajes a simular para cada dimensión.

# Estudios	<i>A</i> %	<i>R</i> %	<i>θ</i> %
1	5%	10%	10%
2	10%	30%	20%
3	20%	50%	30%
4	25%	70%	40%
5	30%	90%	50%
6	40%	100%	--
7	45%	--	--
8	50%	--	--

3.2. TIPO DE ELEMENTO, MODELO DEL MATERIAL Y DIMENSIONES DEL MALLADO

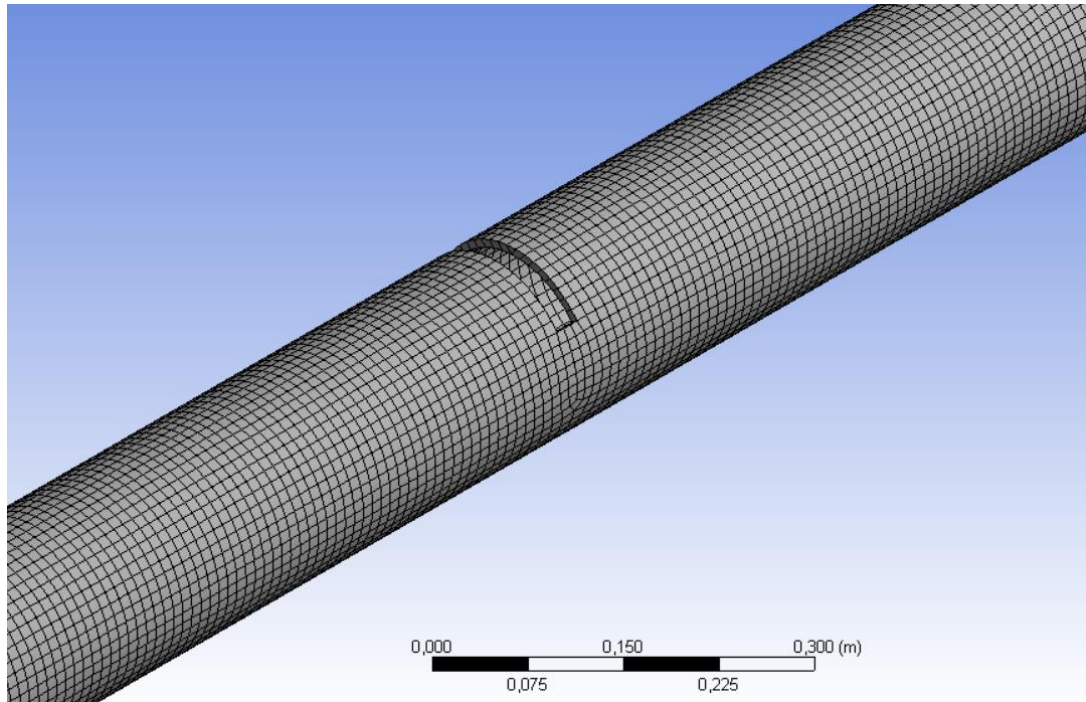
La selección del tipo de material que se utilizó en la simulación se realizó según artículos guía que hayan realizado la simulación de la onda guiada torsional por una tubería, teniendo como referencia 3 propiedades fundamentales en el comportamiento del material como lo son el coeficiente de poisson, la densidad y el módulo de Young. Para el modelo del material, se seleccionó un modelo linear isotrópico de acero estructural con las propiedades que se observan en la tabla.

Tabla 3. Propiedades del Acero Estructural.

MATERIAL	Densidad	Módulo de Young	Coeficiente de poisson
Acero Estructural	7850 kg/m ³	2e11 Pa	0.3

Para el desarrollo del mallado volumétrico de la tubería, se escogió el método hexaédrico dominante debido a su capacidad de simulación en volúmenes, obteniendo el mallado que se observa en la figura 13.

Figura 13. Mallado tubería con discontinuidad circunferencial 30%.



El dimensionamiento del mallado se realizó según la recomendación del director de proyecto, trabajando con una malla de un tamaño de elemento de $1\text{e-}2$ m, dando como resultado, mallados de más de 70 mil nodos y más de 11 mil elementos que varía según el tamaño que tenga la discontinuidad en la simulación.

3.3. ECUACIÓN QUE DEFINE LA ONDA Y TIEMPOS DE SIMULACIÓN

Trabajar con la ecuación correcta que permitiera simular una onda guiada torsional por una tubería fue un eje fundamental del proyecto, para lo cual se procedió a

buscar en la literatura diferentes artículos basados en la simulación de este tipo de onda guiada, en donde contrastaran los resultados obtenidos mediante la simulación con resultados obtenidos en campo o laboratorio, utilizando la técnica de inspección con los equipos adecuados.

Se trabajó con una ecuación, tratada en común por Ortiz²³ y Zheng²⁴ que define la onda, la cual se encuentra en función de la frecuencia que se quiera simular, el número de ciclos y del tiempo de propagación, tal y como se observa a continuación:

$$SEÑAL = 0.5 * \left(1 - \cos\left(\frac{2 * \pi * t}{t_{exc}}\right)\right) * \sin(2 * \pi * f * t)$$

Donde:

$$t_{exc} = \frac{n_{ciclos}}{f}$$

Al reemplazar el t_{exc} se obtiene una ecuación final:

$$SEÑAL = 0.5 * \left(1 - \cos\left(\frac{2 * \pi * f * t}{n_{ciclos}}\right)\right) * \sin(2 * \pi * f * t)$$

Para este caso de estudio se escogió una frecuencia de 36 KHz, valor dentro del rango de aplicación de esta técnica en campo y 5 ciclos. Se calculó el t_{exc} para

²³ ORTIZ ALCALÁ Lluís. Comparison between ansys and abaqus using ultrasonic guided waves. Montreal. ETS Ecole de technologie supérieure, 2014, pp 24.

²⁴ ZHENG Ming-fang, et al. Modeling three-dimensional ultrasonic guided wave propagation and scattering in circular cylindrical structures using finite element approach. Physics Procedia. 2011. No 22, pp 112 - 118

estos valores, el cual corresponde al tiempo en el que se genera una onda, y a partir de este tiempo a la señal se le asignó un valor cero para evitar interferencias. Al dividir $5/36000$ se obtiene el valor del tiempo de excitación, obteniendo un valor de 0.00014 s, con el cual se dispuso a graficar la onda, obteniendo el comportamiento que se muestra a continuación:

Figura 14. Comportamiento de la onda guiada en ANSYS según la ecuación.



La onda guiada torsional se genera entre los valores de 0 y 1.4×10^{-4} s en el eje “x” correspondiente al tiempo con amplitud en el eje “y” entre -9.7386×10^{-5} y 9.7321×10^{-5} , y tomando valores de amplitud 0 desde los valores de tiempo mayores a 1.4×10^{-4} s. El límite del tiempo en el que se debe correr la simulación con una amplitud de cero, debe ser suficiente para que la onda pueda viajar hasta la discontinuidad y volver al eje de estudio en la tubería, el cual para este caso de simulación se escogió un tiempo de 7×10^{-4} s.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados de este proyecto estuvo dividido 4 procesos que partió con la validación del modelo de onda guiada torsional en el software ANSYS, y continuó con el estudio de resultados de la deformación en la dirección azimutal (por ser una onda torsional), según la simulación en cada dirección de la discontinuidad, siendo estos el análisis en la dirección radial, axial y azimutal.

4.1. VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Lograr simular la onda guiada torsional a través de la tubería fue fundamental para un correcto desarrollo del proyecto, para lo cual, se realizó un proceso de validación, que consistió en comparar la velocidad de la onda obtenida de la simulación (Velocidad simulada) con la velocidad transversal del ultrasonido en el material (Velocidad teórica) que este caso fue acero estructural. Estos dos valores deben ser iguales para el caso de una onda guiada torsional.

El cálculo de la velocidad teórica (V_T) se realizó mediante la ecuación que se evidencia a continuación²⁵, la cual se deriva de la Ley de Hooke y se encuentra en función de las propiedades mencionadas en la tabla 3 que son módulo de Young, coeficiente de Poisson y la densidad del material.

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

²⁵ RUIZ GIRALDO Andrés Fernando y TASCÓN MOSQUERA Diego Javier. Medición de propiedades elásticas de materiales isotrópicos por ultrasonido. Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Santiago de Cali. Universidad Autónoma de Occidente. 2013, pp 21

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \nu)}$$

Donde:

V_T es la velocidad transversal teórica

G es el módulo de corte

ρ es la densidad del material

ν es el coeficiente de poisson

Obteniendo:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2 * \rho * (1 + \nu)}}$$

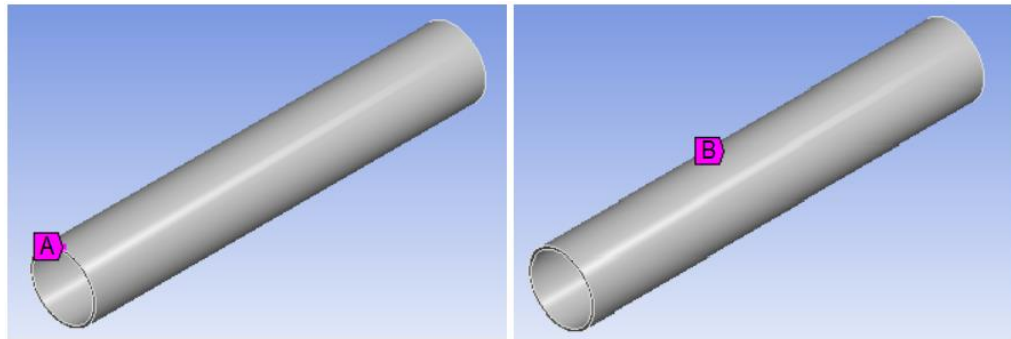
Se reemplazaron los valores de la tabla 3, obteniendo:

$$V_T = \sqrt{\frac{2e11}{2 * 7850 * (1 + 0.3)}}$$

$$V_T = 3130.35 \text{ m/s}$$

Para determinar la velocidad simulada (V_S), se realizó la simulación de la onda guiada torsional propagándose por una tubería de 150 mm de diámetro con un espesor de 7.11 mm y una longitud de 1 m, sin ningún tipo de discontinuidad en su estructura, y se ubicaron dos nodos de estudio, uno a 0 m de distancia del inicio de propagación de la onda (Nodo A) y otro a 0.5 m de distancia desde el mismo punto (Nodo B) como se observa en la figura 15.

Figura 15. Posición de los nodos A y B en la tubería de 150 mm de diámetro con un espesor de 7.11 mm y una longitud de 1 m.



Una vez con los datos tabulados, se necesitaba identificar la cota en el eje “x” entre los picos máximos de cada gráfica la cual se iba a obtener en un valor de tiempo que hace referencia al tiempo que se demoró la onda en viajar desde el Nodo A hasta el Nodo B, esto se puede observar en la figura 16 donde se encuentran superpuestas las gráficas del nodo A y del nodo B. Para esto se desarrolló un código en Matlab (Anexo A) que leyó los datos tabulados de un archivo en Excel, identificó los dos picos máximos de la gráfica (Eje “y”) y los relacionó con su correspondiente valor de tiempo (Eje “x”), para posteriormente determinar la diferencia entre estos dos valores, obteniendo los datos que se pueden observar en la tabla 4.

Figura 16. Superposición de la onda al inicio de la tubería (Azul-Nodo A) con la onda a 0.5 m de inicio de la tubería (Naranja-Nodo B). Eje “x” tiempo en segundos y eje “y” amplitud en metros.

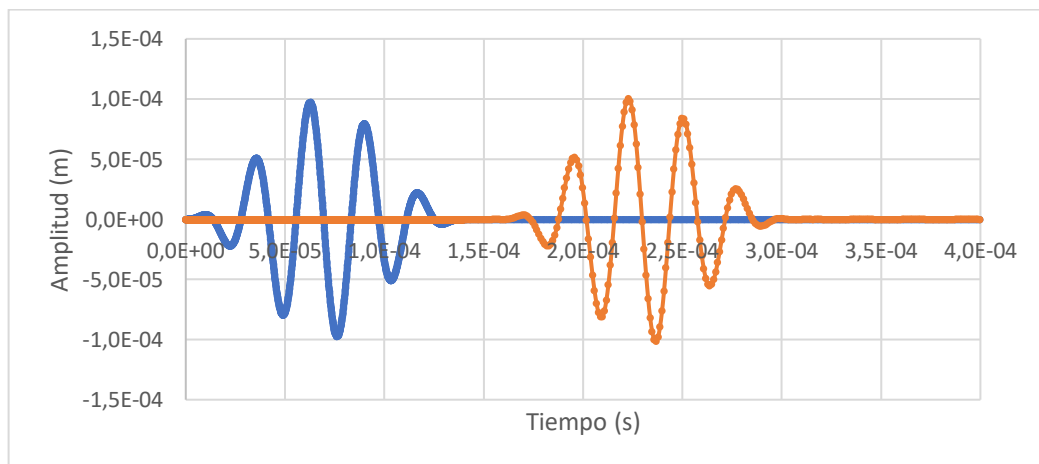


Tabla 4. Valor en el eje “x” de los picos máximos para los nodos A y B en una tubería de 150 mm de diámetro con un espesor de 7.11 mm y una longitud de 1 m.

	Nodo A (s)	Nodo B (s)	Nodo B – Nodo A (s)
Valor en el eje “x”	7.6075e-05	2.3675e-04	0.000161

Teniendo el tiempo que se demoró la onda en viajar desde el nodo A, hasta el nodo B, y sabiendo que el nodo A se ubicó al inicio de la tubería y el nodo B en el centro de la tubería, para una distancia entre nodos de 0.5 m, se determinó la velocidad de la onda como se muestra a continuación:

$$V_s = \frac{\text{Distancia entre nodo A y nodo B}}{\text{Tiempo entre nodo A y nodo B}}$$

$$V_s = \frac{0.5}{0.000161}$$

$$V_s = 3105.56 \text{ m/s}$$

Teniendo el valor teórico y el valor obtenido de la simulación, se realizó la validación de esta última velocidad mediante la determinación del error porcentual según:

$$\%E_V = \frac{V_T - V_S}{V_T} * 100$$

Tabla 5: Valores de velocidad teórica (V_T), velocidad simulada (V_S) y el porcentaje de error entre estas velocidades ($\%E_V$).

V_T (m/s)	V_S (m/s)	$\%E_V$ (%)
3130.35	3105.56	0.7919

Obteniendo un error porcentual menor al 1%, se confirmó que el modelo utilizado para simular la onda guiada torsional en el software ANSYS fue el adecuado, debido

a que la velocidad simulada presentó variaciones mínimas con respecto a la velocidad teórica.

4.2. ESTUDIO EN LA DIRECCIÓN AZIMUTAL

Para el análisis de la influencia de la dirección azimutal o circunferencial en el amortiguamiento de la onda, se realizó el proceso de simulación para 5 valores diferentes de amplitud de la discontinuidad en esta dirección, manteniendo constantes las dimensiones radial y axial. En la tabla 6 se muestran los diferentes valores de discontinuidad tratados según las ecuaciones de la tabla 1 y los porcentajes de la tabla 2. Los valores fueron trabajos entre 0 y 50% debido a que la profundidad de la discontinuidad era total.

Tabla 6: Valores simulados correspondientes a la variación en la dirección azimutal.

CIRCUNFERENCIAL	Arco de la sección (m)	Ángulo de la sección (°)
10%	0.050639	36
20%	0.101279	72
30%	0.151920	108
40%	0.202557	144
50%	0.253197	180

Para el estudio de esta dirección se mantuvo constante el valor de la dirección radial en un 100% de la profundidad correspondiente a los 7.11 mm de espesor de la tubería y un valor axial del 25% correspondiente a 0.022 m.

Desde la figura 17 hasta la figura 21 se evidencian los resultados obtenidos de la simulación para cada caso de magnitud en la dirección circunferencial de la discontinuidad. Los resultados que se analizaron en este proyecto fueron de deformación direccional en el eje azimutal de la tubería ya que la onda que se simuló

fue onda torsional y su influencia se observa en esta dirección. En cada gráfica se observan dos grupos principales donde la amplitud de la deformación varía de cero que son, el primero cuando la onda guiada pasa por el nodo de estudio ubicado a 0.5 m de inicio de la tubería como se mencionó en la sección 3.1, y el segundo grupo cuando el reflejo de la onda que es generado por la discontinuidad (ubicada a 1 m del inicio de la tubería) llega al nodo de estudio nuevamente. En otras palabras, la onda comienza a propagarse, desplazándose 0.5 m hasta llegar al nodo de estudio, continuando por la tubería hasta encontrarse con la discontinuidad en donde una porción de la onda se ve reflejada y el resto continua su camino como se evidenció en la figura 5. La onda que se reflejó viaja hasta el nodo de estudio nuevamente.

Figura 17. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 10% en la dirección azimutal.

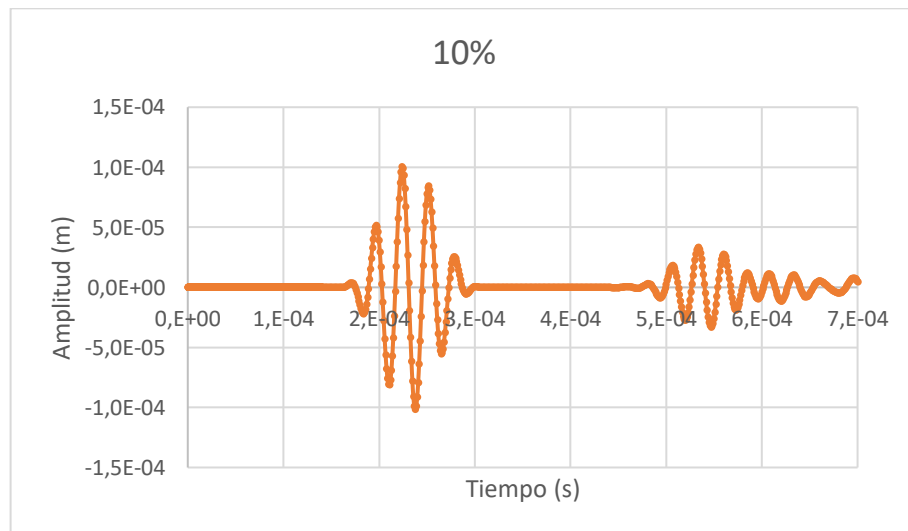


Figura 18. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 20% en la dirección azimutal.

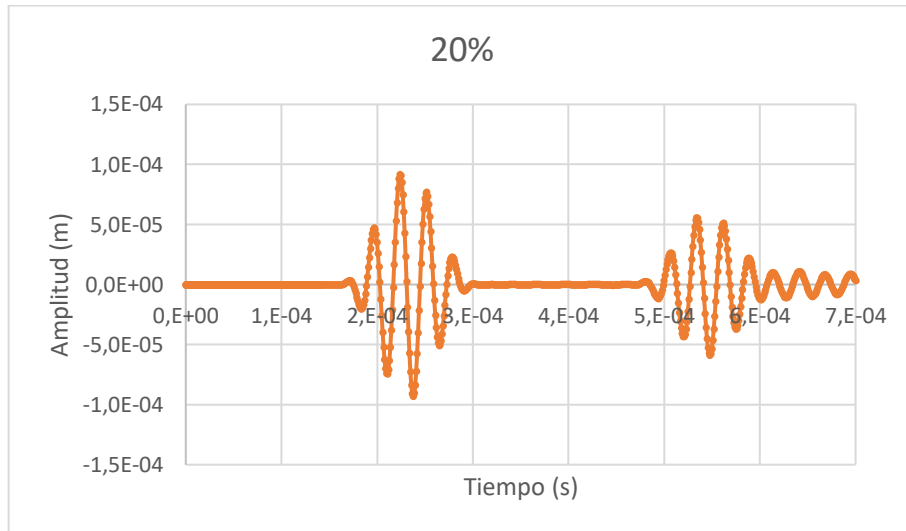


Figura 19. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 30% en la dirección azimutal.

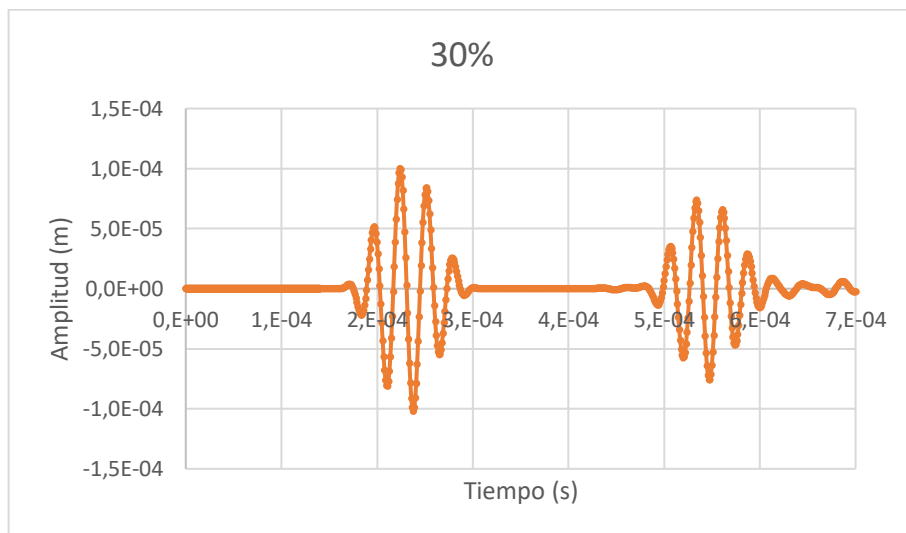


Figura 20. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 40% en la dirección azimutal.

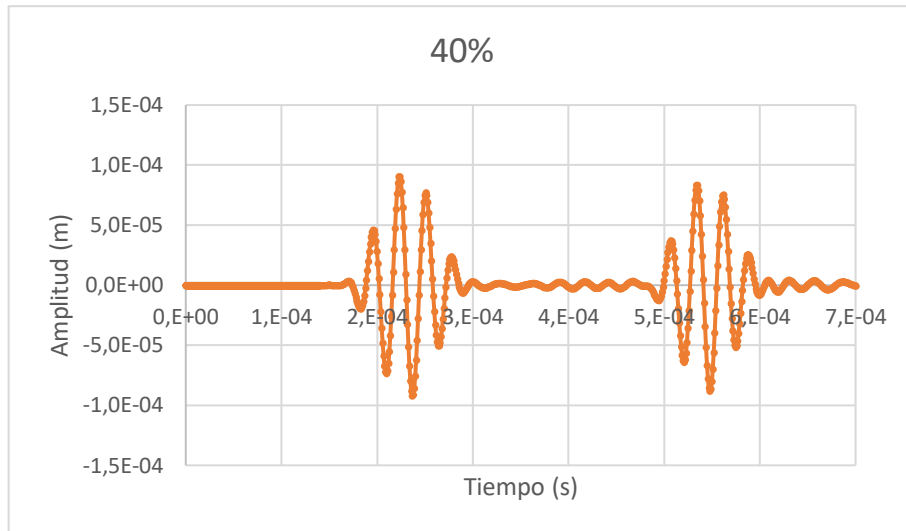
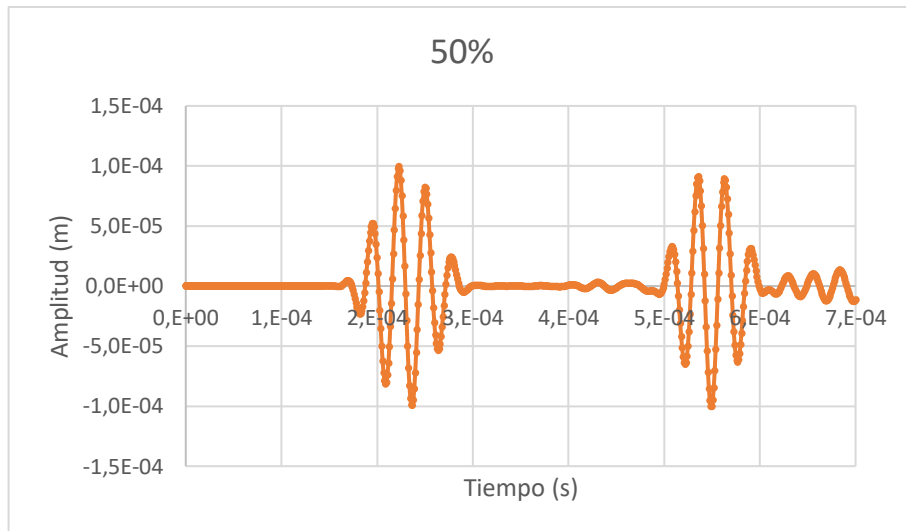


Figura 21. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 50% en la dirección azimutal.



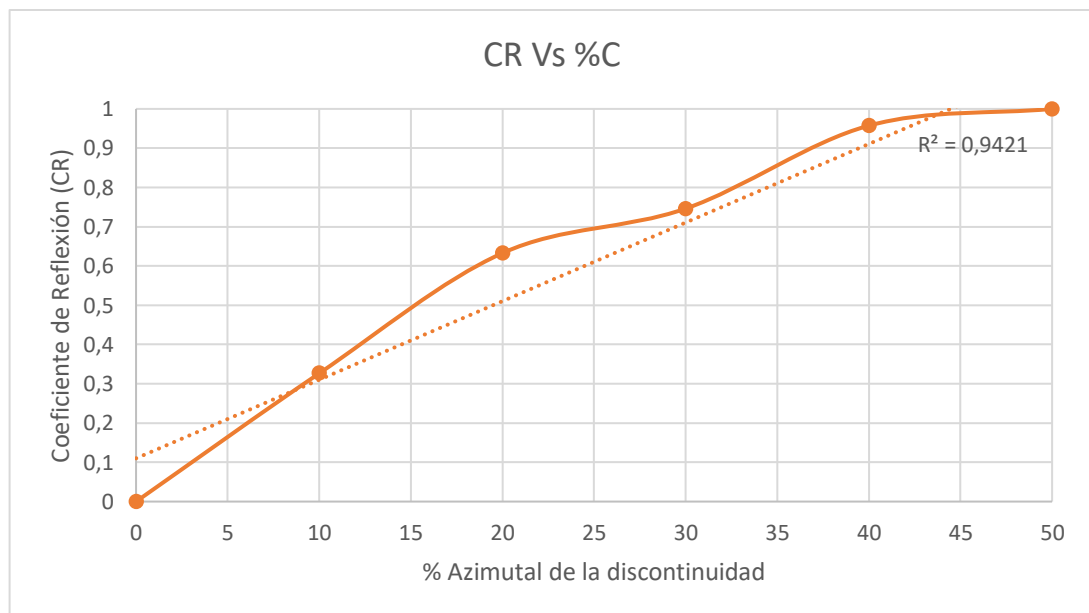
Como se observa de la figura 17 a la figura 21, a medida que se aumentó la amplitud de la discontinuidad en la dirección azimutal, aumentó la amplitud de la deformación direccional de la onda reflejada, entendiéndose que, a mayores valores de falla en esta dirección, la onda tiende a reflejarse con la misma amplitud que la onda

incidente. Esto se puede observar mejor determinando el coeficiente de reflexión para cada porcentaje de discontinuidad simulado, procedimiento para el cual, se realizó un código en Matlab que leyó los grupos de datos de una tabla de Excel y determinó la amplitud máxima entre 0 s y 5E-4 s, y entre 5E-4 s y 6E-4 s, para posteriormente dividir la amplitud máxima reflejada (Segundo grupo) en la amplitud máxima incidente (Primer grupo). Los valores obtenidos de este proceso se pueden observar en la tabla 7 y posteriormente graficados en la figura 22 con el fin de poder observar su tendencia.

Tabla 7. Valores del coeficiente de reflexión (CR) correspondientes a la variación de la magnitud en la dirección azimutal de la discontinuidad.

% Azimutal	CR
0	0
10	0,3266
20	0,6328
30	0,7461
40	0,9574
50	1

Figura 22. Coeficiente de reflexión contra porcentaje de la discontinuidad en la dirección azimutal.



De la figura 22 se encontró que el coeficiente de reflexión se comportó con una tendencia linealmente dependiente de la extensión circunferencial o azimutal de la discontinuidad presente en la tubería con una divergencia de esta tendencia en los valores de 20% y 40%, posiblemente ocasionado por problemas numéricos de la simulación, confirmado mediante la generación de una línea de tendencia y el cálculo del R^2 del que se obtuvo un valor de 0.9421, cercano a la linealidad de 1.

De esto se concluye que la recta trazada representa los puntos de variabilidad del coeficiente de reflexión para diferentes valores en la dirección azimutal, con lo cual se puede tener una idea del %C de la falla mediante un análisis por ondas guiadas determinando el CR y encontrando el punto de corte con la línea recta.

Finalmente, con una extensión de 180° de la muesca en la dirección circunferencial de la discontinuidad, que se traduce en una muesca que cubra la mitad de la tubería a lo largo de su eje azimutal, se produjo una reflexión completa de la onda guiada.

La validación del comportamiento de los resultados obtenidos se realizó comparando con la figura 16 del artículo de Demma²⁶ donde trabajaron con datos de laboratorio. Tanto para el caso del artículo como para el presente proyecto, el coeficiente de reflexión para diferentes valores en el eje azimutal aumenta de forma lineal, con diferencias en el valor del coeficiente máximo alcanzado al 50% de la muesca, lo que se asoció a la diferencia de diámetros trabajados (3" el artículo y 6" el proyecto) y de frecuencia simulada (55KHz el artículo y 36KHz el proyecto).

4.3. ESTUDIO EN LA DIRECCIÓN RADIAL

Para el estudio de la influencia de la dirección radial de una discontinuidad en el amortiguamiento de la onda, se trabajaron 6 diferentes valores de porcentaje de

²⁶ DEMMA A.; CAWLEY P.; LOWE M. and ROOSENBRAND A. The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes. J Acoust Soc AM 2003; 114:611–25.

extensión, según los valores que se observan en la tabla 8 donde se puede ver el porcentaje según la ecuación de la tabla 1 y la profundidad equivalente en metros y milímetros. Para este análisis se mantuvieron constantes los valores en la dirección axial y circunferencial de la discontinuidad en 25% (0.022m) y 20% (72°) respectivamente.

Tabla 8. Valores simulados correspondientes a la variación en la dirección radial.

RADIAL	Profundidad (m)	Profundidad (mm)
15%	0.001066	1.066
30%	0.002133	2.133
50%	0.003555	3.555
70%	0.004977	4.977
90%	0.006399	6.399
100%	0.00711	7.110

Cabe resaltar que este análisis se hizo hasta una profundidad total de la tubería, tratando de incluir los casos en los que los oleoductos presentan fugas del hidrocarburo que se transporta.

De la figura 23 a la figura 28 se puede observar el comportamiento de la deformación en el eje azimutal de la tubería, visto desde el nodo de estudio ubicado en la mitad entre el inicio de propagación de la onda y la discontinuidad, para una onda guiada torsional T(0,1) con una frecuencia de 36000 Hz y 5 ciclos en una tubería de 150 mm de diámetro (6") con espesor de 7.11 mm y 2 m de longitud.

Figura 23. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 15% en la dirección radial.

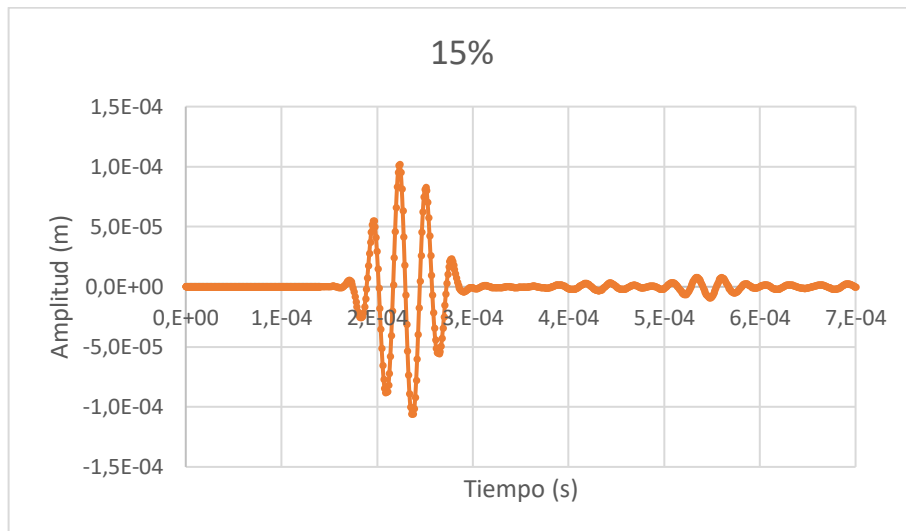


Figura 24. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 30% en la dirección radial.

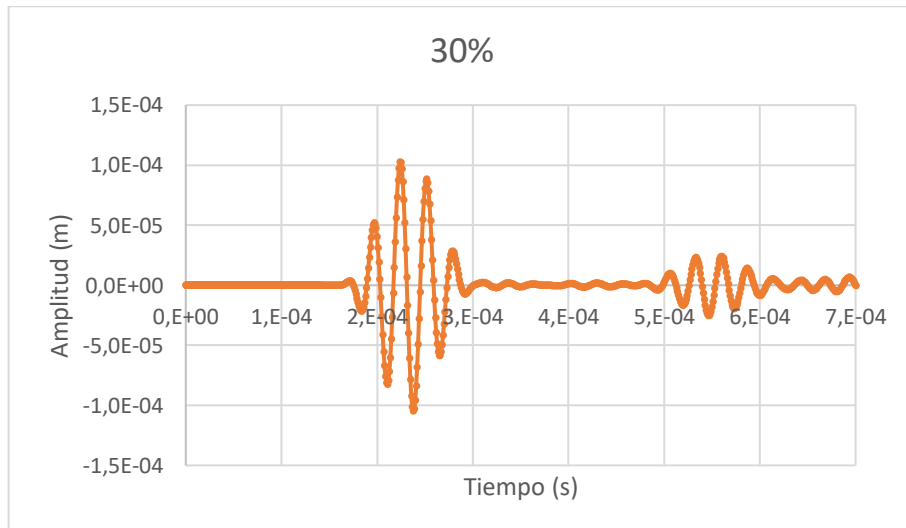


Figura 25. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 50% en la dirección radial.

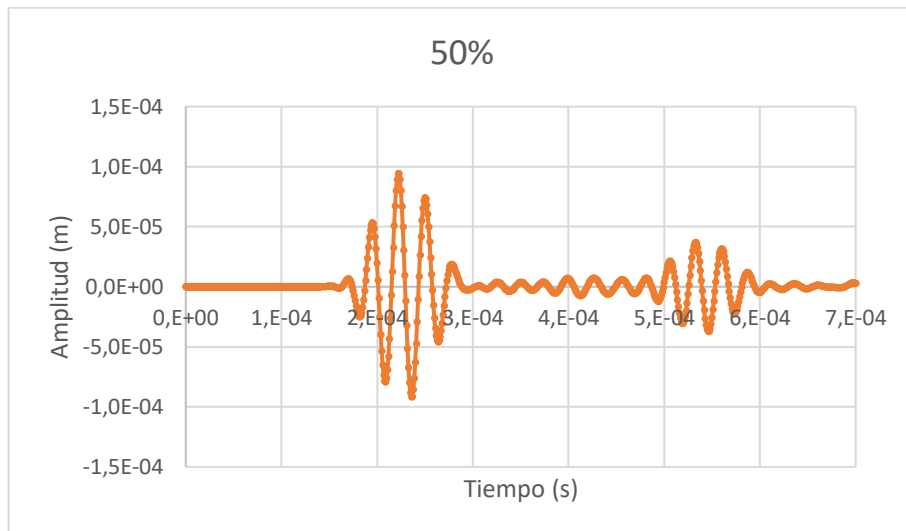


Figura 26. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 70% en la dirección radial.

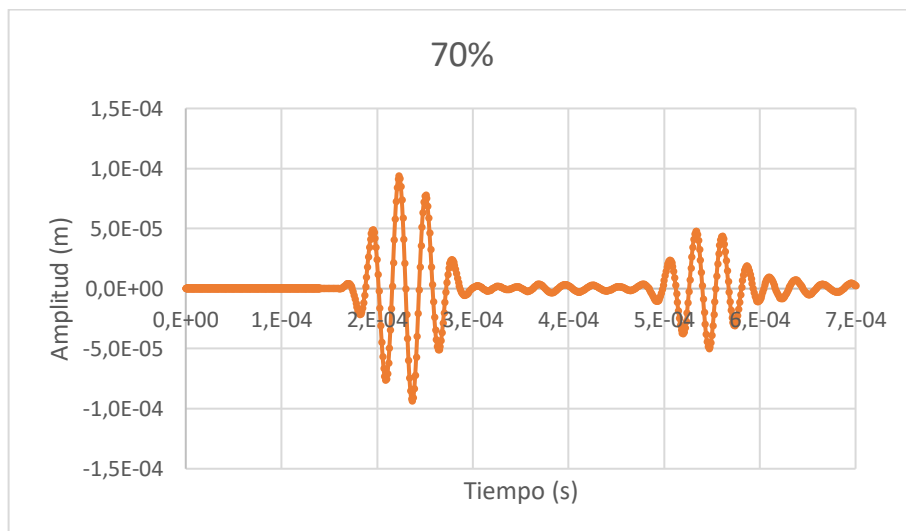


Figura 27. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 90% en la dirección radial.

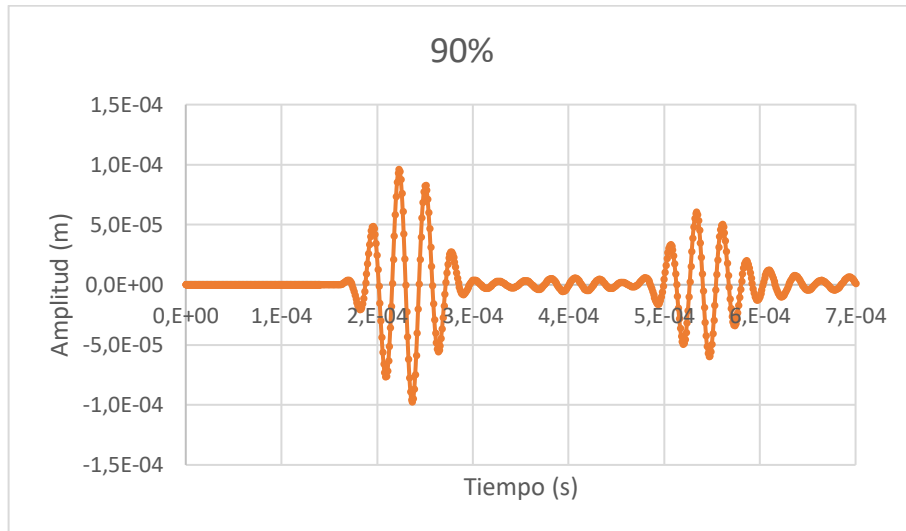
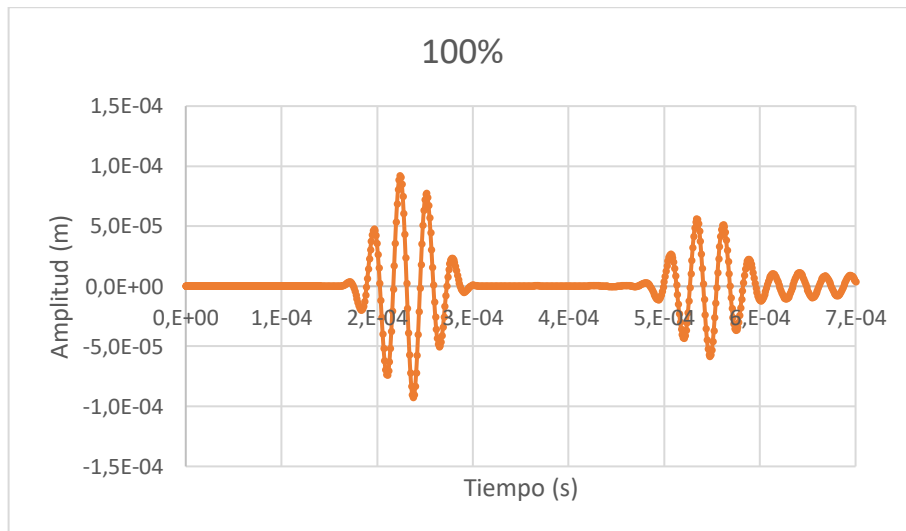


Figura 28. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 100% en la dirección radial.



Al igual que la variación en la dirección azimutal, en la variación de la dirección radial (espesor) de la muesca, tal y como se observa desde la figura 23 hasta la figura 28, al aumentar el porcentaje de profundidad de la discontinuidad, aumenta la amplitud de la deformación direccional en el eje azimutal de la onda reflejada, sin embargo, la onda reflejada no logra a tener la misma amplitud de la onda incidente para una

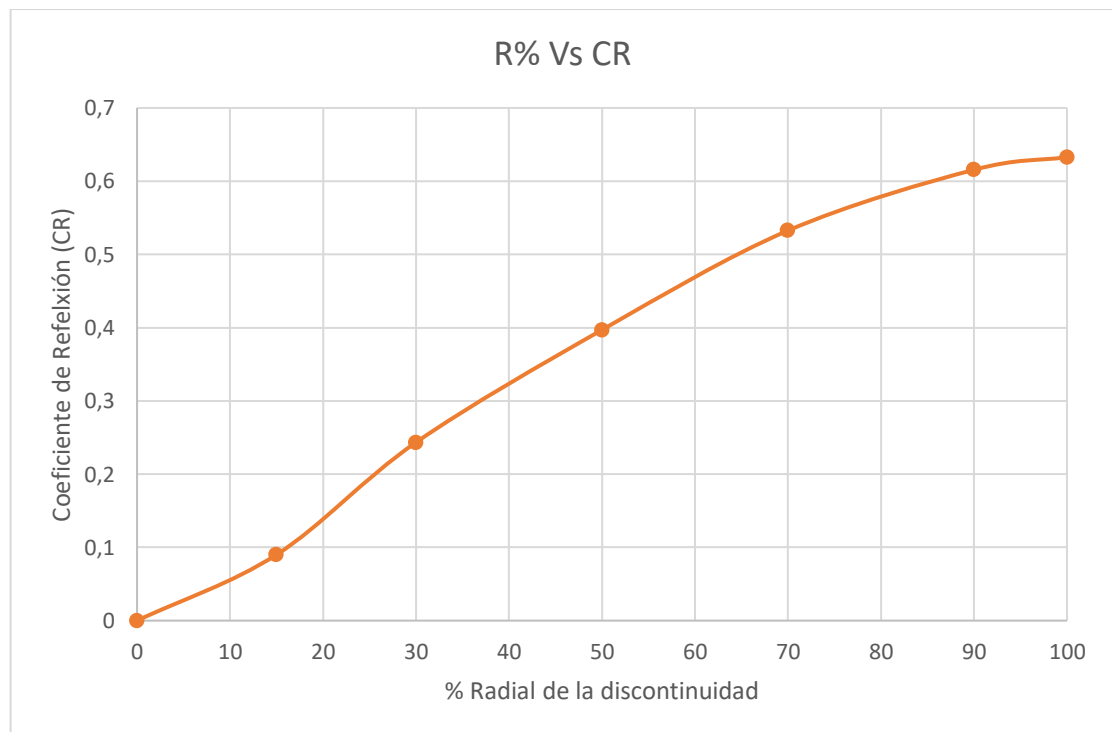
muesca del total del espesor de la tubería como si lo fue en el caso expuesto en la sección 4.2.

Se determinó el coeficiente de reflexión con el código de Matlab del anexo B para las variaciones en la dirección radial, obteniendo los resultados expuestos en la tabla 9 y graficados en la figura 29.

Tabla 9. Valores del coeficiente de reflexión (CR) correspondientes a la variación de la magnitud en la dirección radial de la discontinuidad.

% Radial	CR
0	0
15	0,0901
30	0,2434
50	0,397
70	0,5326
90	0,6156
100	0,6328

Figura 29. Coeficiente de reflexión contra porcentaje de la discontinuidad en la dirección radial.



Al graficar el coeficiente de reflexión contra los valores de la dirección radial de la discontinuidad, se encuentra que este coeficiente aumenta de forma lineal conforme aumenta la profundidad de la muesca, comenzando desde 0 hasta un coeficiente máximo de 0.6328 para la totalidad del espesor de la tubería.

Para futuras predicciones utilizando la gráfica obtenida y entrando con el coeficiente de reflexión, se encontró que para los casos donde la profundidad de la muesca en la tubería sea menor del 90%, se puede identificar fácilmente el valor correspondiente de espesor restante debido a la pendiente pronunciada de la gráfica, incluso para una remoción superficial del material con valores inferiores al 10% que se puede asociar a parches de corrosión externos. Sin embargo, para valores mayores al 90% es decir, cuando la discontinuidad está cerca de ocupar por completo el espesor de la tubería, la pendiente tiende a disminuirse, dificultando la diferenciación de un porcentaje de espesor en este rango crítico para la integridad estructural de la tubería. De esto se concluye que se dificulta determinar el espesor de la tubería cuando esta se encuentra propensa a fugas.

Para la validación de los datos se comparó con la figura 14 del artículo de Demma²⁷, donde se encontró que el coeficiente de reflexión se comporta con la misma tendencia que el simulado en este proyecto para diferentes valores de profundidad. Sin embargo, en el artículo el coeficiente logra llegar a un valor máximo de 1 cuando la profundidad es del 100% mientras que el obtenido en este proyecto fue un máximo de 0.6328. Esta diferencia en el coeficiente máximo se asocia a que se trabajaron diferentes diámetros de tubería, para nuestro caso de 6" y para el artículo de 24".

²⁷ DEMMA. Alessandro, et al. Op. cit.

4.4. ESTUDIO EN LA DIRECCIÓN AXIAL

Se simularon 8 diferentes valores de extensión de la discontinuidad en la dirección axial tabulados en la tabla 10 con su respectivo valor de extensión en metros y milímetros, manteniendo constantes los valores en la dirección azimutal y radial en los valores de 20% (72°) y de 50% (0.003555 m) respectivamente.

Tabla 10. Valores simulados correspondientes a la variación en la dirección axial.

Axial	Extensión (m)	Extensión (mm)
5%	0.00435	4.35
10%	0.0087	8.7
20%	0.0174	17.4
25%	0.02172	21.72
30%	0.0261	26.1
40%	0.0348	34.8
45%	0.0391	39.1
50%	0.0435	43.5

Figura 30. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 10% en la dirección Axial.

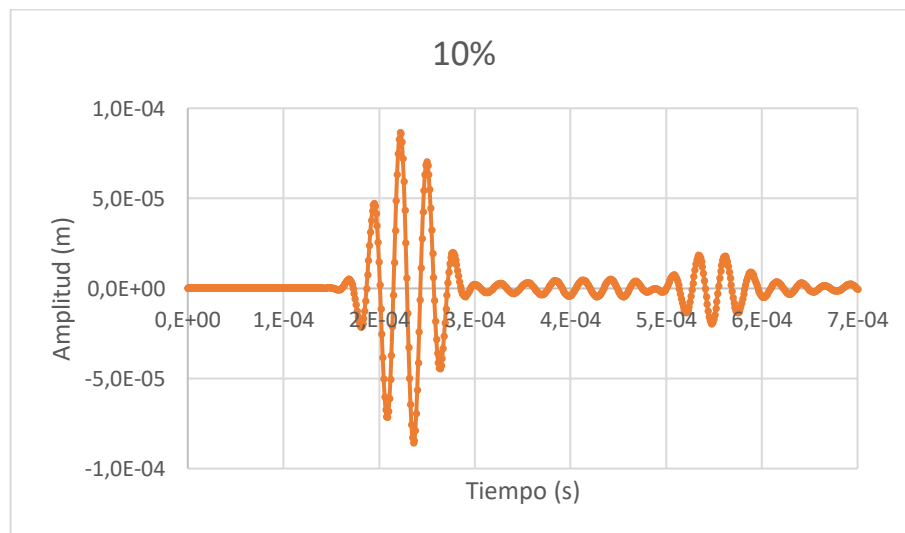


Figura 31. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 25% en la dirección Axial.

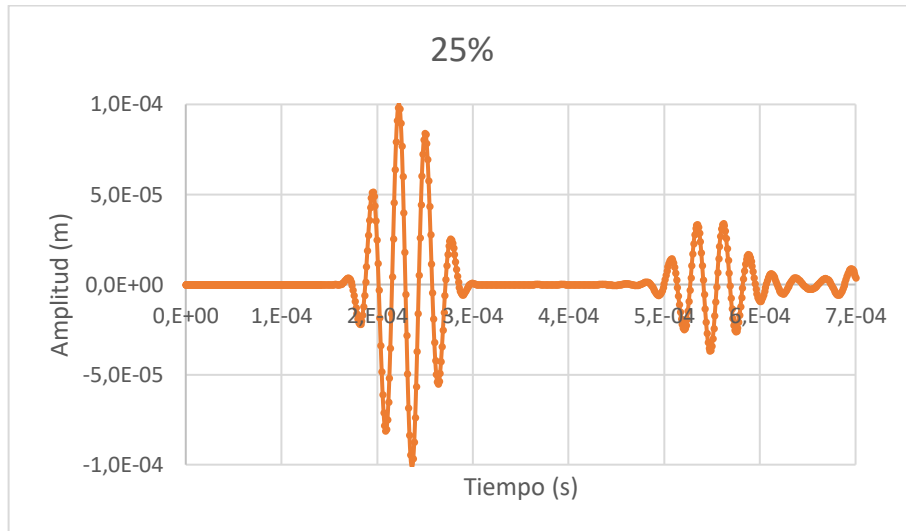


Figura 32. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 40% en la dirección Axial.

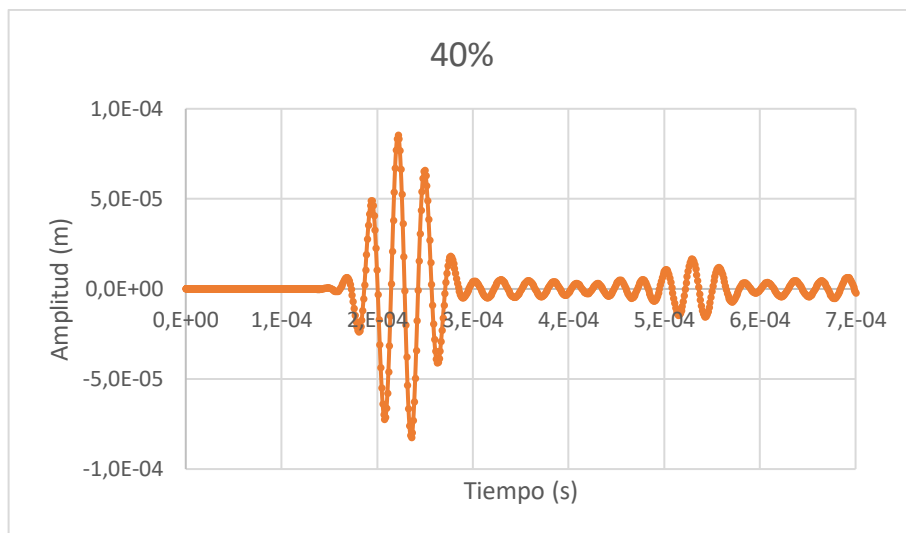
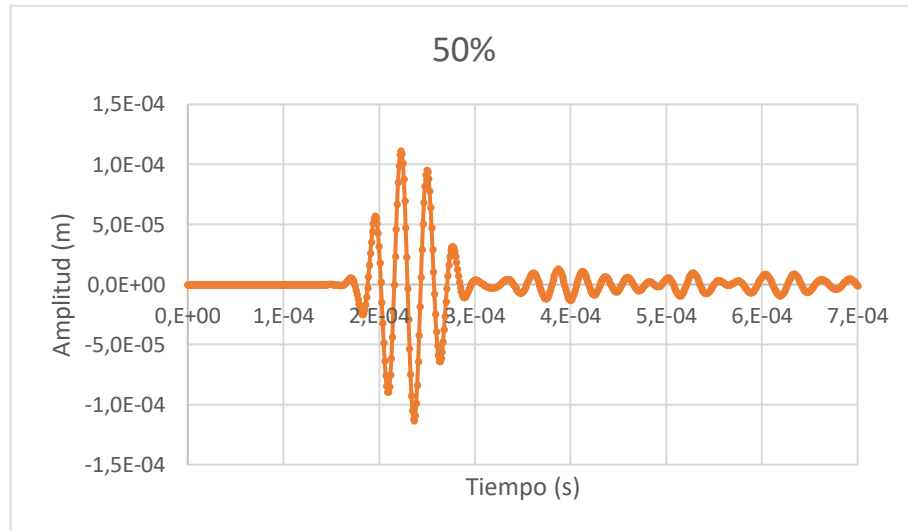


Figura 33. Resultados de la deformación direccional para una tubería con una discontinuidad con el 50% en la dirección Axial.



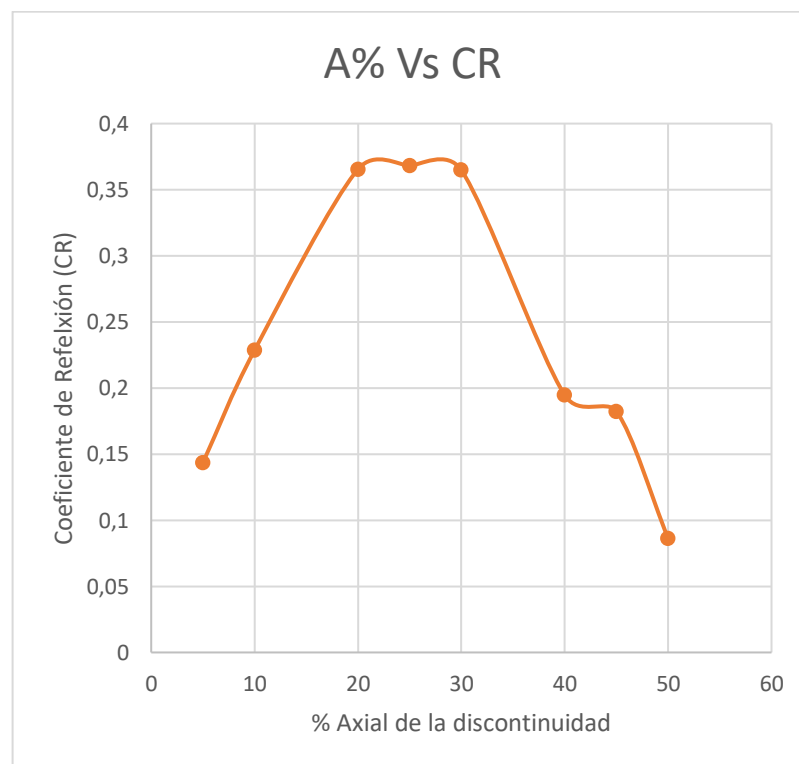
De la figura 30 a la figura 33 se puede observar el comportamiento de la deformación direccional en el eje axial de la tubería que se obtuvo de la simulación, y visto desde el nodo de estudio ubicado en la mitad entre el inicio de propagación de la onda y la discontinuidad, para una onda guiada torsional $T(0,1)$ con una frecuencia de 36000 Hz y 5 ciclos en una tubería de 150 mm de diámetro (6") con espesor de 7.11 mm y 2 m de longitud. Las simulaciones no se recomiendan realizar con la totalidad del espesor debido a que cuando la discontinuidad atraviesa por completo la tubería, la variación en la dirección axial no genera un cambio representativo en el amortiguamiento de la onda.

Se determinó el coeficiente de reflexión con el código de Matlab del anexo B para las variaciones en la dirección axial de la discontinuidad, obteniendo los resultados expuestos en la tabla 11 y graficados en la figura 34 donde se observa mejor el amortiguamiento de la onda para cada caso.

Tabla 11. Valores del coeficiente de reflexión (CR) correspondientes a la variación de la magnitud en la dirección axial de la discontinuidad.

%	CR
5	0,1435
10	0,2286
20	0,3655
25	0,3682
30	0,3648
40	0,1946
45	0,1823
50	0,0863

Figura 34. Coeficiente de reflexión contra porcentaje de la discontinuidad en la dirección axial.



El comportamiento coeficiente de reflexión para diferentes valores de extensión axial de la discontinuidad es de forma cíclica, sin embargo, en el presente proyecto

se enfocó únicamente en la mitad del dominio con el fin de comparar con el artículo de Demma²⁸ en el que trabajan datos experimentales para este mismo rango de valores.

De la gráfica obtenida (figura 34) se encontró un valor máximo del coeficiente de reflexión correspondiente a un cuarto de la longitud de onda (25% de la extensión axial) y un valor mínimo para la mitad de la longitud de onda (50% de la extensión axial). También, se encontró un valor de coeficiente de reflexión menor a 0.15 para un 5% de la extensión axial, por lo que se asocia que los valores bajos de CR corresponden a bajos %A, de esto se intuye que las ondas guiadas de baja frecuencia son menos sensibles a las grietas (bajas extensiones axiales) que a los parches de corrosión, en donde a mayor CR, mayor amortiguamiento de la onda guiada de baja frecuencia, entendiéndose que, la onda incidente disminuye su amplitud a medida que la de la onda reflejada aumenta.

Comparando el comportamiento de los datos obtenidos de las simulaciones trabajadas en el proyecto con el comportamiento de los datos experimentales del artículo mencionado, se comprobó que el coeficiente de reflexión tiene un valor máximo en el 25% de la extensión en la dirección axial y un valor mínimo al 50% de esta misma dirección, representando la tendencia evidenciada en la figura 34 de la presente investigación, por lo que se concluye que se obtuvieron resultados favorables de las simulaciones realizadas y asociando una variación en los valores a la diferencia de diámetros trabajados (6" en el proyecto y 3" en el artículo) y la diferencia de la frecuencia de T(0.1) (36KHz en el proyecto y 55 KHz en el artículo).

²⁸ DEMMA. Alessandro, et al. Op. cit.

5. CONCLUSIONES

- Se validó que el modelo matemático expuesto, describe el comportamiento de una onda guiada torsional de baja frecuencia $T(0,1)$ que se propaga a lo largo de una tubería, obteniendo un porcentaje de desviación de 0.7919% con respecto al valor teórico de la velocidad transversal del ultrasonido que se propaga por el acero estructural.
- Del análisis de la data obtenida del coeficiente de reflexión para diferentes valores de extensión en las direcciones azimutal, radial y axial, en el dominio de 0 a 50%, se encontró que la dirección azimutal tiene una mayor capacidad de amortiguamiento de la onda guiada de baja frecuencia, alcanzando un CR máximo de 1 en el 50% de magnitud en esta dirección, seguido de la dirección radial con un CR máximo de 0.397 en el 50% y finalizando por la dirección axial con un CR máximo de 0.3682 en el 25% de extensión de la discontinuidad.
- Se verificó que la tendencia del comportamiento del coeficiente de reflexión para diferentes valores de magnitud de la discontinuidad en las direcciones axial, radial y circunferencial, se comportó de la misma forma que el artículo de referencia donde para las direcciones azimutal y radial hay una tendencia creciente lineal del coeficiente de reflexión que es directamente proporcional al aumento de la magnitud de la discontinuidad en las respectivas direcciones, mientras que para la variación en la dirección axial, el coeficiente de reflexión se comportó con la misma tendencia de concavidad hacia abajo con un valor mínimo para el 50% de la magnitud y un valor máximo para el 25%.

6. RECOMENDACIONES

- Para futuros proyectos de simulación de ondas guiadas de baja frecuencia, se recomienda trabajar con una malla más fina que la trabajada en la presente investigación, debido a las limitantes en la capacidad de cómputo, con el fin de buscar resultados aún más precisos en comparación con la data experimental como en el caso del análisis de la dirección circunferencial buscando linealizar aún más los resultados.
- Con el fin de realizar un proceso de simulación cada vez más cercano a la realidad, se recomienda a futuros investigadores invertir aún más tiempo en el diseño de la discontinuidad de la tubería, apuntando al desarrollo de una muesca escalonada, desviándose de la idealización rectangular planteada en este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

ANH (Agencia nacional de hidrocarburos). La Cadena del Sector Hidrocarburos [En línea]. Bogotá, 2018. [Consultado 4 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.anh.gov.co/portalregionalizacion/Paginas/LA-CADENA-DEL-SECTOR-HIDROCARBUROS.aspx>

ASME (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos). PIPELINE TRANSPORTATION SYSTEMS FOR LIQUID HYDROCARBONS AND OTHER LIQUIDS. ASME B31.4 [En línea]. New York, 1998. 56p.

ANSYS. "Software" [En línea]. 2020. [Consultado 2 enero 2021]. Disponible en: <https://www.ansys.com/>

BRUCE, N. et al. 'La corrosión: la lucha más extensa', En: *Oilfield review*. Texas, 2016. Vol. 28, No. 2. pp. 36-51.

BURBANO MIRANDA, Napoleón Aquiles. Ensayos no destructivos con el método de radiografía industrial en la inspección de soldaduras de tuberías de acero al carbono en oleoductos. [En línea]. Quito.: Universidad tecnológica equinoccial, 2011. [Consultado 19 diciembre 2020]. Disponible en: http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/5994/1/44721_1.pdf

CENIT. "Descripción de la red" [En línea]. Bogotá, 2020 [Consultado 12 diciembre 2020]. Disponible en: <https://cenit-transporte.com/oleoductos/>

DEMMA. Alessandro, et al. The reflection of guided waves from notches in pipes: a guide for interpreting corrosion measurements. NDT&E International. 2004, nro 37, pp 167 – 180

DEMMA A.; CAWLEY P.; LOWE M. and ROOSENBRAND A. The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes. J Acoust Soc AM 2003; 114:611–25.

L. ROSE, Joseph. Ultrasonic guided waves in solid media. Pennsylvania: Cambridge University Press. p. 238

MAPFRE Global Risks. Oleoductos y gasoductos, las venas de la economía [En línea]. 2018. [Consultado 10 diciembre 2020]. Disponible en: www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/energia.

NASEDKINA, A.; ALEXIEV, A. and MALACHOWSKI, J. Numerical Simulation of Ultrasonic Torsional Guided Wave Propagation for Pipes with Defects [En línea]. Springer International Publishing Switzerland, 2016. [Consultado 20 diciembre 2020]. Capítulo 33. 1-14pp. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-26324-3_33

OLEODUCTO BICENTENARIO. El oleoducto [En línea]. Bogotá D.C., 2020. [Consultado 14 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.bicentenario.com.co/index.php/quienes-somos-2/el-oleoducto>

ORTIZ ALCALÁ Lluís. Comparison between ansys and abaqus using ultrasonic guided waves. Montreal. ETS Ecole de technologie supérieur, 2014, pp 24.

PACHECO PACHECO, Manuel. Diseño, construcción y mantenimiento de ductos terrestres para transporte y recolección de hidrocarburos. Mexico: Comité de normalización de petróleos mexicanos y organismos subsidiarios, 2002. pp. 119.

QUIROGA MÉNDEZ, Jabid. Stress monitoring of cylindrical structures using guided waves. [En línea]. Tesis Doctoral. Universidad politécnica de Catalunya, 2018. [Consultado 9 diciembre 2020]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=257495>

RUIZ GIRALDO Andrés Fernando y TASCÓN MOSQUERA Diego Javier. Medición de propiedades elásticas de materiales isotrópicos por ultrasonido. Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Santiago de Cali. Universidad Autónoma de Occidente. 2013, pp 21

RUIZ MARTÍNEZ, Alberto. Monitoreo de la integridad estructural en tuberías usadas en la generación de energía mediante tomografía de ondas guiada. [En línea]. Proyecto estratégico. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2018. [Consultado 2 diciembre 2020]. Disponible en: www.cemiegeo.org/index.php/proyectos/desarrollos-tecnologicos-para-explotacion/p18/9-linea-de-investigacion/proyecto/31-p18.

RUMICHE, Francisco A. J. y INDACOCHEA, Ernesto. *Estudios de Caso de Fallas y Accidentes en Gasoductos y Oleoductos*. [En línea]. Chicago.: Universidad de Illinois, 2015. [Consultado 18 diciembre 2020]. Disponible en: http://materiales.untrefvirtual.edu.ar/documentos_extras/20385_Tecnologia_de_los_materiales/Estudiosdecasodefallasyacidentes.pdf

SARMIENTO ELJADUE, Nataly, et al. VERDAD Y AFECTACIONES a la infraestructura petrolera en Colombia en el marco del conflicto armado. [En línea]. Bogotá, 2020. [Consultado 12 diciembre 2020]. Disponible en: <https://codhes.files.wordpress.com/2020/08/codhesfinal.pdf>

ZHENG Ming-fang, et al. Modeling three-dimensional ultrasonic guided wave propagation and scattering in circular cylindrical structures using finite element approach. Physics Procedia. 2011. No 22, pp 112 – 118

ZHOU, Zhaoming; WAN, Fu; LI, Siyu; LIAN, Zhanghua and SHI, Taihe. “Numerical Simulation of Experimental Crack Detection in Pipes Using Low-frequency Torsional Guided Waves”. [En línea]. China, 2012. [Consultado 9 diciembre 2020]. Disponible en: <https://trid.trb.org/view/1275108>

ANEXOS

ANEXO A. Código en Matlab para determinar la distancia en el eje “x”

```
clear, clc;

data1 = xlsread("Ondas para distancia","Hoja1", "B5:C1768");
data2 = xlsread("Ondas para distancia","Hoja1", "E5:F1768");

[Y1,I1] = max(abs( data1(:,2) ));
X1=data1(I1,1);

[Y2,I2] = max(abs( data2(:,2) ));
X2=data1(I2,1);

delta_X = abs(X2-X1)
```

ANEXO B. Código en Matlab para determinar la distancia en el eje “y”

```
clear, clc;

data = xlsread("Ondas para distancia","A%", "Z4:AA1967");

int1_i=0;
int1_f=5E-4;
|
int2_i=int1_f;
int2_f=6E-4;

%Hallar el mas cercano
[minimo,position1]=min(abs(data(:,1)-int1_i));
[minimo,position2]=min(abs(data(:,1)-int1_f));
[minimo,position3]=min(abs(data(:,1)-int2_i));
[minimo,position4]=min(abs(data(:,1)-int2_f));

Ymax1 = max(abs( data(position1:position2,2) ));
Ymax2 = max(abs( data(position3:position4,2) ));

delta_Y=abs(Ymax1-Ymax2)

cociente_y=abs(Ymax2/Ymax1)
```