

ANÁLISIS NUMÉRICO ANALÍTICO DE LA INCIDENCIA DEL TRANSDUCTOR EN LA  
EXCITACIÓN DE LAS ONDAS GUIADAS SOBRE TUBERÍA CILÍNDRICA.

ANDRÉS FELIPE CORREDOR ÁLVAREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECAICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2022

ANÁLISIS NUMÉRICO ANALÍTICO DE LA INCIDENCIA DEL TRANSDUCTOR EN LA  
EXCITACIÓN DE LAS ONDAS GUIADAS SOBRE TUBERÍA CILÍNDRICA.

ANDRÉS FELIPE CORREDOR ÁLVAREZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ

Dr. En Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2022

## DEDICATORIA

A Dios, agradezco profundamente, por guiarme en el sendero correcto de la vida y por haberme dado fuerza y valor para culminar esta etapa de mi vida

A el esfuerzo, que por durante años y generaciones han sido doctrina de un buen ciudadano, principal esencia de mis padres.

A José Orlando Corredor Hernández, mi padre, que con su esfuerzo y trabajo nos ha enseñado el valor del trabajo.

A Gloria Lucia Álvarez Acosta, mi madre, que con su nobleza y espiritualidad nos ha infundados valores primordiales para desarrollarme como un buen ciudadano.

A Ana Lucia Corredor Álvarez y Silvia Juliana Corredor Álvarez, mis hermanas, que, con su compañía y apoyo incondicional, me han hecho posible recorrer este camino.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad industrial de Santander, a la escuela de ingeniería mecánica, por las oportunidades que me han entregado durante la carrera y a las puertas que se me abren a partir del término de este paso que culmino.

Agradezco la confianza y el apoyo brindado por el Ingeniero Jabid Quiroga Méndez, director de mi proyecto de grado, al permitirme ser parte y aportar con un pequeño grano de arena en la investigación de las ondas guiadas.

Agradezco a mis padres por su esfuerzo y dedicación en apóyame en mi formación académica.

Agradezco a el profesor Oscar Bohórquez por su colaboración y permanente guía en los diferentes retos que me he propuesto.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	16
1. OBJETIVOS .....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
2. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1 MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL (SHM).....	21
2.2 EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA (NDE).....	23
2.2.1 Técnicas acústicas de NDE.....	24
2.3 ONDAS GUIADAS .....	26
2.3.1 Ondas guiadas en cilindros huecos o tuberías.....	30
2.4 DISPERSIÓN DE ONDAS GUIADAS .....	34
2.5 MÉTODO DE EXPANSIÓN EN MODO NORMAL (NME) .....	36
2.6 FOCALIZACIÓN DE ONDA.....	37
2.7 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	39
3. METODOLOGÍA.....	41
3.1 GEOMETRÍA DE TUBERÍA Y MATERIAL. ....	41
3.2 TIPO DE ELEMENTOS, RESOLUCIÓN ESPACIAL Y DIMENSIONES DE MALLA. ....	42
3.3 SEÑAL DE EXCITACIÓN, RESOLUCIÓN TEMPORAL Y TIEMPOS DE SIMULACIÓN. ....	45
3.4 ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE CONVERGENCIA Y SUPERCOMPUTACIÓN.....	49
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	51
4.1 VERIFICACIONES EXPERIMENTALES.....	51
4.2 COMPARACIÓN DE ENTRE MODO AXIAL Y NORMAL DE EXCITACIÓN.....	58
4.3 EVALUACIÓN DE DISTANCIAS LONGITUDINALES DE TRANSDUCTORES.....	62
4.4 EVALUACIÓN DE DISTANCIA ANGULAR DE LOS TRANSDUCTORES.....	64

4.4.1 Carga circunferencial de 360° .....	66
4.4.2 Carga circunferencial de 180° .....	67
4.4.3 Carga circunferencial de 90° .....	69
4.4.4 Carga circunferencial de 45° .....	71
4.5 EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE FOCALIZACIÓN. ....	73
5. CONCLUSIONES.....	78
6. RECOMENDACIONES .....	79
BIBLIOGRAFÍA .....	80
ANEXOS .....	84

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Dos posibles actitudes del experimentador que definen (a) pasivo y (b) activo Monitoreo. ....	23
Figura 2 .Sistema de coordenadas cilíndricas para el cilindro hueco.....	32
Figura 3. Croquis del modelo de vibraciones periféricas.....	33
Figura 4 .(a) Diagrama de dispersión de velocidad de fase. (b) Diagrama de dispersión de velocidad de grupo. ....	34
Figura 5 .(a) Representación gráfica de la curva de dispersión y ancho de banda de excitación, (b) Secuencia de onda dispersiva para distancias de propagación de 0,3 m a 1 m. ....	35
Figura 6. Interfaz de Desing Modeler. ....	42
Figura 7. Nodos de excitación.....	43
Figura 8. Divisiones axiales de malla. ....	44
Figura 9. Señales de: (a)Ráfaga, (b)Hanning.....	45
Figura 10. Señal de ventaneo de ráfaga Hanning.....	47
Figura 11. Tiempo de simulación. ....	48
Figura 12. Convergencia de malla.....	49
Figura 13. Herramienta TeleTest montada en tubería de acero cédula 30 de 16", las designaciones de los cuadrantes de 90°, se muestran como referencia.....	52
Figura 14. Configuración experimental para la medición del perfil angular. El Teletest® Se empleó una matriz de transductores ultrasónicos para generar perfiles angulares para torsión, se utilizó un transductor acústico electromagnético (EMAT) como receptor. ....	53
Figura 15. Perfiles angulares experimentales normalizados en comparación con normalizados perfiles angulares teóricos a 40kHz a z = 162" y 216". Sólido azul líneas: perfiles angulares teóricos; líneas discontinuas rojas: perfiles angulares experimentales. ....	54

Figura 16. Amplitud vs tiempo, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo. ....	55
Figura 17. Método de figura polar. ....	55
Figura 18. Perfil angular a 162 in (4.1148 m). ....	56
Figura 19. Comparación de perfiles angulares experimentales (rojo), perfil teórico (azul) y perfil de simulación FEM (verde) a 162 in (4.1148 m). ....	56
Figura 20. Perfiles angulares a 216 in (5.486 m). ....	57
Figura 21. Comparación de perfiles angulares experimentales (rojo), perfil teórico (azul) y perfil de simulación FEM (verde) a 216 in (5.486 m). ....	57
Figura 22. Métodos de excitación, (a) normal y (b) axial. ....	58
Figura 23. Amplitud vs tiempo, (a) normal, (b) axial. ....	59
Figura 24. Amplitud vs tiempo, (a) comparación de velocidad de grupo, (b) Detalle de comparación de velocidad de grupo. ....	59
Figura 25. Cálculo de error porcentual. ....	62
Figura 26. Variación de la longitud sentido longitudinal. ....	62
Figura 27. Amplitud vs tiempo, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo. ....	63
Figura 28. Amplitud vs tiempo, comparación de distancia longitudinal. ....	63
Figura 29. Curvas de dispersión para tubería de acero estructural de 6 pulgadas cédula 40 mostrando la relación entre la velocidad de grupo y la frecuencia para diferentes modos. ....	65
Figura 30. Variación angular de la carga. ....	65
Figura 31. Amplitud normalizada de los órdenes circunferenciales para una carga de 360°. ....	66
Figura 32. Amplitud vs tiempo de 18 nodos, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo. ....	67
Figura 33. Figura 50. Amplitud normalizada de los órdenes circunferenciales para una carga de 360°. ....	68
Figura 34. Amplitud vs tiempo de 18 nodos, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo. ....	68
Figura 35. Amplitud vs tiempo de nodos en posición, (a) 0°, (b) 90°. ....	69
Figura 36. Amplitud vs tiempo de nodos en posición, (a) 180°, (b) 270°. ....	69

Figura 37. Amplitud normalizada de los órdenes circunferenciales para una carga de 360° .....	70
Figura 38. Amplitud vs tiempo de 18 nodos, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo. ....	70
Figura 39. Amplitud vs tiempo de nodos en posición, (a) 0°, (b) 90°.....	71
Figura 40. Amplitud vs tiempo de nodos en posición, (a) 180°, (b) 270°.....	71
Figura 41. Amplitud normalizada de los órdenes circunferenciales para una carga de 360° .....	72
Figura 42. Amplitud vs tiempo de 18 nodos, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo. ....	72
Figura 43. Amplitud vs tiempo de nodos en posición, (a) 0°, (b) 90°.....	73
Figura 44. Amplitud vs tiempo de nodos en posición, (a) 180°, (b) 270°.....	73
Figura 45. Amplitud vs tiempo de 18 nodos, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo. ....	74
Figura 46. Perfil angular. ....	74
Figura 47. Construcción del perfil angular en coordenadas cartesianas. ....	75
Figura 48. Desfases de los transductores. ....	76
Figura 49. Amplitud vs tiempo de 12 nodos, señales con desfase, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo.....	77
Figura 50. Perfil angular multicanal con desfase.....	77
Figura 51. Menú de sistemas de análisis. ....	84
Figura 52. Menú de sistema transitorio estructural.....	84
Figura 53. Datos del material. ....	85
Figura 54. Interfaz de Design Modeler. ....	86
Figura 55. Interfaz de model.....	87
Figura 56. Particiones de malla. ....	88
Figura 57. Captura de nodos para excitación.....	89
Figura 58. Ajustes de análisis.....	89
Figura 59. Orientación de nodos. ....	90
Figura 60. Introducción de carga en el tiempo. ....	90

Figura 61. Área soporte, condiciones de contorno. ....	91
Figura 62. Guardar matriz de malla. ....	92
Figura 63. Código de lanzamiento de ANSYS en el HPC. ....	93
Figura 64. Descargar solución del HPC. ....	93
Figura 65. Leer solución del resultado en el computador local. ....	94
Figura 66. Lectura de resultados de desplazamiento. ....	94
Figura 67. Código en Matlab. ....	95

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Fallas en la cadena de suministro atribuidas a voladuras contra la Red Colombiana de Oleoductos (2009 a 2018).....	20
Cuadro 2. Comparación de técnicas acústicas. ....	25
Cuadro 3 .Red de transporte de hidrocarburos del sistema colombiano tabla de la empresa Cenit. ....	41
Cuadro 4 .Datos de tuberías de 6” sch 40 y 16” sch 30. ....	42

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Procedimiento para correr un programa ANSYS en HPC guane.....	84
Anexo B. Código Matlab para graficar los modos excitados variando carga circunferencial. ....	96

## **GLOSARIO**

FEM: Metodo de elementos finitos o finite element method.

NDE: Evaluación no destructiva o non-destructive evaluación.

NME: método de expansión en modo normal o normal mode expansion method.

SHM: Monitoreo de salud estructural o Structural Health Monitoring.

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS NUMÉRICO ANALÍTICO DE LA INCIDENCIA DEL TRANSDUCTOR EN LA EXCITACIÓN DE LAS ONDAS GUIADAS SOBRE TUBERÍA CILÍNDRICA\*.

**AUTOR:** ANDRÉS FELIPE CORREDOR ÁLVAREZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Ondas guiadas, FEM, SHM, PDE, Método expansivo normal.

### DESCRIPCIÓN:

Esta tesis trata del potencial del uso y las motivaciones que presentan la comunidad científica colombiana e internacional para investigar e implementación de las ondas guiadas en el territorio, evalúa la incidencia del área que ocupan los transductores en un método de excitación normal expansiva mediante simulaciones de FEM, y realiza una verificación del método contrastando resultados de laboratorio y de análisis teórico.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Programa académico de pregrado. Director: Jaid Eduardo Quiroga Méndez. Doctor en Ingeniería Civil

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYTICAL NUMERICAL ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE TRANSLATOR ON THE EXCITATION OF GUIDED WAVES ON CYLINDRICAL PIPES-LINES\*.

**AUTHOR:** ANDRÉS FELIPE CORREDOR ÁLVAREZ\*\*

**KEY WORDS:** Guided waves, FEM, SHM, PDE, Normal expansive method.

### DESCRIPTION:

This thesis deals with the potential use and the motivations presented by the Colombian and international scientific community to investigate and implement guided waves in the territory, it evaluates the incidence of the area occupied by the translators in an expansive normal excitation method through FEM simulations, and verifies the method by contrasting results with laboratory and theoretical analysis results.

---

\* Project of grade

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Programa académico de pregrado. Director: Jabid Eduardo Quiroga Méndez. Doctor en Ingeniería Civil

## INTRODUCCIÓN

El valor estratégico y operacional de tuberías presentes en los intercambiadores de calor, líneas de servicios industriales y sistema de transporte de hidrocarburos, se basa, en parte, en la confiabilidad de la operación del ducto. Los daños debidos a interferencias externas, consecuencias operacionales y ambientales comprometen la operación segura de la infraestructura debido a que estos tipos de daños pueden ocasionar discontinuidades y malformaciones, produciendo escapes del fluido transportado, disminuciones de la vida útil y debilidad estructural. En la actualidad existen dos métodos de inspección populares no destructiva que tienen, un rango alto de limitaciones.

La técnica de ultrasonido que se ve limitada por recubrimientos, empotramientos, tuberías embebidas y geometrías de difícil acceso. El otro método, es la técnica de pipeline pigging, la cual requiere la parada costosa de operaciones de la tubería, por lo tanto, se requiere desarrollar un método confiable para la detección de condiciones anormales de una manera localizada, efectiva y rápida, las ondas guiadas presentan una gran perceptiva en las soluciones de detección cumpliendo un papel complementario a las otras técnicas.

En los últimos años, se ha desarrollado investigaciones en el estudio de la propagación de ondas guiadas a través de tuberías, con diferentes modos de excitaciones y frecuencias, la apropiación de conocimiento en las técnicas no destructivas en tuberías como ondas guiadas ha llamado la atención de la comunidad investigativa por su gran potencial en la inspección de grandes longitudes de manera fácil y efectiva, sin retirar recubrimientos costosos, llegando a lugares de difícil acceso y sin tener la necesidad de hacer una parada de operaciones.

La investigación y la comprensión de los diferentes factores que afectan a la propagación de las ondas guiadas en tuberías, ayuda a la generación de una base general de

conocimiento para proponer una rama investigativa que use las ondas guiadas como método confiable de inspección.

En esta tesis de grado, se propone un método radial normal de excitación de las ondas guiadas en tubería y se analiza la influencia de los transductores en la generación y propagación de las ondas guiadas, evaluando el área de los transductores sobre la superficie de la tubería, mediante el análisis de elementos finitos con la ayuda del software de simulación ANSYS, contribuyendo con la investigación, de un método adecuado de generación de ondas guiadas confiables, precisas y con gran autonomía, para que pueda ser aplicada a futuro en la industria nacional e internacional.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un algoritmo que describa la distribución de la variación de la energía en diagramas polares, cuando las ondas guiadas se propagan en la tubería de esta forma contribuyendo con la construcción, aplicación, la investigación y desarrollo de conocimiento de las ondas guiadas en la región latinoamericana.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Realizar un análisis numérico en ANSYS que corresponda a varias configuraciones de excitación de ondas guiadas en la tubería, y a partir de los resultados en cuanto a la distribución de energía en a cada sección transversal del tubo a ciertas distancias de la excitación.

Producir un algoritmo que, a partir de la configuración de excitación, generen diagramas polares que permitan observar la distribución de la energía en función de la distancia de propagación de la onda.

Validar el algoritmo propuesto en Matlab y la simulación en ANSYS a través de los datos reportados en la literatura científica.

## 2. MARCO TEÓRICO

Con una geografía altamente accidentada como la colombiana, es pertinente contar con una infraestructura robusta y confiable para el transporte de hidrocarburos, debido a que los campos de producción, puertos de exportación, centros de refinación y estaciones de bombeo se encuentran apartadas entre sí, y conectadas mediante líneas de tuberías, divididas por tramos que oscilan entre los 12 a 18 metros de longitud, dependiendo de las condiciones geográficas. Las cuales van ensambladas mediante soldadura especial, para conformar líneas de conexión, que dependiendo de su uso serán nombradas como oleoductos, poliductos, gasoductos y líneas de flujo. Los oleoductos se denomina a las tuberías que transportan crudo, las dimensiones de sus tubos varían entre 8 y 36 pulgadas de diámetro, los poliductos transportan fluidos refinados como gasolina, diésel y productos blancos, las dimensiones de sus tubos varían entre 6 y 12 pulgadas de diámetro, los gaseoductos transportan gas, las dimensiones de sus tubos varían entre 30 y 36 pulgadas de diámetro, las líneas de flujo transportan gas, crudo y agua de formación desde los pozos hasta los campos y entre sus propias instalaciones, las dimensiones de sus tubos varían entre 6 o menos pulgadas de diámetro, información basada en el sitio web de la ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO Y GAS <sup>1</sup>

Debido a eventos como remoción de masas, hundimiento de suelos, voladuras, ruptura de válvulas clandestinas y mantenimiento preventivo es pertinente la interrupción del flujo de hidrocarburo para realizar la intervención necesario al ducto con el fin de evitar el derrame de hidrocarburo. Se estableció que un fenómeno que afecta a la industria petrolera colombiana es las interrupciones de la cadena de suministro a causa de interferencias externas como la voladura de oleoductos en zonas de difícil acceso con el

---

<sup>1</sup> ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO Y GAS. [Sitio web]. Bogotá: ACP, publicaciones infográficas ACP. [Consulta: 5 de julio 2022]. Disponible en <https://acp.com.co/web2017/es/publicaciones-e-informes/infografias-acp/114-en-camino-de-los-hidrocarburos/file>

consecuente daño ambiental por derrame de crudo sobre suelos y aguas<sup>2</sup> (tabla 1), el daño ambiental causado por derrames de hidrocarburos, incrementa los riesgos de sobrepasar los límites de la sostenibilidad de las empresas dedicadas a la explotación de recursos agotables como el carbón o el petróleo<sup>3</sup>. El oleoducto Caño Limón-Coveñas (OCLC) y el oleoducto transandino (OT), junto con otros cuatro ductos, integran la red colombiana de oleoductos con 8954 kilómetros de recorrido para el año 2016<sup>4</sup>.

Cuadro 1. Fallas en la cadena de suministro atribuidas a voladuras contra la Red Colombiana de Oleoductos (2009 a 2018).

<b>Año</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
<b>Numero de voladuras</b>	32	32	84	151	259	141	80	49	63	93

Fuente: Tomada del artículo Useda, María. (2018). Ruptura de oleoductos por interferencia externa, daño ambiental y sostenibilidad en Colombia. Producción + Limpia. 13. 7-13. 10.22507/pml.v13n2a1.

El oleoducto Caño Limón-Coveñas (OCLC) se construyó en 1986, y dos años después ya se tenían reportes del ingreso desde Colombia al territorio venezolano de cerca de 161.485 barriles de petróleo a través de los ríos Tarra y Catatumbo<sup>5</sup>, Desde entonces se han registrado cerca de mil cuatrocientas voladuras al ducto a su paso por municipios de Norte de Santander, específicamente, por la región del Catatumbo que comprende los municipios de Convención, El Carmen, Teorama, San Calixto, El Tarra, Tibú, Hacarí, Sardinata y La Playa. Además, en el departamento funcionan tres campos petroleros: Campo Dos, Tibú y Río de Oro<sup>6</sup>. Las voladuras de oleoductos generan derrames sobre aguas fluviales y lacustres lo cual causa pérdida de biodiversidad de la fauna acuática,

<sup>2</sup> USEDA, María. Ruptura de oleoductos por interferencia externa, daño ambiental y sostenibilidad en Colombia. Producción + Limpia. 13. 2018. 7-13. 10.22507/pml.v13n2a1

<sup>3</sup> AMAYA NAVAS, O. El desarrollo sostenible y el derecho fundamental a gozar de un ambiente sano. Bogotá: Universidad Externado de Colombia 2012

<sup>4</sup> USEDA, María. Op. Cit.

<sup>5</sup> RIVAS, Z., SÁNCHEZ, J., TRONCONE, F., MÁRQUEZ, R., LEDO DE MEDINA, H., COLINA, M. et al. Nitrógeno y fósforo totales de los ríos tributarios al sistema lago de Maracaibo, Venezuela. Interciencia, 34(5), 2009. 308314

<sup>6</sup> USEDA, María. Op. Cit.

contaminación del suelo, pérdidas económicas por interrupciones en la cadena de producción y afectación a comunidades indígenas, El daño ambiental, según lo señalado en la jurisprudencia colombiana, es aquel que afecta el normal funcionamiento de los ecosistemas o las posibilidades de renovación de sus recursos y componentes<sup>7</sup>.

Los posibles costos del daño ambiental asociado por contaminación por hidrocarburos derivados del petróleo se han estudiado ampliamente para derrames en aguas marítimas, como el caso del hundimiento del petrolero Exxon Valdez frente a la costa de Alaska, la explosión submarina de una plataforma de perforación en el Golfo de México y el derrame del oleoducto de betún diluido en Michigan<sup>8</sup>. Sin embargo, un panel de expertos desarrollado en 2015 concluyó que los efectos en los ecosistemas acuáticos por derrames de petróleo dependen de las características del entorno donde se produce el derrame de petróleo, del tipo del petróleo derramado y del tiempo transcurrido entre el derrame y el inicio de las acciones de contingencia y recuperación<sup>9</sup>, estos hechos motivan al desarrollo de estrategias de mitigación que integren soluciones innovadoras con nuevas tecnologías para disminuir tiempo de reacción, mitigando el impacto medio ambiental de los ecosistemas.

## **2.1 MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL (SHM)**

Structural Health Monitoring (SHM), monitoreo de salud estructural es la implementación de estrategias para identificar daños en la estructura de sistemas mecánicos o civiles, integrando redes de sensores que transmiten la información de la salud del sistema, para analizar características a lo largo del tiempo, detectando la ubicación del daño. La disminución de los costos en el mantenimiento es la principal motivación para el uso de

---

<sup>7</sup> CORTE CONSTITUCIONAL. Sentencia C-449 de julio 16 2015. M.P. Palacio Palacio, J. I.

<sup>8</sup> PRENDERGAST, D. P. y GSCHWEND, P. M. Assessing the performance and cost of oil spill remediation technologies. *Journal of Cleaner Production*, 78, 2014. 233-242.

<sup>9</sup> LEE, K., BOUFADEL, M., CHEN, B., FOGHT, J., HODSON, P., SWANSON, et al. The behaviour and environmental impacts of crude oil released into aqueous environments. Ottawa: The Royal Society of Canada.), 2015

SHM debido a que el mantenimiento programado puede pasar a ser mantenimiento necesario acaba con los costos de un mantenimiento no necesario, reduce costos de mano de obra y aumenta la capacidad de seguimiento de la confiabilidad de los equipos y sistemas, un ejemplo, es el sistema IVHM de la computadora de mantenimiento central (CMC) de Honeywell integra un subsistema SHM y ayuda a las compañías aéreas a reducir los costos de mantenimiento entre un 50 % y un 80 %, extiende el tiempo del ciclo de vida y reduce el costo de una estructura<sup>10 11</sup>, El mantenimiento que se efectúan en muchos tramos de oleoductos se efectúa de manera rutinaria, sin evaluar cuantitativamente su estado real.

En términos generales, el sistema de monitoreo de la salud estructural puede ser activo o pasivo<sup>12</sup>, Cuya gran diferencia es que un sistema SHM pasivo solo captura información cuando es solicitada por la inspección y un sistema activo captura la información en tiempo real teniendo la capacidad de dar alerta de la integridad de la estructura en tiempo real, como se muestra en la figura 1, por lo tanto un sistema SHM cumple con las características necesaria para el monitoreo de oleoductos tanto como herramienta para el mantenimiento, como también estrategia de mitigación de vertimientos de hidrocarburos en el ecosistema debido a causas naturales y externas disminuyendo el tiempo de reacción.

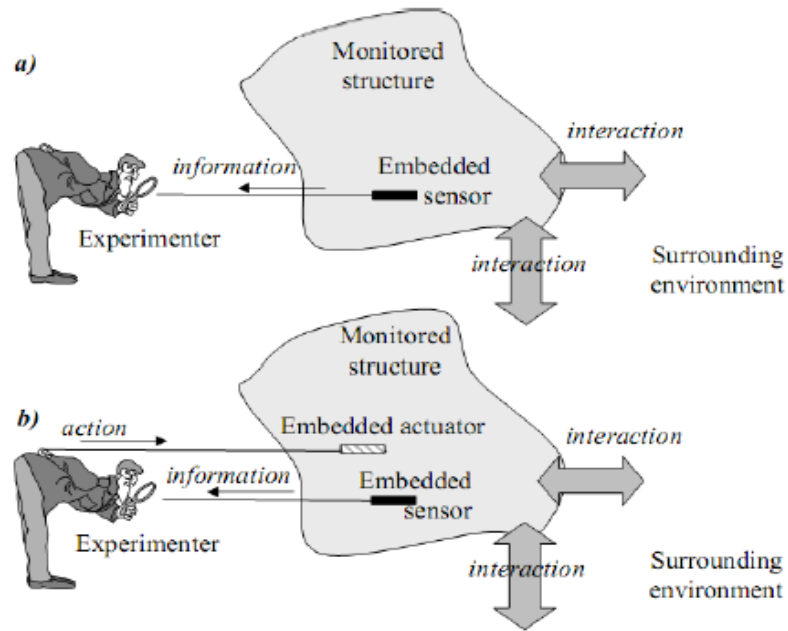
---

<sup>10</sup> CHANG, F. K. Design of integrated SHM system for commercial aircraft applications. Chang F K. 5th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford:Stanford University Press, 2005.

<sup>11</sup> INAUDI, D. Cost-Benefits Analysis in SHM Projects. 5th international conference on structural health monitoring of intelligent infrastructure (SHMII-5), 2011. 1-9.

<sup>12</sup> GIURGIUTIU, V. Structural Health Monitoring: with Piezoelectric Wafer Active Sensors, Elsevier Science2007

Figura 1. Dos posibles actitudes del experimentador que definen (a) pasivo y (b) activo Monitoreo.



Fuente: BALAGEAS, D., FRITZEN, C. P. & GUEMES, A. Structural health monitoring, Wiley Online Library. 2006

## 2.2 EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA (NDE)

Se denomina NDE (non-destructive evaluación) al proceso de inspección y análisis de componentes o elementos estructurales para identificar el estado de los materiales sin afectar las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de los mismos y se realizan sin producir daños que afecten a su funcionalidad. NDE comprende todo el proceso de inspección no destructiva, como también los análisis de resultados de esta inspección, para calificar la condición estructural del componente evaluado, conocer los tipos de fallas más comunes. El fundamento teórico de la ciencia de los materiales e ingeniería mecánica estructural para el análisis es fundamental para la correcta selección del método no destructivo más adecuado, considera para ello las capacidades del método a través de los parámetros de sensibilidad y confiabilidad. De manera general, se puede

decir que las técnicas no destructivas más comunes son: inspección visual; radiografía; ultrasonido; corrientes parásitas, partículas magnéticas y líquidos penetrantes.

Debido a los diferentes enfoques de NDE y SHM, el cual NDE se enfoca más en la localización de defectos y el enfoque de SHM determina más la integridad estructural. Se puede considerar que NDE, es un método complementario que tomado por SHM, correlaciona resultados y realiza inspecciones más precisas de áreas locales para una estructura<sup>13</sup>.

Es el ensayo acústico mediante el uso de ondas ultrasónicas, la que mejor se adapta a las necesidades de monitoreo de integridad de tuberías de oleoductos, debido a que las fallas frecuentes son disminuciones y pérdida parcial de material, además esta técnica emplea transductores para generar ondas mecánicas y recibe señales reflejadas para determinar el estado actual de la estructura lo cual es un principio de SHM activo.

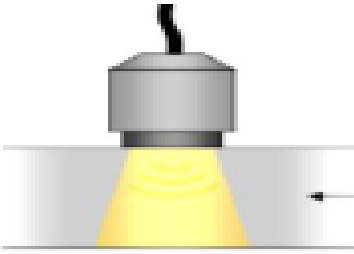
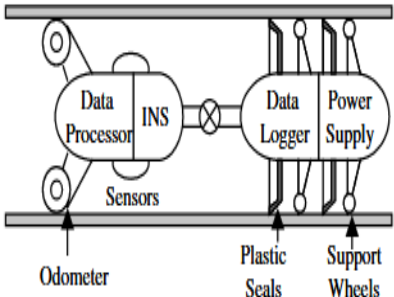

**2.2.1 Técnicas acústicas de NDE.** Las técnicas de inspección acústica o inspección por ultra sonido detectan defectos a través del paso de ondas mecánicas, las cuales al encontrar una discontinuidad del material se reflejan por reflexión hasta el sensor transductor que capta la señal y mediante un análisis de diferencia de velocidades se determina información sobre la discontinuidades en el material, estas ondas mecánicas son generadas por un transductor que traduce señales digitales a excitaciones en el material, el reflejo generado por la falla es capturado por el mismo transductor o por otro semejante en diferente posición, convirtiendo de excitaciones a señales digitales, existen actualmente dos tipos de transductores ampliamente usados que son los transductores piezoeléctricos (Ceramics piezoeléctrico transductor) PZT y los transductores electromagnético acústico (ElectroMagnetic Acoustic Transducers) EMAT, los cuales no profundizaremos en esta tesis, a su vez existen diferentes métodos de aplicación, como son: el método de ultrasonido, el método pipeline pigging y el método de ondas guiadas,

---

<sup>13</sup> Adams, D. 2007. Health monitoring of structural materials and components methods with applications, Chichester, England Hoboken, NJ, Chichester, England Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

en la tabla (2), se realiza una comparación sobre las ventajas y desventajas, en la cual se hace notable que las ondas guiadas es el método que cumple con los requisitos de implementación de un sistema SHM activo.

Cuadro 2. Comparación de técnicas acústicas.

Método	Características	Ventajas y desventajas
<p>Ultra sonido</p> 	<p>Desde la superficie mediante un traductor escanea fallas locales, a lo largo del espesor de una pieza o estructura.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Localiza con gran calidad las fallas.</li> <li>- Requiere de superficie libre de cualquier tipo de recubrimientos en los lugares se van a inspeccionar.</li> </ul>
<p>Pipeline pigging</p> 	<p>Navega dentro de la tubería, limpia la tubería y escanea el espesor de tubería a medida que viaja a lo largo de la tubería.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Escanea la superficie a lo largo de la tubería.</li> <li>- Requiere de parada de funcionamiento.</li> <li>- Requiere de infraestructura para introducir el pig.</li> </ul>
<p>Ondas guiadas</p> 	<p>Desde la superficie tiene la capacidad de localizar fallas a lo largo de un elemento longitudinal, sin desplazar a lo largo sus transductores.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Escanea a lo largo de la tubería sin necesidad de parar el funcionamiento de la tubería, ni retirar ningún tipo de recubrimiento solo el necesario para instalar los transductores.</li> <li>- solo detecta la posición de la falla, entrega poca información del tipo de falla.</li> </ul>

## 2.3 ONDAS GUIADAS

En gran número de artículos científicos han demostrado la gran utilidad de las ondas guiadas como parte de un sistema SHM de tuberías, debido a la capacidad de las ondas guiadas en inspeccionar, utilizando una sola posición de transductores sobre la tubería, incluso permitiendo hacer inspección a tubería ocultas por recubrimientos, tuberías sumergidas, enterradas y embebidas.

Para entender el fenómeno físico de las ondas guiadas, es importante identificar en donde se encuentran. Las ondas son perturbaciones, que transmiten energía en forma de movimiento ondulatorio sin propagación de materia, existen dos tipos según el medio de propagación, las que necesitan de un medio denominadas ondas mecánicas, y las que no necesitan de un medio, las cuales se propagan en forma de campos magnéticos y eléctricos, llamadas ondas electromagnéticas, las ondas guiadas ultrasónicas son ondas mecánicas que se propagan en el material. También, podemos diferenciar entre su régimen de excitación, existen dos tipos de regímenes, uno es el régimen estacionario, como las ondas estacionarias las cuales tienen excitación continua, ejemplos: frecuencias naturales, y régimen transitorio, el cual solo son excitadas un lapso de tiempo y se denominan ondas viajeras, ejemplos como ondas masivas y ondas guiadas. Las ondas masivas son ondas que se propagan en medios infinitos donde los límites del medio no interfieren en la forma de propagación, las cuales se propagan por esfuerzos cortantes y longitudinales en la mayor parte del material, este tipo de onda son las que más frecuentemente podemos encontrar en la naturaleza como son los sismos, el sonido, olas marinas, y el ultrasonido convencional local, por otro lado, las ondas guiadas se propagan en los límites del medio como las ondas superficiales.

Aunque las ondas masivas y guiadas son fundamentalmente diferentes, en realidad son gobernadas por el mismo conjunto de ecuaciones de onda diferenciales parciales. Matemáticamente, la principal diferencia es que, para las ondas masivas, no hay condiciones de contorno que deben ser satisfechas por la solución propuesta. Por el contrario, la solución a un

problema de ondas guiadas debe satisfacer las ecuaciones de gobierno, así como algunas condiciones físicas de borde. Es la introducción de las condiciones de contorno lo que hace, que las ondas guiadas sean un problema difícil de resolver analíticamente; en muchos casos, las soluciones analíticas ni siquiera pueden ser encontradas. Otra característica interesante de la propagación de ondas guiadas es que, a diferencia del número finito de modos (principalmente cortante longitudinal, siendo tal vez el cortante horizontal o vertical) que podría estar presente en un problema de onda masiva, generalmente, hay un número infinito, de modos asociados con un problema de onda guiada dado que es un cuerpo finito, puede soportar un número infinito de diferentes modos de onda guiada<sup>14</sup>.

En general la diferencia entre las ondas masivas y las ondas guiadas es la aparición de las condiciones de contorno en la solución, las cuales causan la aparición de múltiples modos de propagación como resultado de la interacción entre las ondas masivas y los límites del medio, que produce reflexión, refracción y conversión de modo. A medida que las ondas se propagan producen cambios en el esfuerzo y la velocidad, que influyen en las características cuantitativas de las ondas<sup>15</sup>. Por lo cual los parámetros a controlar para evaluar las ondas guiadas como método de inspección son la frecuencia, período, fase, longitud de onda, velocidad de onda, número de onda, condiciones de contorno, geometría y amplitud de desplazamiento de partículas, en esta tesis examinaremos específicamente la propagación de las ondas guiadas en una geometría de cilindro hueco (tubería) debido a los requerimientos del planteamiento del problema.

La propagación de ondas en medios infinitos elásticos ya ha sido descrita exitosamente por autores y se puede encontrar en muchos libros de texto<sup>16 17</sup>, teniendo como punto de partida la ecuación de movimiento de Euler, derivada de la segunda ley de Newton, expresada para las condiciones de un sólido linealmente elástico, con fuerzas

---

<sup>14</sup> ROSE L., Joseph. Ultrasonic guided waves in solid media. Pennsylvania: Cambridge University Press. p. 79

<sup>15</sup> GIURGIUTIU, V. Op. Cit.

<sup>16</sup> MORSE P.M. and FESHBACH H. Methods of Theoretical Physics. McGraw-Hill Book Company, 1953

<sup>17</sup> MALVERN L.E.. Introduction to the mechanics of a continuous medium. Prentice-Hall, 1969

volumétricas despreciables y densidad constante: se puede escribir de la siguiente manera

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \right) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}^{\vec{3}} \quad (1)$$

donde  $\mathbf{u}$ , es el vector de desplazamiento,  $\nabla$  es el operador de Laplace tridimensional, y  $\boldsymbol{\sigma}^{\vec{3}}$  es el tensor de tensión. Usando la ley de Hooke, el tensor de tensión se puede expresar en términos del tensor de deformación y el tensor de rigidez  $C$ .

$$\boldsymbol{\sigma}^{\vec{3}} = C \cdot \boldsymbol{\epsilon}^{\vec{3}} \quad (2)$$

Que también puede ser expresada más conveniente de la siguiente forma.

$$\boldsymbol{\sigma}^{\vec{3}} = \lambda \nabla \cdot \mathbf{u} + \mu (\nabla \mathbf{u} + \mathbf{u} \nabla^T) \quad (3)$$

Combinando las ecuaciones anteriores, tenemos la ecuación diferencial de Navier para un medio elástico isotrópico dado que  $\lambda$  y  $\mu$ , que son las constantes del material.

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \right) = \mu \nabla^2 \cdot \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (4)$$

Expandiendo en sus componentes espaciales  $x, y, z$ :

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u_x + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u_y + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u_z + (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \quad (7)$$

Estas son las ecuaciones diferenciales de movimiento denominadas ecuaciones de onda, son ecuaciones que satisfacen todas las ondas elásticas que se propagan en el medio. Cualquier campo de desplazamiento que satisfaga las ecuaciones de onda, cumplirán a su vez las condiciones de equilibrio y compatibilidad, por lo que las únicas restricciones restantes para el desplazamiento provienen de condiciones de contorno externas.

Utilizando la descomposición de Helmholtz en la ecuación de movimiento (1), se puede expresar en una forma más simplificada, el campo de desplazamiento  $u$  se puede dividir en una componente rotacional  $\nabla \times H$  y una componente irrotacional  $\nabla \phi$ , donde  $\phi$  es el potencial escalar de compresión y  $H$  es un potencial vectorial equivoluminal:

$$\begin{aligned} u &= \nabla \phi + \nabla \times H \\ \text{con } \nabla \cdot H &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

La ecuación (2) se puede sustituir en la ecuación de movimiento de Navier, y obtenemos la siguiente ecuación:

$$\nabla \left[ (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \phi - \rho \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right) \right] + \nabla \times \left[ \mu \nabla^2 H - \rho \left( \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \right) \right] = 0 \quad (9)$$

La ecuación (3) nos lleva a los siguientes pares de ecuaciones para los dos potenciales desconocidos:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = C_L^2 \nabla^2 \phi \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = C_S^2 \nabla^2 H \quad (11)$$

donde  $C_L$  y  $C_S$ , equivalen a las velocidades de fase de las ondas longitudinales y transversales respectivamente expresadas de la siguiente forma.

$$C_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (12)$$

$$C_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (13)$$

Las ecuaciones (4) se denominan ecuaciones diferenciales de Helmholtz. La primera ecuación gobierna las ondas longitudinales y la segunda ecuación gobiernan las ondas de corte. Dichas ecuaciones son independientes, por lo que las ondas longitudinales y transversales pueden propagarse sin interacción en un medio ilimitado. Por lo que solo, hay dos tipos de ondas que pueden propagarse en un medio isotrópico ilimitado. Entonces la solución general del diferencial de Helmholtz, puede escribirse:

$$\begin{cases} \phi = \phi_0 e^{i(k_L z - \omega t)} \\ H = H_0 e^{i(k_S z - \omega t)} \end{cases} \quad (14)$$

donde  $\phi$  y  $H_0$ , son constantes iniciales arbitrarias.  $K_L$  y  $K_S$ , son las constantes longitudinales y vectores de onda de corte. y  $z$  es la dirección de la propagación.

**2.3.1 Ondas guiadas en cilindros huecos o tuberías.** La primera observación reportada de ondas guiadas sobre superficies curvas fue reportada por Lord Rayleigh en 1912, quien informó sobre el fenómeno en la “galería de los susurros” en Londres,

posterior mente con el paso del tiempo se han reportados varias investigaciones<sup>18,19</sup>, de la propagación de ondas guiadas en cilindros huecos y cuyas soluciones se pueden encontrar en varios libros<sup>20,21</sup>. Considerando el modelo de un cilindro hueco infinitamente largo como se muestra en la figura 2, las condiciones de contorno para la geometría y el movimiento libre son:

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \quad (15)$$

$$\text{donde } r = r_1 \text{ y } r = r_2 \quad (16)$$

Entonces, los componentes de desplazamiento serían.

$$u_r = U_r(r)\cos(n\theta)\cos(\omega t + kz) \quad (17)$$

$$u_\theta = U_\theta(r)\sin(n\theta)\cos(\omega t + kz) \quad (18)$$

$$u_z = U_z(r)\cos(n\theta)\sin(\omega t + kz) \quad (19)$$

donde  $n$ , es el orden circunferencial;  $k$  es el número de onda; los términos  $u_r, u_\theta, u_z$  son los componentes de desplazamiento en las direcciones radial, circunferencial y axial respectivamente;  $U_r, U_\theta, U_z$  son las amplitudes de desplazamiento correspondientes a la función compuesta de Bessel (o funciones de Bessel modificadas, dependiendo de los argumentos).

---

<sup>18</sup> GAZIS, D.C. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. analytical foundation. The Journal of the Acoustical Society of America, 31:568{578, 1959

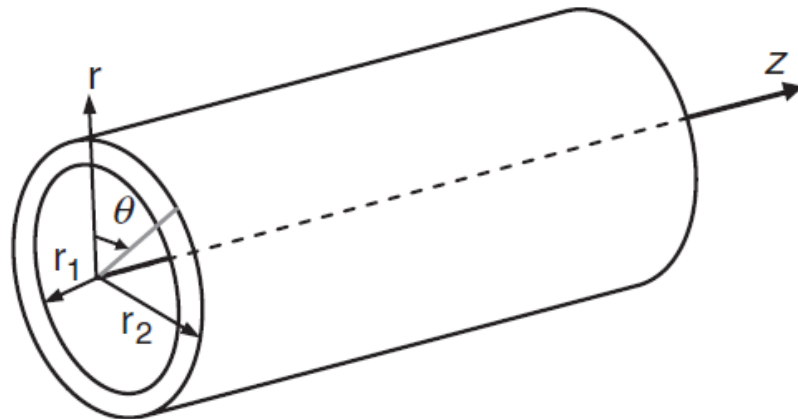
<sup>19</sup> MIRSKY, I. Wave propagation in transversely isotropic circular cylinders, part 1: Theory. The Journal of the Acoustical Society of America, 37(6):1016{1021,1965

<sup>20</sup> AULD, B.A. Acoustic \_elds and waves in solids vol. 2. R.E. Krieger, 1990.

<sup>21</sup> ROSE, J.L. Ultrasonic Waves in Solid Media. Cambridge University Press, August 1999

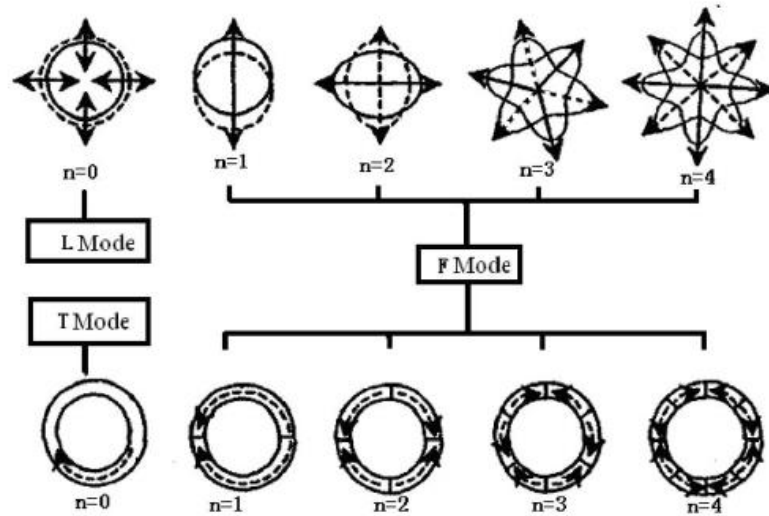
Las ondas guiadas en estructuras cilíndricas huecas se propagan en dirección axial o circunferencial, para nuestro caso de estudio nos interesan las ondas guiadas que se propagan axialmente simétricas, las cuales pueden incluir ondas longitudinales, ondas de torsión y ondas de flexión, Las ondas longitudinales tienen movimientos de partículas dominantes en las direcciones  $r$  y/o  $z$ , las ondas de torsión tienen movimientos de partículas dominantes en la dirección  $\theta$  y las ondas de flexión representan una mezcla de los dos modos anteriores, dado que la propagación longitudinal y torsional son axialmente simétricos.

Figura 2 .Sistema de coordenadas cilíndricas para el cilindro hueco.



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

Figura 3. Croquis del modelo de vibraciones periféricas.



Fuente: SHEN, G., QIN, X., HE, R. & XIU, C. Theoretical Analysis and Experimental Study of Gas Pipeline Leak Acoustic Emission Signal Transmit Speed 2012.

Basado en condiciones de contorno, propiedades del material, y propiedades geométricas del cilindro hueco, el comportamiento de onda se puede describir resolviendo las ecuaciones de onda gobernantes con las condiciones de contorno apropiadas. En este capítulo, simulaciones de ondas guiadas que se propagan en direcciones axiales en forma cilíndrica se calculan y evalúan las estructuras.

En las ecuaciones 17 al 19, el desplazamientos para  $n = 0$  corresponden a los modos asimétricos y los desplazamientos para  $n = 1; 2; 3 : : :$  corresponde al modos flexurales. Usando la notación de<sup>22</sup>, se indican los modos longitudinales  $L(0,m)$ , se indican los modos torsionales  $T(0,m)$ , y los modos flexurales se denotan  $F(n,m)$ . El primer índice  $n$  es el armónico orden de variación circunferencial. Por lo tanto, todos los modos cuyo primer entero es cero son axialmente simétricos, todos los modos cuyo primer entero es 1 tienen un ciclo de variación de desplazamiento y tensiones alrededor de la circunferencia, y así

<sup>22</sup> SILK, M.G. and BAINTON, K.F. The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to lamb waves. Ultrasonics, 17(1):11{19, 1979

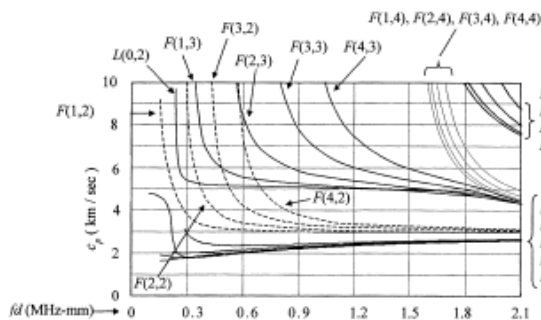
sucesivamente como se muestra en la figura 3. Y el segundo índice  $m$  es el número de modo. El valor 1 está asociado a modos fundamentales.

## 2.4 DISPERSIÓN DE ONDAS GUIADAS

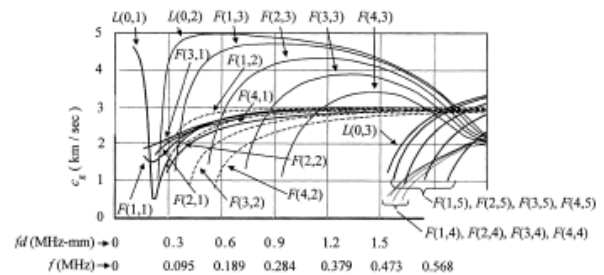
La gráfica 4, ilustran las ondas guiadas en diferentes modos que se propagan en una tubería a diferentes frecuencias describiendo las curvas de dispersión, las cuales describen las soluciones a las ecuaciones de propagación de ondas modales dando las propiedades de ondas guiadas (velocidad de fase, velocidad de energía, atenuación y forma modal).

Figura 4 .a) Diagrama de dispersión de velocidad de fase. (b) Diagrama de dispersión de velocidad de grupo.

(a)

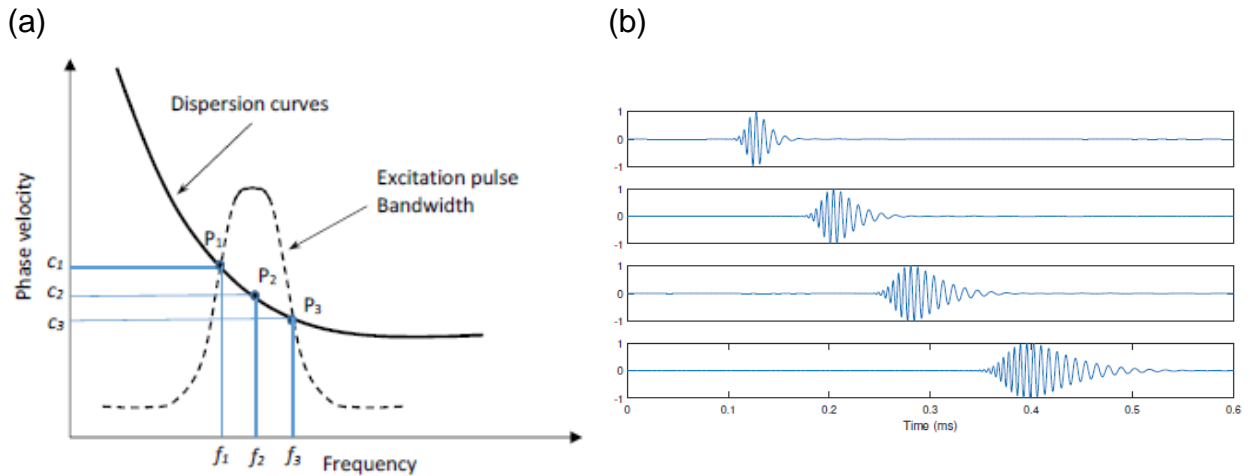


(b)



Fuente: Hyeon Jae Shin, Joseph L. Rose, Guided waves by axisymmetric and non-axisymmetric surface loading on hollow cylinders, Ultrasonics, Volume 37, Issue 5, 1999, Pages 355-363, ISSN 0041-624X

Figura 5 .(a) Representación gráfica de la curva de dispersión y ancho de banda de excitación, (b) Secuencia de onda dispersiva para distancias de propagación de 0,3 m a 1 m.



Fuente: QUIROGA MENDEZ, Jabid. Stress monitoring of cylindrical structures using guided waves. [en Linea], Tesis Doctoral. Universidad politécnica de catalunya, 2018. [Consultado 25 de julio 2022]. Disponible en: <https://Dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=257495>

Una señal de duración finita en una frecuencia dispersiva, se distorsiona en el tiempo y espacio a medida que se propaga lejos de la fuente, generando que el ancho de banda del pulso de excitación, produzca diferentes velocidades de fase, como se muestra en la figura 5, por lo tanto, dentro del pulso de excitación, se desarrollan varias velocidades de fase, creando un paquete de ondas deformas, lo cual es perjudicial para la sensibilidad de la inspección, ya que una vez la onda es reflejada, se recibirá una señal con baja energía, con el peligro que se confunda con otras señales parasitas, el efecto de la dispersión es consecuencia a la diferencia de la velocidad de fase y la velocidad de grupo, como lo describió Rayleigh<sup>23</sup>, donde la velocidad de grupo es la velocidad de todo el paquete de ondas guiadas que viajan a una frecuencia dada, y la velocidad de fase, es la velocidad a la que los picos individuales dentro de ese paquete de ondas viajan, por lo

<sup>23</sup> RAYLEIGH, J.W.S. The theory of sound. Dover, 1945

cual se trata de seleccionar una frecuencia, que no estén en un rango de frecuencias dispersivas, seleccionando áreas donde la velocidad de grupo no varíe.

## 2.5 MÉTODO DE EXPANSIÓN EN MODO NORMAL (NME)

Hasta ahora las condiciones de contorno de excitación, se han tratado mediante método de excitación axial a el eje z, pero esta condición de generación de ondas guiadas va en contra del propósito de inspeccionar tuberías que se encuentran en funcionamiento, también va en contra de la condición de ser un ensayo no destructivo, ya que para la implementación de este método es necesario tener la cara axial de la tubería disponible para aplicar la carga de excitación. El método de expansión normal describe la generación de onda desde una ubicación superficial de la tubería, aplicando cargas superficialmente, las cuales se expanden en forma de una serie infinita de modos normales del cilindro, los campos generados en el cilindro se expanden en la forma de una serie infinita de modos normales del cilindro<sup>24</sup>.

El primer artículo sobre una investigación teórica completa de la propagación de ondas guiadas en tuberías fue escrita por D. C. Gazis<sup>25</sup>, Obtuvo la solución general de las ondas armónicas propagándose en un cilindro hueco infinitamente largo, y luego, el problema de la carga de la fuente del cilindro hueco se ha estudiado por John Ditri<sup>26</sup> usando el método NME (normal mode expansion method), donde obtuvo los factores de los diferentes modos armónico, y en el artículo<sup>27</sup>, estudiaron la distribución del campo acústico generado por cargas que varían su cobertura angular sobre la tubería, donde

---

<sup>24</sup> AULD, B. A., *Acoustic Fields and Waves in Solids* (Krieger, Malabar, FL, 1990), Vol. II, pp. 161-162

<sup>25</sup> GAZIS D. C. Op. Cit.

<sup>26</sup> DITRI J. J. and J. L., "Excitation of Guided Wave Modes in Hollow Cylinders by Applied Surface Traction," *J. Appl. Phys.* 72~7!, 2589–2597 ~1992!

<sup>27</sup> LI, J., & ROSE, J. L. Excitation and propagation of non-axisymmetric guided waves in a hollow cylinder. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(2), 2001 457–464. doi: 10.1121/1.1315290

podieron determinar la relación de amplitud de los modos excitados y la carga de excitación expresada de la siguiente forma.

$$A_{+n}^M(z) = \frac{R_{nr}^{M*}(b)e^{i\beta_n^M z}}{4P_{nn}^{MM}} (\Theta_r^M P_1(\theta)) \cdot (e^{i\beta_n^M z} p_2(z)) \quad (20)$$

donde  $A_{+n}^M(z)$ , es la amplitud de expansión del modo normal de la  $n$  modo de  $M$  orden circunferencial, contiene  $e^{i\beta_n^M z}$ , suponiendo que las ondas se propagan en la dirección  $+z$ ,  $R_{nr}^{M*}(b)$  y  $\Theta_r^M(\theta)$ , denotan la radial y angular distribuciones de la componente de la tensión producida por el modo  $n$  de la familia  $M$  respectivamente, y  $P_{nn}^{MM}$  es La relación ortogonal entre los modos de onda en términos de una integral de área.

Una carga parcial genera modos longitudinales y de flexión en el cilindro, debido a la ligera diferencia de las velocidades de fase y los modos de flexión, la distribución de desplazamiento de partículas cambia con la distancia de propagación.

## 2.6 FOCALIZACIÓN DE ONDA

Li y Rose lograron enfocar una matriz en fase para la focalización en la generación de ondas guiadas en tuberías, con un sistema de generación de señal de canal  $N$  ( $N \geq 1$ )<sup>28</sup>, con las mismas condiciones de carga para cada canal, la señal generada por un solo canal a una distancia  $Z$  se denomina  $G$  y se puede obtener de la función de perfil angular de excitación  $H$  a dicha distancia como se muestra:

$$G = A \otimes H \quad (21)$$

---

<sup>28</sup> LI, J. and ROSE, J.L., "Angular-profile tuning of guided waves in hollow cylinders using a circumferential phased array", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., 49(12),1720-1729 (2002)

Donde, la función compleja  $A$  es un peso discreto, función;  $\otimes$  denota el operador de convolución;  $H$  es el discreto perfil angular de fuente de excitación única. Cuando la onda guiada se enfoca en la parte superior del cilindro (ubicación circunferencial  $0^\circ$ ) a una distancia  $Z_0$ , la función de perfil angular enfocada  $G$  se convierte en un pulso.

$$G = [G_i]_{N \times 1} \quad (22)$$

$$G_i = \begin{cases} 1, (i = 1) \\ 0, (1 < i < N) \end{cases} \quad (23)$$

El algoritmo para la función de peso discreto  $A$  se expresa como:

$$A = G \otimes^{-1} H \quad (24)$$

$$A = FFT^{-1}(G/H) \quad (25)$$

Donde,  $\otimes^{-1}$  y  $FFT^{-1}$  denotan la convolución y el operador de la transformada rápida de Fourier inversa, respectivamente. Para lograr el enfoque, la función discreta  $A$  se puede utilizar para determinar coeficientes de entrada para superponer la energía ultrasónica de todas las fuentes de excitación. El retardo de fase y la amplitud de la señal de entrada, para el canal de excitación  $i$  es la fase  $\phi_i$  y la amplitud  $L_i$  de la función de peso correspondiente  $A_i$ . Como consecuencia, el tiempo de retardo de entrada para el canal  $i$  es:

$$\Delta t_i = \frac{-\phi_i}{2\pi f} \quad (26)$$

## 2.7 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos, es el más flexible y estable para calcular la velocidad de onda en una estructura, por lo que muchos investigadores aplicaron este método para abordar problemas de ondas guiadas, como el análisis realizado en una estructura de placa por<sup>29</sup>, el método de elementos finitos es un método de aproximación de solución de problemas donde una geometría puede dividirse en un número finito de partes, (elementos), cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados nodos, estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes

Para determinar la elección del análisis más adecuado en función de los resultados que queremos obtener, debemos tener en cuenta la física que hay detrás del comportamiento de una estructura mecánica ante la aplicación de cargas, esta simplificada en la siguiente ecuación.

$$[M]\{\ddot{D}\} + [C]\{\dot{D}\} + [K]\{D\} = [F] \quad (27)$$

Donde M, C y K son las matrices de masas, amortiguación y rigidez, respectivamente y D los desplazamientos en los nodos.

En función de simplificar el tipo de análisis, podemos identificar mediante en la ecuación tres tipos de análisis, modal, transitorio y estático: El análisis modal, es cuando en la ecuación se eliminan los términos de fuerza y amortiguamiento, obteniendo un sistema de vibración libre. El análisis transitorio no se elimina ningún término de la ecuación, de esta forma se obtiene el comportamiento en el transitorio del modelo. El análisis estático ocurre cuando el modelo llega al equilibrio tras aplicar la carga sobre él modelo.

---

<sup>29</sup> ALLEYNE D.N. and CAWLEY P.. The long range detection of corrosion in pipes using lamb waves. Review of Progress in Quantitative NDE, 14:2073{2080,1995.

Para nuestro caso, la aplicación de la dispersión de ondas guiadas en una geometría cilíndrica hueca, el análisis que más se adecua es el análisis transitorio estructural, ya que analiza qué ocurre en el modelo en el momento en el que se aplica una carga y cómo reacciona éste antes de que este llegue al equilibrio entregando resultados de esfuerzos y deformaciones en función del tiempo transcurrido.

### 3. METODOLOGÍA

La metodología que seguiremos para modelar efectivamente la excitación normal expansiva en tubería, mediante el uso de un software de modelamiento de elementos finitos ANSYS, es descrita a continuación, donde los motivos por los cuales se seleccionaron parámetros tales como: geometrías, frecuencias, tipo de elementos, tamaños de elemento, etc. y posteriormente en el capítulo 4 se analizarán los resultados obtenidos de las simulaciones.

#### 3.1 GEOMETRÍA DE TUBERÍA Y MATERIAL.

La selección de las dimensiones de las tuberías de estudio obedece a las dimensiones de oleoductos y poliductos presentes en el territorio nacional, como son la tubería de 16" Schedule 30, presente en el poliducto AYACUCHO-COVEÑAS L16 y la tubería de 6" Schedule 40, presente en poliducto SALGAR-LA DORADA, de dimensiones estándares información extraída de la tabla 3, de la empresa Cenit, basadas en el catálogo presente en la tabla 4, de la empresa VEMACERO de tuberías de acero estructural, el cual tiene una densidad de 7850 kg/m<sup>3</sup>, un coeficiente de Poisson de 0.3 y un módulo de Young de 2e11Pa.

Cuadro 3 .Red de transporte de hidrocarburos del sistema colombiano tabla de la empresa Cenit.

<b>Sistemas</b>	<b>Estacion inicial</b>	<b>Estacion final</b>	<b>Diametro pulgadas</b>	<b>Longitud kms</b>
Ayacucho-Coveñas L16"	Ayacucho	Coveñas	16"	280.5
Salgar- LA Dorada	Salgar	La dorada	6"	3800

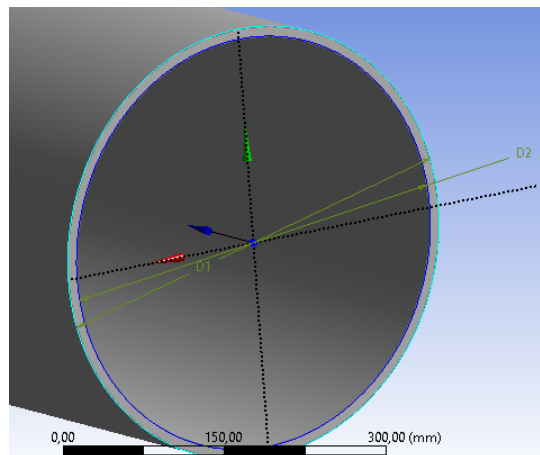
Fuente:Datos tomados de CENIT. "Descripción de la red"[En línea]. Bogota, 2020 [Consultado 12 diciembre 2020]. Disponible en: <https://cenit-transporte.com/oleoductos/>

Cuadro 4 .Datos de tuberías de 6” sch 40 y 16” sch 30.

Diámetro NPS	Nominal DN	Diámetro Exterior Real		Espesor de Pared		Identificación		Peso del tubo	
		(in)	(mm)	(in)	(mm)	Weight Class	Schedule	lb/pie	Kg/m
6	150	6.625	168.3	0.280	7.11	STD	40	18.97	28.26
16	400	16.000	406.4	0.375	9.52	STD	30	62.58	93.17

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

Figura 6. Interfaz de Desing Modeler.



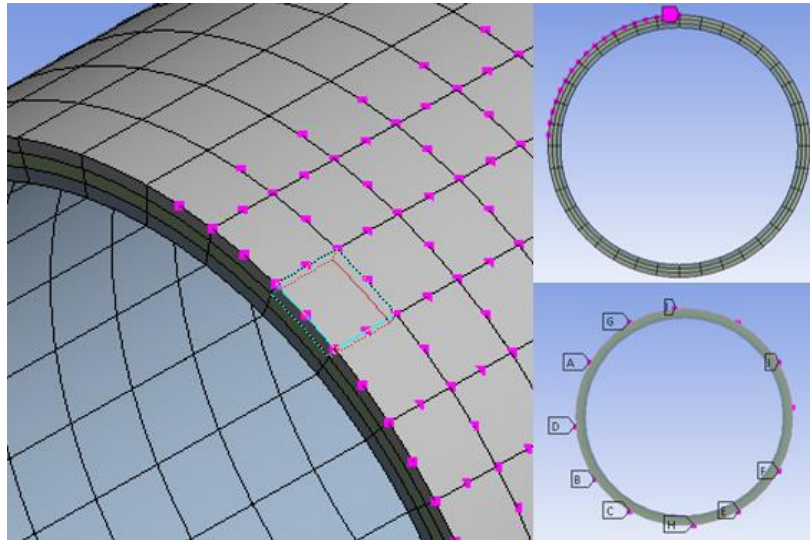
Para la construcción de la geometría se utilizó el entorno de modelamiento de Desing Modeler de ANSYS debido a la simplicidad de la geometría, facilitando modificar dimensiones como se muestra en la figura 6.

### 3.2 TIPO DE ELEMENTOS, RESOLUCIÓN ESPACIAL Y DIMENSIONES DE MALLA.

Debido a la geometría curva, el tipo de elemento que es más aconsejable para modelar la tubería es el elemento poliédrico, se decidió contar con elementos cuadráticos debido

a las características que deseamos variar y extraer de la simulación las cuales dependen de una localización angular más precisa de los nodos de la superficie, como se puede apreciar en la figura 7, a continuación.

Figura 7. Nodos de excitación.



Efecto Nyquist o solapamiento, es el fenómeno de resolución de señales, el cual causa que señales continuas distintas se tornen indistinguibles cuando se muestrea, esto sucede por la baja cantidad de muestras que no describe debidamente la señal, entregando una información errónea, en este caso para garantizar la resolución correcta de las ondas guiadas, se requiere una longitud de elemento adecuada. En Moser, F., Jacobs, L. J., and Qu, J. (1999)<sup>30</sup> se recomiendan 20 nodos por longitud de onda ( $\lambda$ ). Por lo tanto, esta recomendación puede ser expresado como<sup>31</sup>.

$$l_e = \frac{\lambda_{min}}{20} \quad (28)$$

<sup>30</sup> MOSER, F., JACOBS, L. J., and QU, J. Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method. *NDT & E International*, 32(4): 1999 225–234

<sup>31</sup> QUIROGA MENDEZ, Jabid. Stress monitoring of cylindrical structures using guided waves. [en línea], Tesis Doctoral. Universidad politécnica de Catalunya, 2018. [Consultado 25 de julio 2022]. Disponible en: <https://Dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=257495>

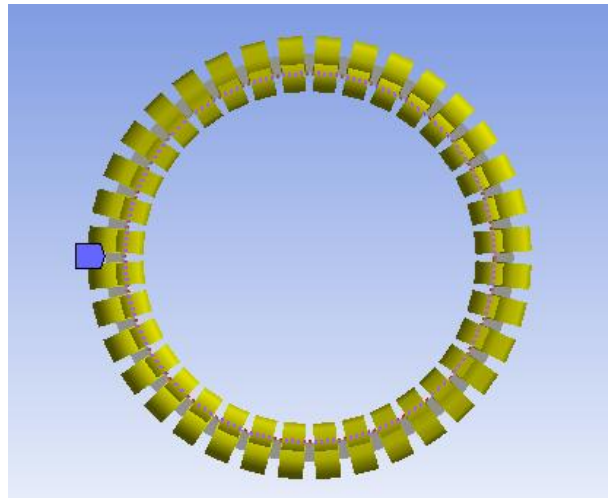
Donde,  $\lambda_{min}$  es la longitud de onda más corta de interés, la cual es la longitud de onda de la velocidad torsional  $C_T$ , esta es la más pequeña onda posiblemente excitada y debido a la relación entre la velocidad y longitud de onda ( $\lambda = V/f$ ), el criterio final se puede expresar como<sup>32</sup>.

$$l_e = \frac{C_T}{20f} \quad (29)$$

Como el modo de onda más deseado a excitar, es el modo de onda torsional, el cual tiene deformaciones en sentido angular, mediante el uso de la herramienta de mallado Edge Sizing con el tipo de definición, división numérica, tomamos el perímetro y dividimos por la longitud de elementos mínima señalada anteriormente, para tener el número de divisiones que se deben introducir y se puede expresar de la siguiente forma ecuación 31, y se visualiza de siguiente manera figura 8.

$$\text{Numero de divisiones} = \frac{D_{int} * 20f}{C_T} \quad (30)$$

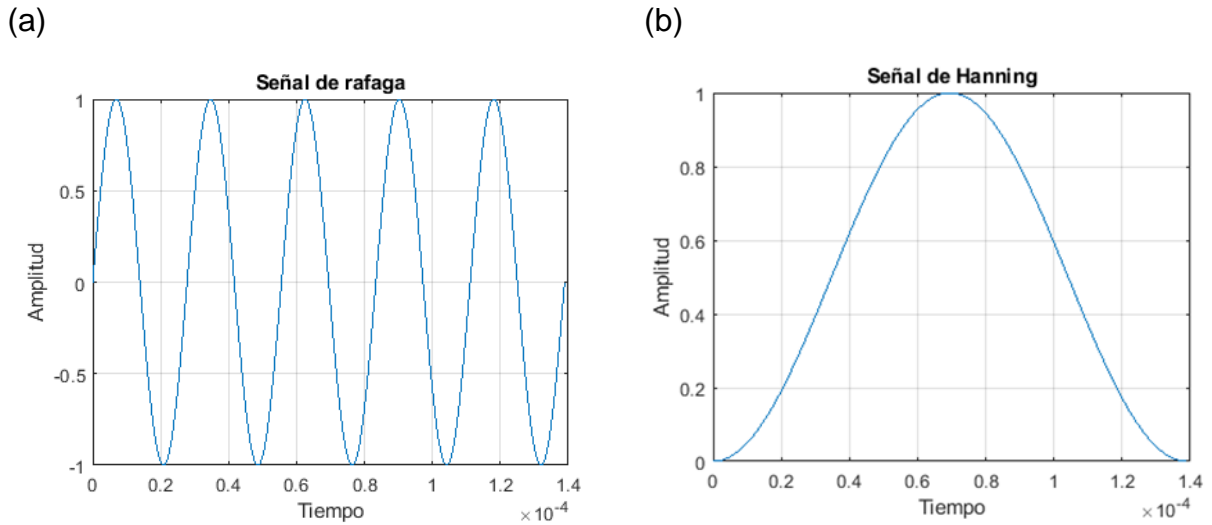
Figura 8. Divisiones axiales de malla.



<sup>32</sup> GALAN, J. M. and ABASCAL, R. Elastodynamic guided wave scattering in infinite plates. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 58(7) 2003:1091–1118

### 3.3 SEÑAL DE EXCITACIÓN, RESOLUCIÓN TEMPORAL Y TIEMPOS DE SIMULACIÓN.

Figura 9. Señales de: (a)Ráfaga, (b)Hanning.



Una vez seleccionada la frecuencia, en una zona no dispersiva, mediante la ayuda de la gráfica de dispersión de la tubería, que se quiera evaluar, y debido a él régimen transitorio en el que se produce la onda se puede utilizar una señal de excitación de ventana de ráfaga Hanning, dado que, las ventajas de limitar el ancho de banda de frecuencia de excitación, se reducen así, los reflejos no deseados entre los empaquetadores de ondas, y puede reducir la energía a una cierta frecuencia que no sea la excitación o la frecuencia "central".

La señal ventana de ráfaga Hanning está compuesta a su vez de dos funciones: una señal de ráfaga que representara la velocidad de fase, y una señal de ventana la cual representara la velocidad de grupo, donde  $t$ , el tiempo es la variable independiente,  $t_{exc}$  el tiempo que dura la señal Hanning,  $f$  la frecuencia que se quiere excitar, dada por la selección previa del modo y  $n_{ciclos}$  numero de ciclos de la señal de ráfaga presente dentro de la ventana como se muestra en las ecuaciones, y se ven gráficamente en las figura 9.

Señal ráfaga:

$$\text{Señal ráfaga} = \text{Sin}(2 * \pi * f * t) \quad (31)$$

Señal ventana Hanning:

$$\text{Señal ventana Hanning} = 0.5(1 - \cos\left(\frac{2 * \pi * t}{t_{exc}}\right)) \quad (32)$$

Señal ventaneo de ráfaga Hanning:

$$(H) = \text{señal ráfaga} * \text{señal ventana Hanning}$$

$$H = 0.5 * \left(1 - \cos\left(\frac{2 * \pi * t}{t_{exc}}\right)\right) * \text{Sin}(2 * \pi * f * t) \quad (33)$$

Dado que el tiempo de excitación es:

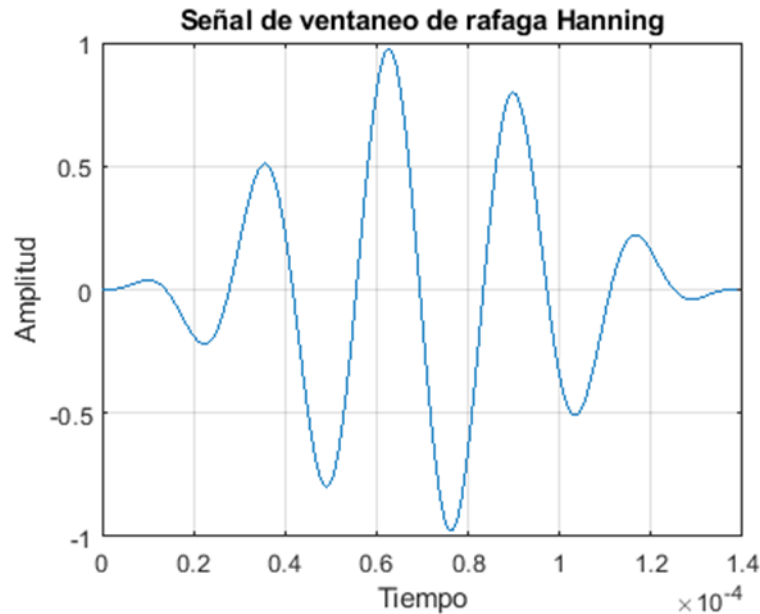
$$t_{exc} = \frac{n_{ciclos}}{f} \quad (34)$$

Se puede simplificar la expresión como:

$$H = 0.5 * \left(1 - \cos\left(\frac{2 * \pi * t * f}{n_{ciclos}}\right)\right) * \text{Sin}(2 * \pi * f * t) \quad (35)$$

La señal ventaneo de ráfaga Hanning se puede apreciar gráficamente en la gráfica 10.

Figura 10. Señal de ventaneo de ráfaga Hanning.



El  $\Delta t$  es el tamaño del paso del tiempo para el cual se resuelve la simulación, y como debido al Efecto Nyquist o solapamiento expresado anteriormente, es pertinente tener un  $\Delta t$  prudentemente adecuado para una solución precisa, dado que un  $\Delta t$  demasiado pequeño implican un alto costo computacional, un criterio común, es utilizar al menos 20 puntos por ciclo de los resultados de mayor frecuencia<sup>33</sup>. Esta regla se expresa como:

$$\Delta t = \frac{1}{20f_{max}} \quad (36)$$

Se seleccionó el módulo de Transitorio estructural del menú de análisis de ANSYS, debido a la capacidad que tienen de modelar fenómenos que varían con el tiempo, para ello, se debe determinar los momentos en los que se generan las diferentes deformaciones, para este caso se determinó dos etapas: la primera, en donde se reproduce la onda y la segunda, donde, se propaga la onda en la tubería. Para determinar

---

<sup>33</sup> SIBILIO, E., CIAMPOLI, M., and BECK, J. L. Structural health monitoring by Bayesian updating. (June): 2007 13–16.

las condiciones temporales debemos saber el momento de inicio y finalización de cada etapa, además de la correcta selección del  $\Delta t$  el cual ya se trató posteriormente.

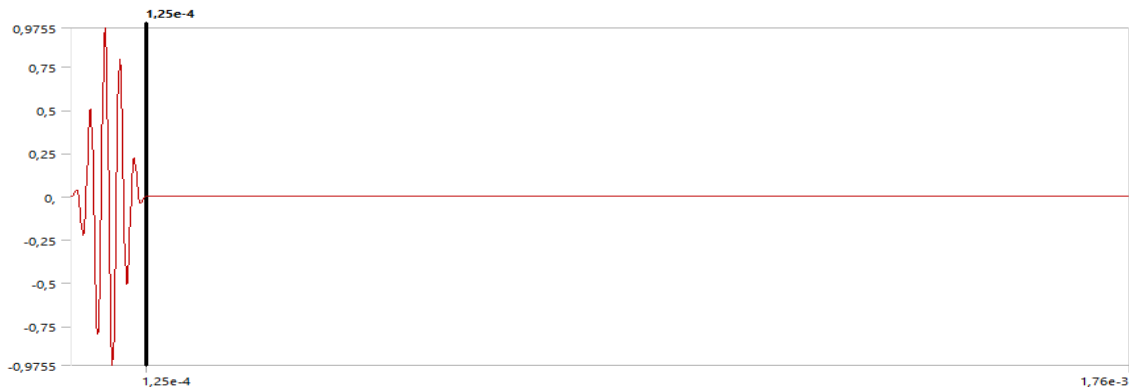
En la etapa primera de reproducción de la onda está determinado, por la ecuación de ventaneo de ráfaga Hanning, de la cual podemos extraer que el tiempo de excitación es  $t_{exc}$ .

$$t_{exc} = \frac{n_{ciclos}}{f} \quad (37)$$

En la etapa segunda de propagación de la onda está determinada, por el tiempo que tarda la onda en llegar al extremo opuesto, el cual está determinado por la velocidad torsional cuya relación esta expresada a continuación, donde  $t_{sim}$ , es el tiempo de la simulación,  $L_Z$  es la longitud total del a tubería, esto debido a que en esta tesis no analizaremos los reflejos de ondas, en la gráfica 11, se puede observar los tiempos de las dos etapas.

$$t_{sim} = \frac{L_Z}{C_T} \quad (38)$$

Figura 11. Tiempo de simulación.



### 3.4 ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE CONVERGENCIA Y SUPERCOMPUTACIÓN.

Como se señaló posteriormente, una de las variables principales que determinan la cantidad de elementos de la malla es la resolución espacial, pero debido a que mediante este método la cantidad de elementos necesaria es muy alta la cual hace aumentar el costo computacional excediendo las capacidades de un computador personal en algunos casos, por lo cual se decidió implementar un análisis paramétrico de convergencia el cual examinaremos a continuación.

Se simuló una tubería de 6" Schedule 40 de acero estructural con una longitud de 1 m, y se excitó con una frecuencia de 36 kHz, de forma normal con una cobertura de 360° de la superficie y una extensión longitudinal de 0.1 m. Como variable independiente, se tomó el número de divisiones axiales variando desde 6 hasta 60 y como variable dependiente se tomó el tiempo que le tomaba a la onda llegar hasta un nodo ubicado a 0.4 m, los resultados están expresados a continuación en la gráfica 12.

Figura 12. Convergencia de malla.



Como se puede observar la convergencia de resultados, comienza con una cantidad de 36 divisiones, lo cual coincide con el método propuesto anteriormente el cual es implementado para evitar el Efecto Nyquist.

Dada la comprobación del método de resolución espacial, es preciso asumir el costo computacional, motivo por el cual utilizamos los recursos de la Universidad Industrial de Santander, que cuenta con un super computador.

El procedimiento que se siguió para lanzar la simulación en el super computador es el siguiente:

- Crear la simulación con mallado en Ansys, y escribir en un archivo. inp
- Mediante el terminal MobaXtrem terminal que corre lenguaje Linux y se conecta remota a él servidor del supercomputador a través de una conexión ssh, mediante un usuario asignado por la universidad.
- Se consultaron los parámetros de lanzamiento para el software ANSYS en la página Web de NeSI.org.nz, la cual es un centro de Super Computación de Nueva Zelanda, donde se puede apreciar las diferentes configuraciones, para este estudio se utilizaron estos parámetros básicos, debido a que el parámetro crítico es la capacidad de almacenamiento junto a capacidad de procesamiento memoria Ram.
- Una vez terminada la ejecución de la simulación, se descarga el archivo. rst el cual cuenta con la solución, y se abre desde la simulación que fue creada en ANSYS, como lectura.
- Para la validación de resultados tomamos los datos obtenidos por Li Zhang en su tesis de doctorado de la UNIVERSIDAD DE PENNSILVANIA, titulada “GUIDED WAVE FOCUSING POTENTIAL IN HOLLOW CYLINDERS” de solución.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 VERIFICACIONES EXPERIMENTALES.

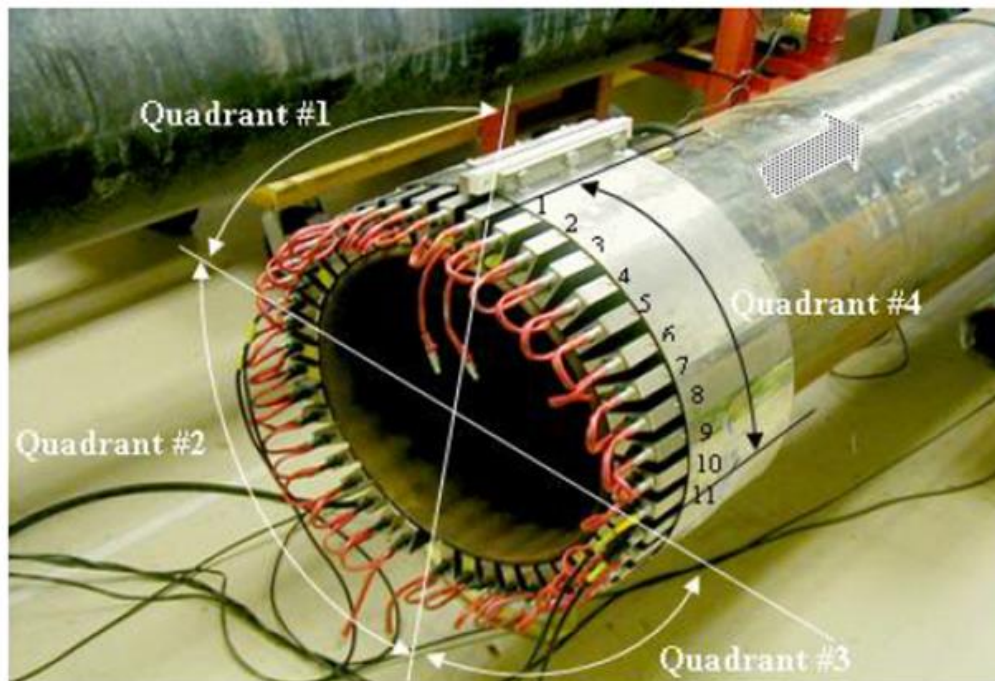
Para la validación de resultados se tomó los datos obtenidos por Li Zhang en su tesis de doctorado de la UNIVERSIDAD DE PENNSILVANIA, titulada “Guided wave focusing potential in hollow cylinders”<sup>34</sup>, donde estudio el potencial de enfoque de ondas guiadas en diferentes situaciones como a través de codos, sobre soldadura, enfoque de matriz en fase, etc.

Los datos tomados de la tesis mencionada cumplen con las características de ser datos de experimentación de laboratorio y de análisis numérico teórico, el cual consiste de perfiles angulares capturados a 162 in (4.1148 m) y 216 in (5.486 m) del punto de excitación, el cual fue generado por un elemento de 90°, circunferenciales sobre la superficie de la tubería de 16” Schedule 30 de acero estructural en la figura 13, se observa los instrumentos empleados para la captación de la onda en el laboratorio, el grupo de ondas fue recibido por un EMAT, la frecuencia de excitación fue controlada por un filtro y las señales recibidas, se mostraban en un osciloscopio, en la figura 14, muestra el sistema de matriz en fase multicanal comercial, TeleTest® usado para la excitación de la onda guiada.

---

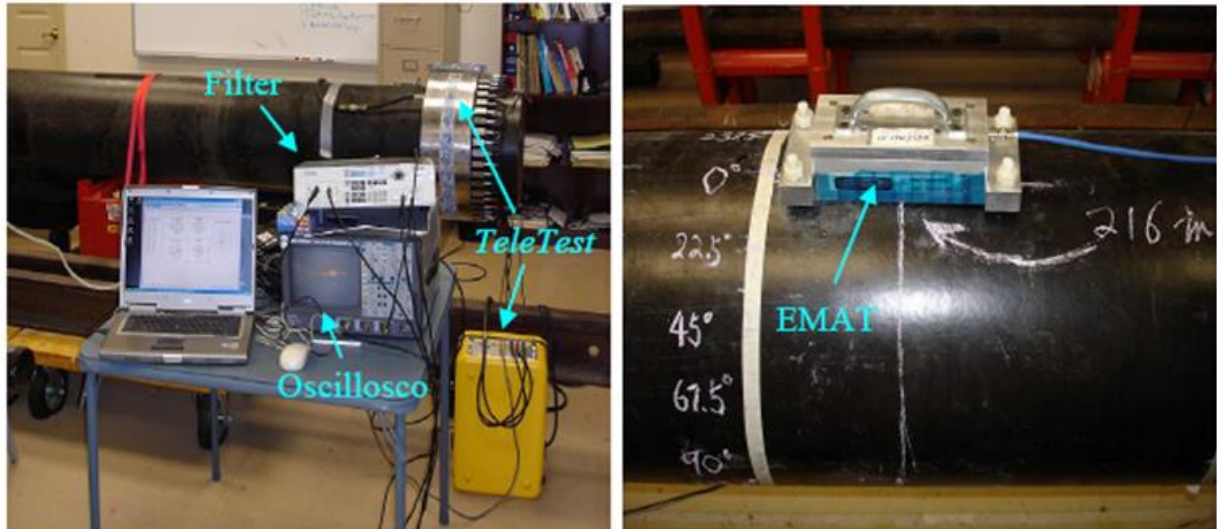
<sup>34</sup> ZHANG, LI. Guided wave focusing potential in hollow cylinders [En línea]. Tesis Doctoral. The Pennsylvania State University, 2005. [Consultado en 1 enero 2022]. Disponible en: <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/6847>.

Figura 13. Herramienta TeleTest montada en tubería de acero cédula 30 de 16", las designaciones de los cuadrantes de 90°, se muestran como referencia.



Fuente: ZHANG, LI. Guided wave focusing potential in hollow cylinders [En línea]. Tesis Doctoral. The Pennsylvania State University, 2005. [Consultado en 1 enero 2022]. Disponible en: <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/6847>.

Figura 14. Configuración experimental para la medición del perfil angular. El Teletest® Se empleó una matriz de transductores ultrasónicos para generar perfiles angulares para torsión, se utilizó un transductor acústico electromagnético (EMAT) como receptor.



Fuente: ZHANG, LI. Guided wave focusing potential in hollow cylinders [En línea]. Tesis Doctoral. The Pennsylvania State University, 2005. [Consultado en 1 enero 2022]. Disponible en: <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/6847>.

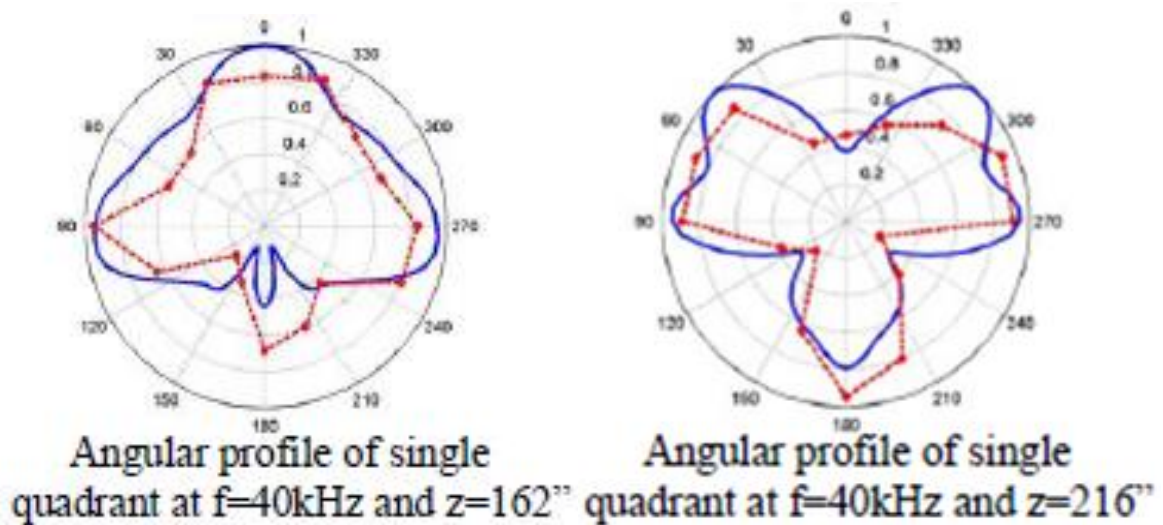
El perfil angular son las deformaciones que sufre la tubería en un determinado punto y tiempo específico, están descritas por la captura de datos en un orden circunferencial de puntos distribuidos equitativamente en la circunferencia de la tubería, a continuación en la figura 15, se observa los datos que se contrastaron mediante la simulación de elementos finitos, mediante el uso del módulo transitorio estructural del software ANSYS, la línea azul representa el análisis numérico teórico y la línea roja representa los resultados de laboratorio presentados por Li y Rose en 2005 <sup>35</sup>.

Para el desarrollo de la simulación se empleó el software de análisis de elementos finitos ANSYS 2020R1, el cual la ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA de la UNIVERSIDAD

<sup>35</sup> ZHANG, LI. Guided wave focusing potential in hollow cylinders [En línea]. Tesis Doctoral. The Pennsylvania State University, 2005. [Consultado en 1 enero 2022]. Disponible en: <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/6847>

INDUSTRIAL DE SANTANDER, cuenta con licencia de ejecución en super computación vigente, anteriormente detallamos los motivos por el cual decidimos implementar el tipo de análisis “Transitorio estructural “, cuyo procedimiento de pos-procesamiento y solución en un supercomputador se puede encontrar en el anexo A.

Figura 15. Perfiles angulares experimentales normalizados en comparación con normalizados perfiles angulares teóricos a 40kHz a  $z = 162''$  y  $216''$ . Sólido azul líneas: perfiles angulares teóricos; líneas discontinuas rojas: perfiles angulares experimentales.



Fuente: ZHANG, LI. Guided wave focusing potential in hollow cylinders [En línea]. Tesis Doctoral. The Pennsylvania State University, 2005. [Consultado en 1 enero 2022]. Disponible en: <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/6847>

En las figuras 16, se muestran los resultados de desplazamiento capturados a una distancia desde el punto de excitación de 4.1148 m por 18 nodos distribuidos circunferencialmente cada  $20^\circ$ .

Se Escriben los resultados de los grupos de ondas en un Excel y desarrolla una gráfica polar con los valores en el momento que la velocidad torsional pasa sobre los nodos, coincide con los picos más altos que se observan en la anterior figura 16, y en la figura 17, siguiente, podemos observar los valores de los nodos dispuestos

circunferencialmente cada 20°, en el instante de  $t=0.0013850$  Sg y en la gráfica polar se observa dichos valores.

Figura 16. Amplitud vs tiempo, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo.

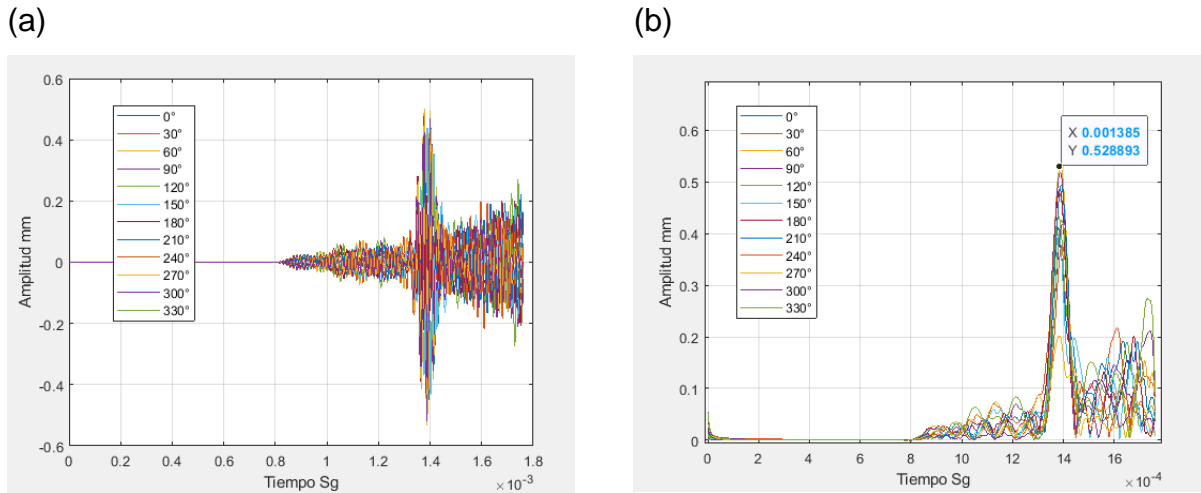
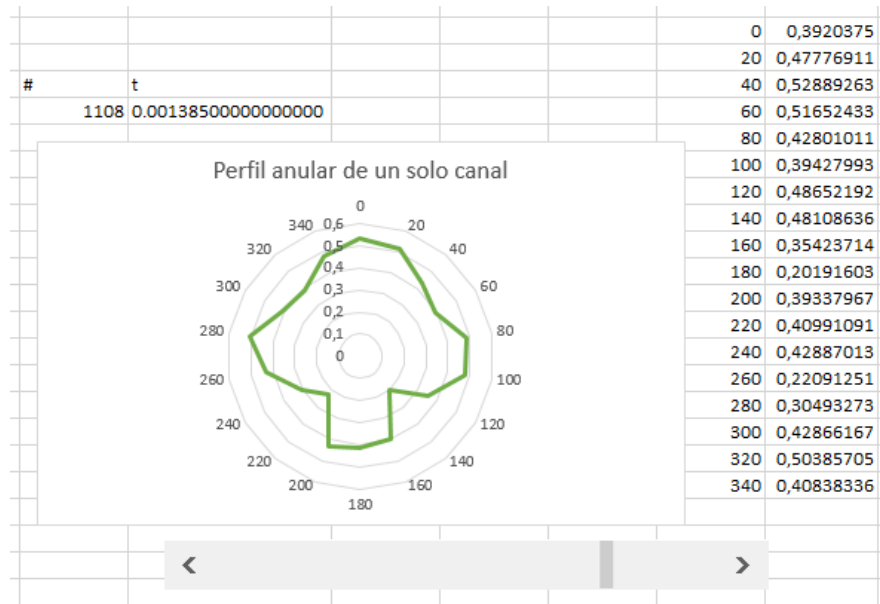


Figura 17. Método de figura polar.



En la gráfica 18, se puede observar, el perfil angular a una distancia de 162” y a continuación en la figura 19, se observa la superposición de los datos de experimental y teóricos, con los de la simulación FEM.

Figura 18. Perfil angular a 162 in (4.1148 m).

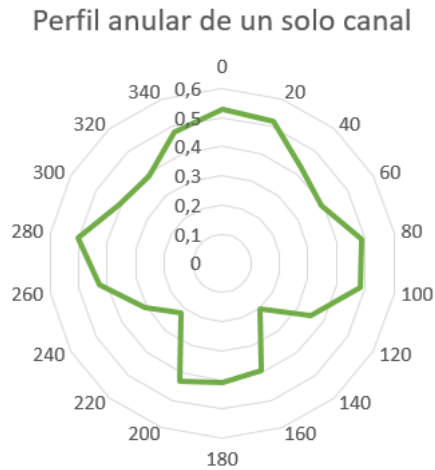
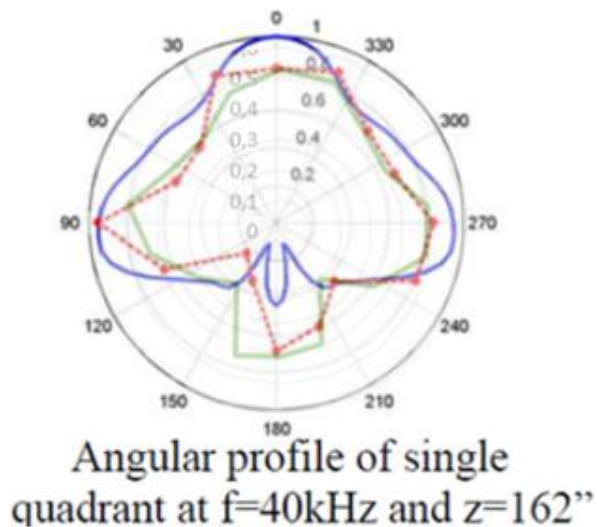


Figura 19. Comparación de perfiles angulares experimentales (rojo), perfil teórico (azul) y perfil de simulación FEM (verde) a 162 in (4.1148 m).



De la misma manera, en la gráfica 20, se observa el perfil angular a una distancia de 162” y a continuación en la figura 21, se puede ver la superposición de los datos de experimental y teóricos, con los de la simulación FEM.

Figura 20. Perfiles angulares a 216 in (5.486 m).

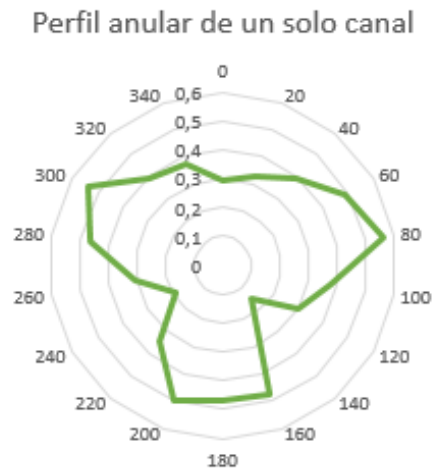
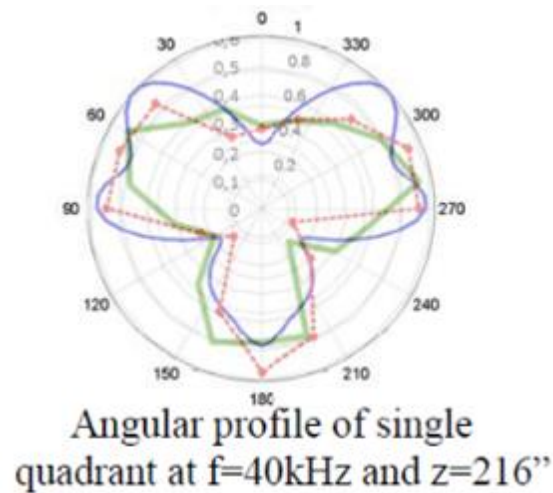


Figura 21. Comparación de perfiles angulares experimentales (rojo), perfil teórico (azul) y perfil de simulación FEM (verde) a 216 in (5.486 m).



En las gráficas 19 y 21, se sobreponen las señales de Li Zang obtenidas experimentalmente y mediante análisis teórico de azul y rojo respectivamente, y los

resultados de elementos finitos de ANSYS de color verde, donde se aprecia una aproximación de los perfiles de elementos finitos y experimentales, los cuales en algunos puntos coinciden y en otros puntos se acerca al mismo valor, es posible que, alguno de los datos no estén ubicados estrictamente y los ángulos perteneciente a la ubicación de los nodos no coincidan con los ángulos asignados en el Post-Procesamiento, y por lo general se puede determinar que el análisis de elementos finitos son aproximados a la experimentación en laboratorio.

#### 4.2 COMPARACIÓN DE ENTRE MODO AXIAL Y NORMAL DE EXCITACIÓN.

Figura 22. Métodos de excitación, (a) normal y (b) axial.

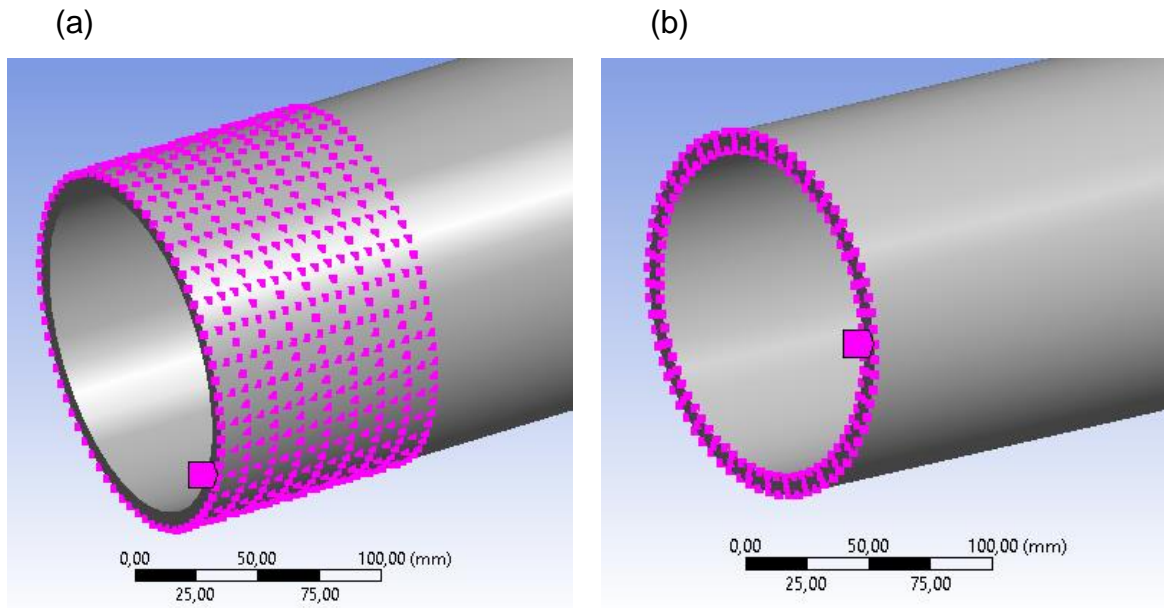
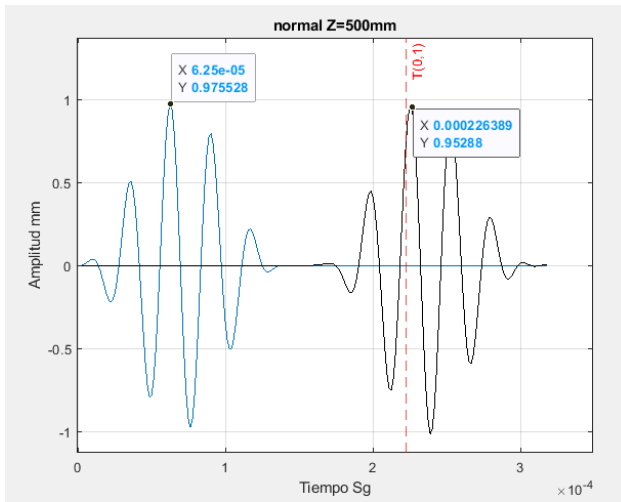


Figura 23. Amplitud vs tiempo, (a) normal, (b) axial.

(a)



(a)

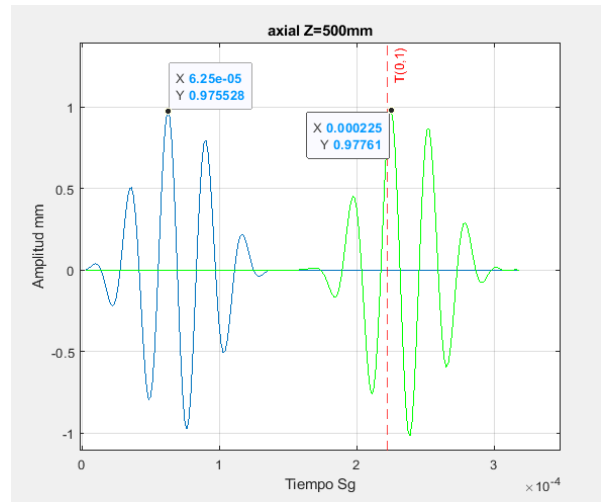
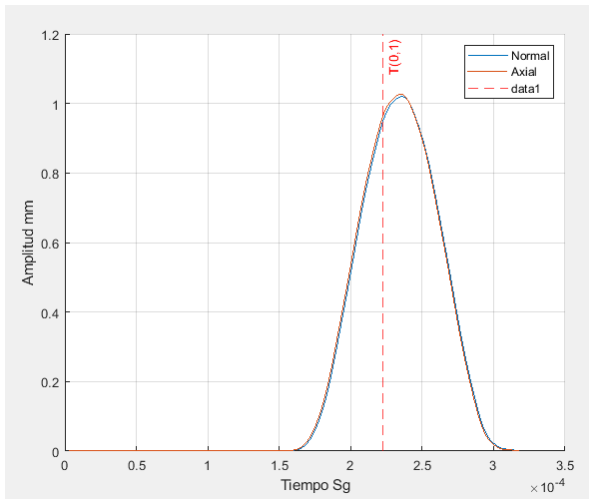
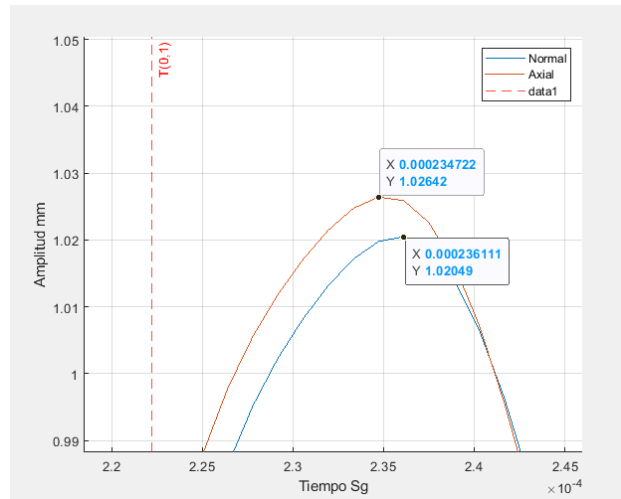


Figura 24. Amplitud vs tiempo, (a) comparación de velocidad de grupo, (b) Detalle de comparación de velocidad de grupo.

(a)



(b)



En este ensayo, examinaremos las diferencias de la excitación axial y la excitación normal expansiva como se muestra en la figura 22, comparando en misma tubería de diámetro 6" sch 40 excitadas a una frecuencia de 36kHz, y se tomaron los datos de desplazamiento de un nodo ubicado a 0.5m de distancia.

En la figura 22, se muestran las superficies de excitación normal (a), con una longitud de 0.1 m y la superficie axial (b), el cual es la totalidad de la cara axial de la tubería, en la gráfica 23, se muestra los resultados de desplazamiento de un nodo a 0° a una distancia de 0.5m desde el borde del área de excitación.

En la gráfica 24, se observa que existe una leve diferencia de amplitudes entre la velocidad de grupo torsional generada por una excitación axial y normal, en el cual la amplitud generada por la excitación axial es levemente superior a la generada por la excitación normal, cuya diferencia es de 2e-6 mm, esto puede ser debido a que el método normal, los nodos pertenecientes a la circunferencia interna del tubo no hacen parte de los nodos de excitación, y entendiendo que el modo torsional el cual es excitado en este caso, es axialmente simétrico, su propagación es característica al desplazamiento simétrico torsional axial, por lo cual la propagación de este modo es mejor con el método axial, pero las características del modo normal no son despreciables para ser considerado un método no viable, debido que como se observa en este ensayo las diferencias son insignificantes.

A continuación, se evaluarán la velocidad generada por los métodos de excitación axial y normal asimétricos, contrastados por la velocidad teórica.

La velocidad de las señales excitadas, se mide con la diferencia de tiempos entre los puntos máximos de la excitación de la onda y el punto máximo de la señal capturada con la distancia de 0.5 m, la velocidad teórica en este caso debido a la configuración del área de los transductores, el cual tiene una cobertura circunferencial de 360°, excitando un modo asimétrico el cual es el modo torsional, y la velocidad torsional  $V_T$ , está dada por las siguientes ecuaciones:

$$V_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (39)$$

Donde

$G$ : es el módulo de corte

$\rho$ : es la densidad del material (7850 kg/m<sup>3</sup>)

$\nu$ : es el coeficiente de poisson (0.3)

$E$ : es el módulo de Young (2e11)

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \nu)} \quad (40)$$

Entonces,

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2 * \rho * (1 + \nu)}} \quad (41)$$

Remplazando los valores,

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

La velocidad de onda torsional, es el parámetro rector, con el cual evaluaremos el error porcentual de cada método de excitación.

$$\text{error}\% = \frac{V_T - V_S}{V_T} * 100 \quad (42)$$

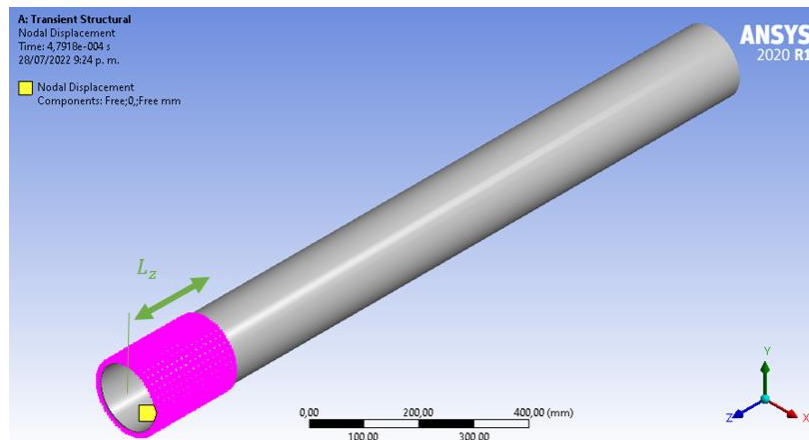
En la gráfica 25, se observa que el error % de los dos métodos es el mismo, el cual es de un 1.7%, el cual es aceptable, también se puede determinar que el método normal expansivo no tiene ninguna desventaja frente al método de excitación axial, pero si, el método expansivo normal presenta una ventaja frente a el método axial debido a la gran capacidad de acceder a cualquier tipo de configuración de tuberías en sistemas de buitroneos.

Figura 25. Cálculo de error porcentual.

v Teorica	3130,35431		Distancia =	0,5		
			tiempo=	0,00015973		
v Normal	3076,92308		Distancia =	0,5	error %	1,70687493
			tiempo=	1,63E-04		
v Axial	3076,92308		Distancia =	0,5	error %	1,70687493
			tiempo=	1,63E-04		

### 4.3 EVALUACIÓN DE DISTANCIAS LONGITUDINALES DE TRANSDUCTORES.

Figura 26. Variación de la longitud sentido longitudinal.



En este ensayo, se examina la distancia longitudinal de un transductor circunferencial de 360° variando desde 0.05m, 0.1m, 0.2m, 0.3m y 0.4m, como se muestra en la figura 26, en tubería de diámetro 6" sch 40 excitadas a una frecuencia de 36kHz, para este ensayo es necesario tener en cuenta la magnitud de la longitud de onda, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación (43), donde  $C_T$ , es la velocidad torsional teórica calculada anteriormente de  $C_T = 3130.35 \text{ m/s}$ ,  $f$  frecuencia longitudinal,  $\lambda$  de onda cuyo resultado es 0.08695429m.

$$\lambda = \frac{C_T}{f} \quad (43)$$

Figura 27. Amplitud vs tiempo, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo.

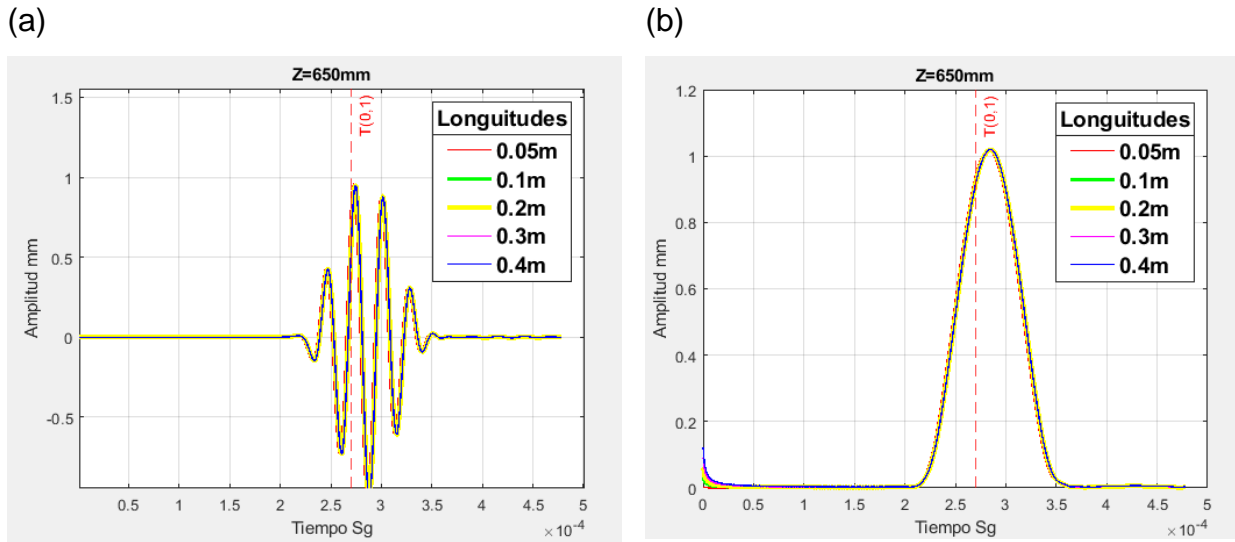
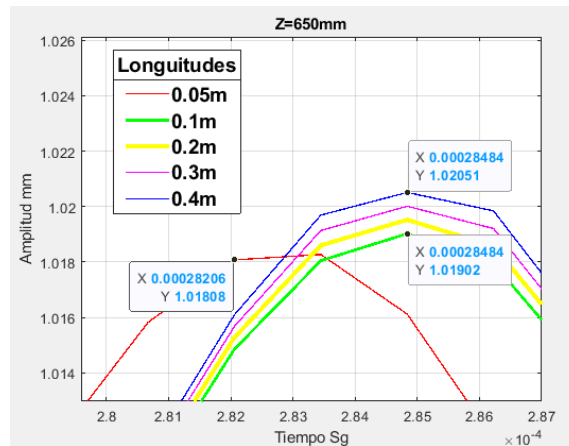


Figura 28. Amplitud vs tiempo, comparación de distancia longitudinal



En la figura 27, podemos observar que por lo general no existen grandes diferencias en la generación de la onda respecto a la longitud de transductor, pero sí, de manera muy específica en la figura 28, podemos ver que la longitud excitada de 0.05m la cual es inferior a  $\lambda$ , se propaga con más rapidez, acercándose a la velocidad teórica deseada, lo que puede ser debido a que a menor longitud de transductor la configuración de la

propagación de la onda torsional, se realiza más rápido, que las de los transductores cuya longitud es superior a  $\lambda$ . Las amplitudes aumentan al aumentar la longitud del transductor, esto debido a que la cantidad de nodos presenten en la excitación de cada caso, aumenta a medida que la cobertura longitudinal del transductor es mayor, generando que más nodos transmitan la energía a la tubería.

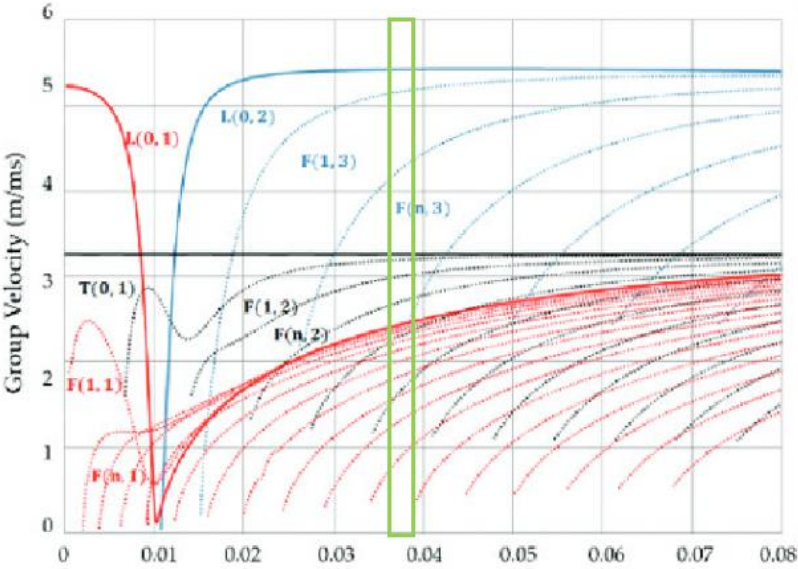
#### **4.4 EVALUACIÓN DE DISTANCIA ANGULAR DE LOS TRANSDUCTORES.**

En este ensayo se examina la carga circunferencial de los transductores variando desde 360°, 180°, 90° y 45°, con una distancia longitudinal de 0.1m como se muestra en la figura 30, en una tubería de diámetro 6" sch 40 excitadas a una frecuencia de 36kHz y se capturan a 0.85 m de distancia, el desplazamiento de 12 nodos distribuidos circunferencialmente.

En la gráfica 29, se observa las relaciones entre la velocidad de grupo de los modos de onda guiada con la frecuencia de excitación y la velocidad de propagación. Se examina, la influencia de carga circunferencial del transductor en la excitación de modos, con el fin de entender como seleccionar de modo para posteriormente hacer focalizaciones locales.

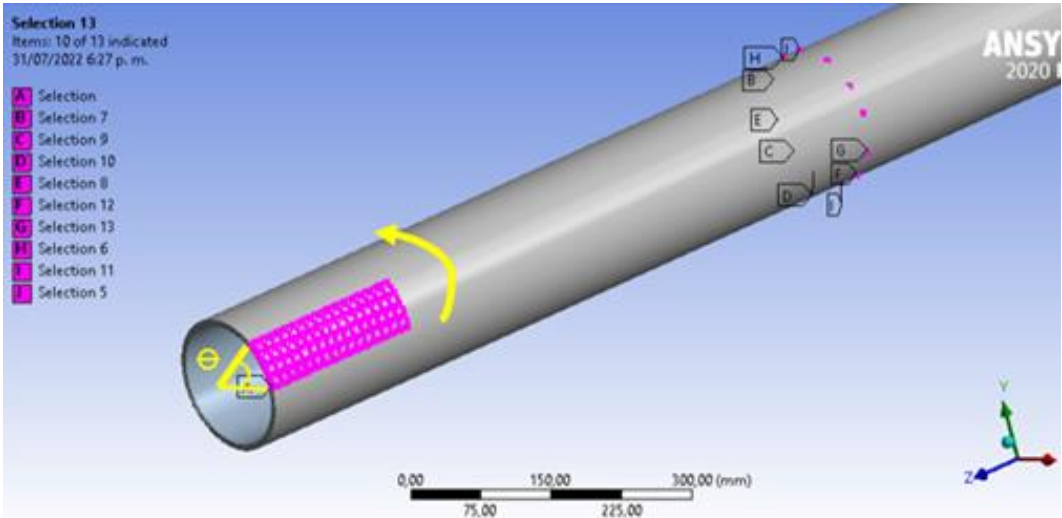
Mediante la implementación de la aplicación de la ecuación 21, en Matlab con las dimensiones de la tubería ya señaladas anteriormente, para figura 31 la amplitud normalizada y los órdenes circunferencialmente generados en la tubería.

Figura 29. Curvas de dispersión para tubería de acero estructural de 6 pulgadas cédula 40 mostrando la relación entre la velocidad de grupo y la frecuencia para diferentes modos.



Fuente: DHUTTI, Anurag & LOWE, Shehan & GAN, Tat Hean. (). Monitoring of Critical Metallic Assets in Oil and Gas Industry Using Ultrasonic Guided Waves. 201910.5772/intechopen.83366.

Figura 30. Variación angular de la carga.



**4.4.1 Carga circunferencial de 360°.** A continuación se muestra la relación teórica de los órdenes circunferenciales excitados por un transductor con una carga circunferencial de 360°, en la figura 31, donde se observa que solo es excitado el orden circunferencial  $n=0$ , este orden circunferencial es característico de una propagación asimétrica, en la figura 32, se observan los resultados de desplazamiento de los 12 nodos, donde se puede observar que el tiempo en el que pasa la mayor amplitud sobre los 12 nodos coinciden con el tiempo de la velocidad del modo torsional. Adicionalmente, en la gráfica 32, se muestra el desplazamiento angular sufrido por los nodos del espesor a la misma distancia de captura.

Figura 31. Amplitud normalizada de los órdenes circunferenciales para una carga de 360°.

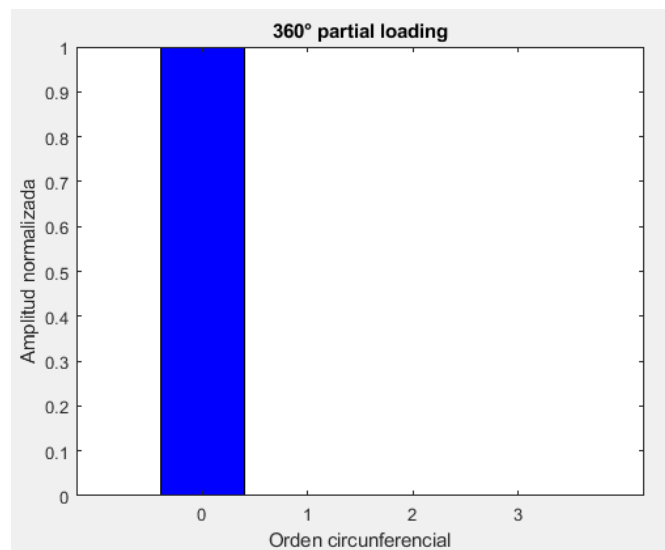
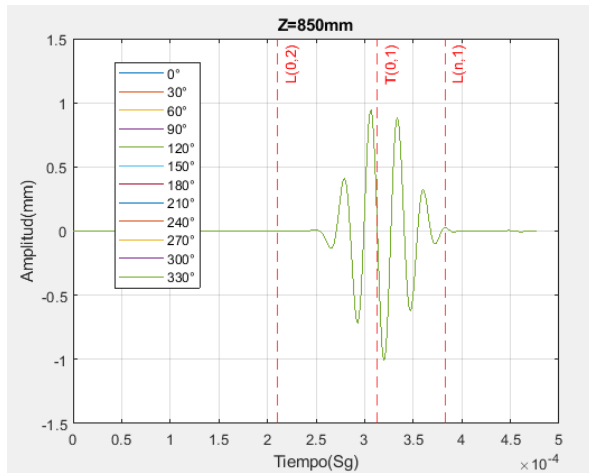
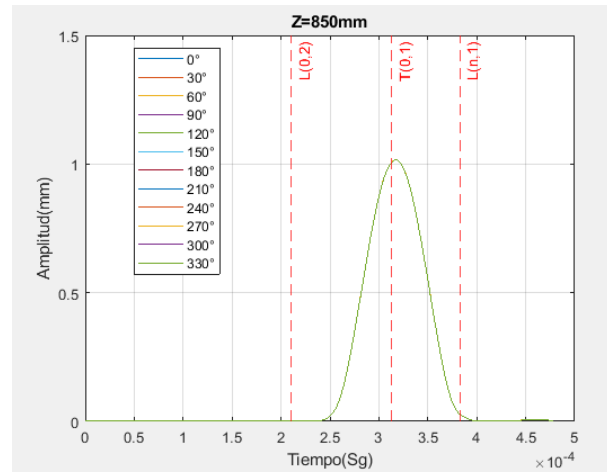


Figura 32. Amplitud vs tiempo de 18 nodos, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo.

(a)



(b)



**4.4.2 Carga circunferencial de 180°.** En la figura 33, de amplitud normalizada vs orden circunferencial, con una carga de 180° teórica, aparece ahora dos ordenes circunferenciales nuevos, el orden  $n=1$  y  $n=3$ , contrastando esta información podemos ver en la figura 34, donde, estan graficadas los desplazamiento de los 18 nodos, pero de manera mas detallada, en la figuras 35 y 36 donde estan graficadas los nodos presentes a 0°, 90°, 180° y 270°, se puede observar que la mayor amplitud esta presente tal y como en la figura 34 expresa, que el nodo de orden  $n=0$ , el modo axisimetrico debe ser el de mas amplitud, en este caso el modo torcional.

Tambien podemos ver, que antes de la llegada del modo torcional, se observa con una pequeña amplitud la presencia, de posiblemente el modo  $F(3,3)$ , debido que contrastado con la información de la figura 46, este modo estaría entre la velocidad  $L(0,2)$  y velocidad  $T(0,1)$ , y según la figura 50, este orden circunferencial tendrá la menor amplitud presente en la tubería con esta configuracion de excitación, lo cual ubican este modo, anterior a la llegada del modo torcional, de igual forma pordemos ubicar el modo  $L(1,1)$ , el cual llegaria posterior a la velocidad  $L(n,1)$ .

Figura 33. Figura 50. Amplitud normalizada de los órdenes circunferenciales para una carga de  $360^\circ$ .

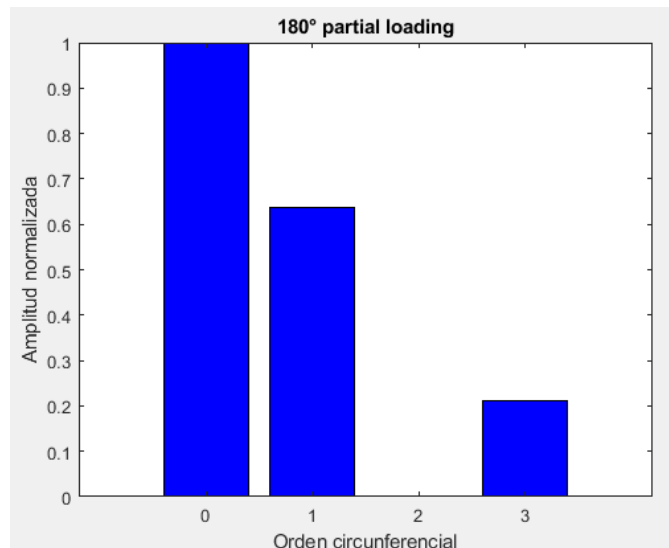
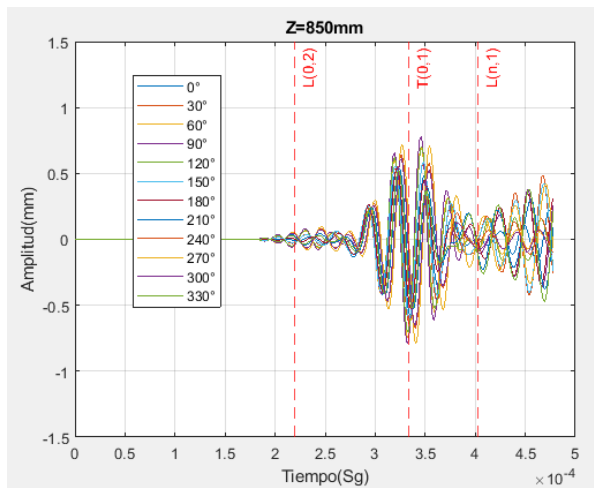


Figura 34. Amplitud vs tiempo de 18 nodos, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo.

(a)



(b)

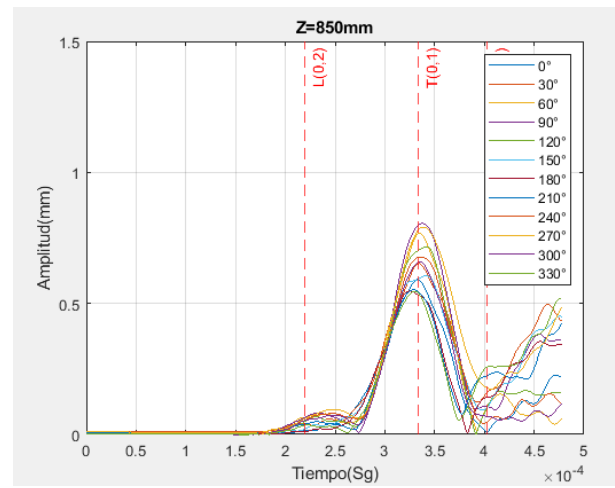


Figura 35. Amplitud vs tiempo de nodos en posición, (a)  $0^\circ$ , (b)  $90^\circ$ .

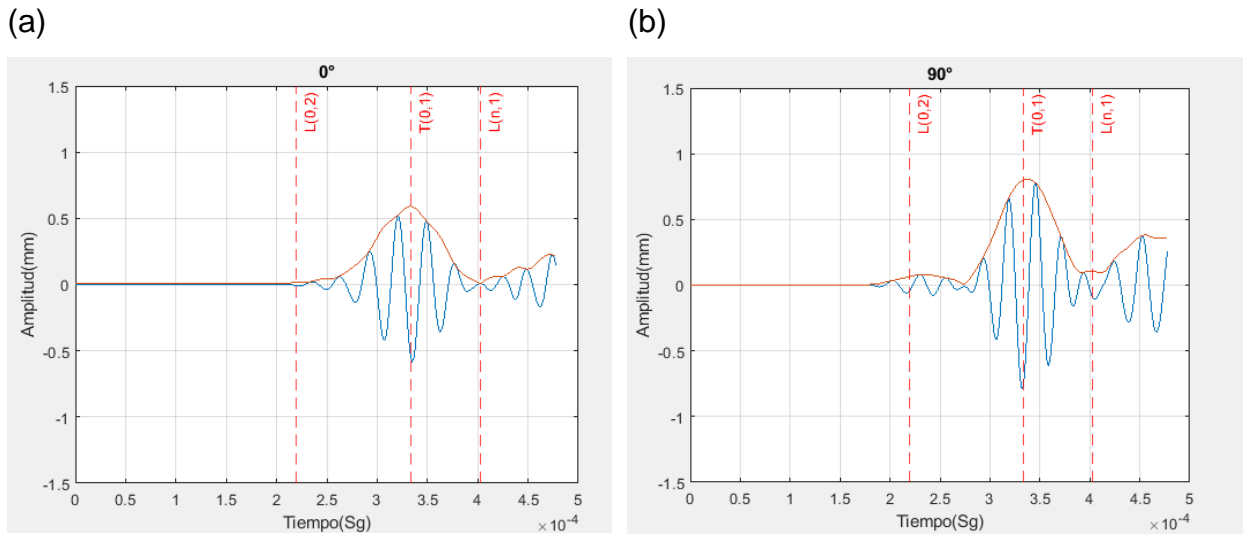
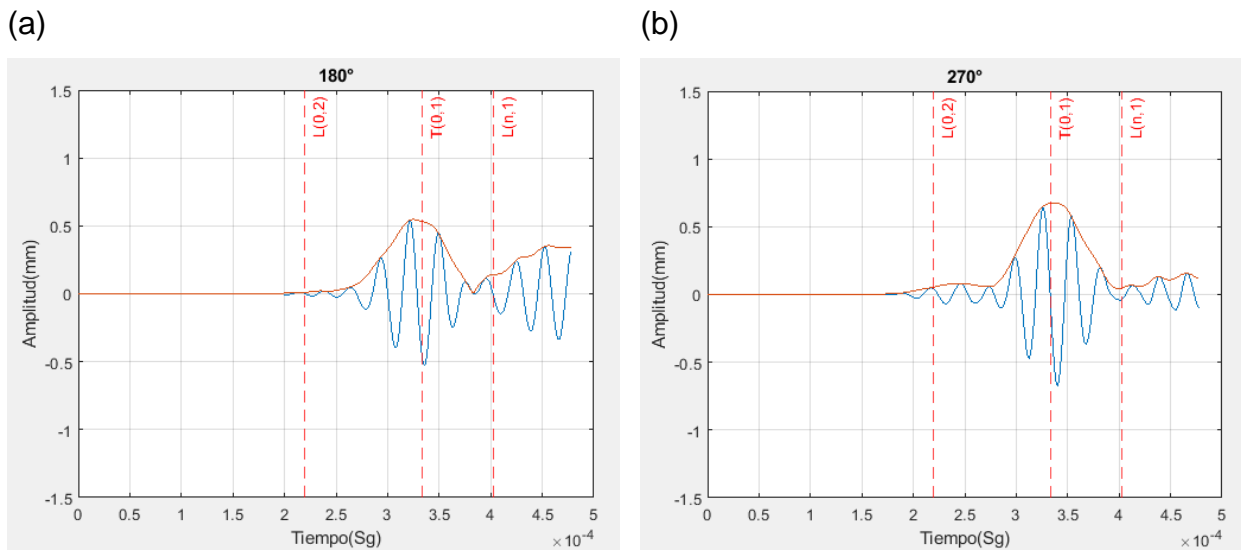


Figura 36. Amplitud vs tiempo de nodos en posición, (a)  $180^\circ$ , (b)  $270^\circ$ .



**4.4.3 Carga circunferencial de  $90^\circ$ .** En la figura 54, de amplitud normalizada vs orden circunferencial, con una carga de  $90^\circ$  teórica, aparece ahora un orden circunferencial nuevo, el orden  $n=2$ , el cual, según la figura 54 tiene una amplitud intermedia entre la amplitud mas grande y la segunda mas pequeña, que con junto a la información de la figura 29, podemos ubicar este orden circunferencial en las figuras 38, 39 y 40, posterior a la llegada del modo  $L(n,1)$ , tambien vemos que la duración de la simulación fue

insuficiente para tener los datos completos para el análisis, debido a que la simulación se realizo con el tiempo que tarde en llegar la onda torcional al final de la tubería, para evitar fenomenos de convergencia debido a el reflejo de la onda al llegar a la cara axial contraria de la excitación

Figura 37. Amplitud normalizada de los órdenes circunferenciales para una carga de 360°.

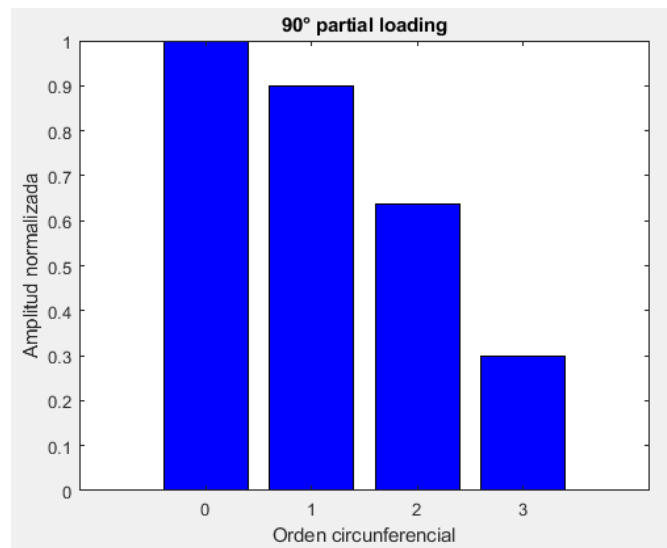
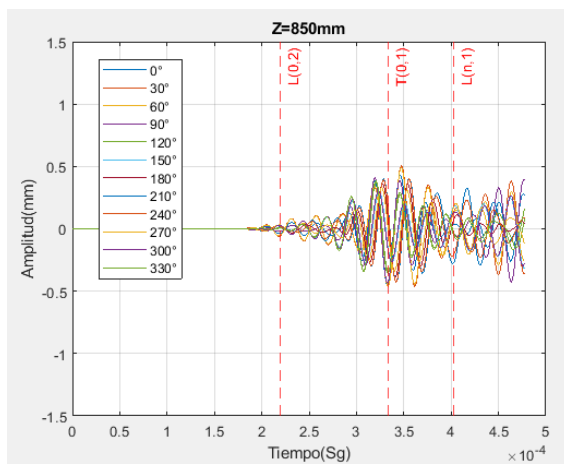


Figura 38. Amplitud vs tiempo de 18 nodos, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo.

(a)



(b)

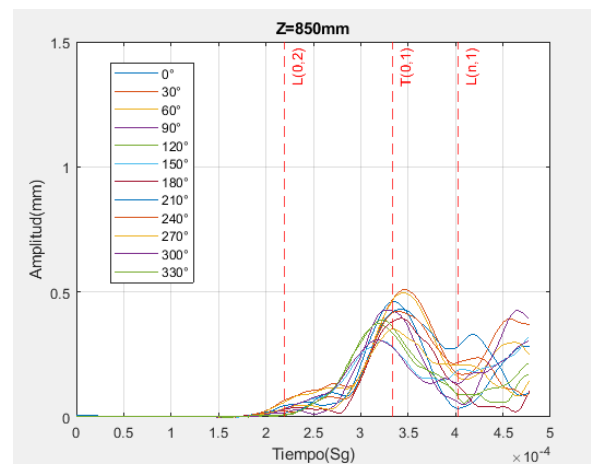


Figura 39. Amplitud vs tiempo de nodos en posición, (a)  $0^\circ$ , (b)  $90^\circ$ .

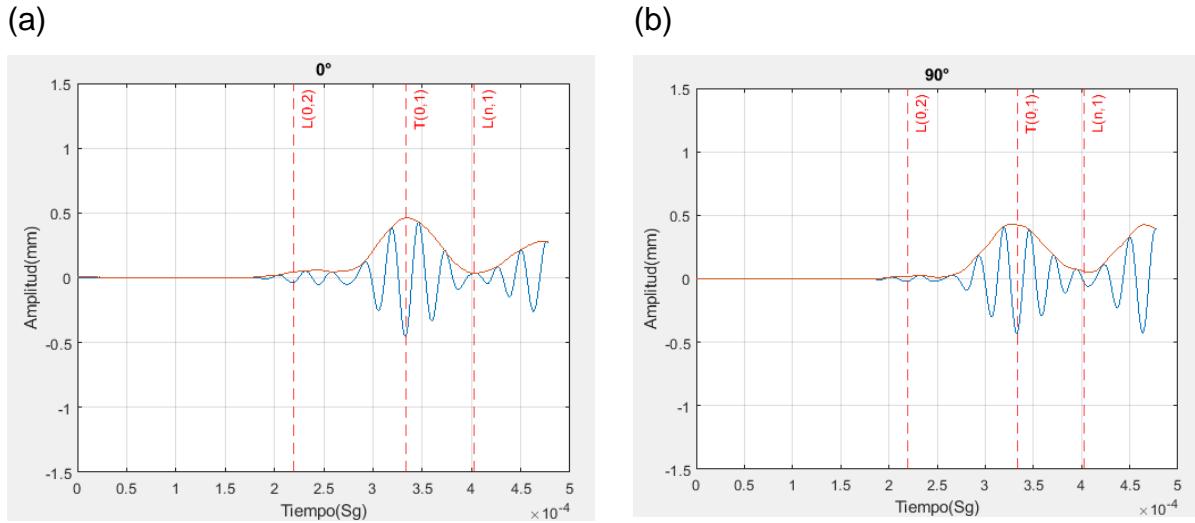
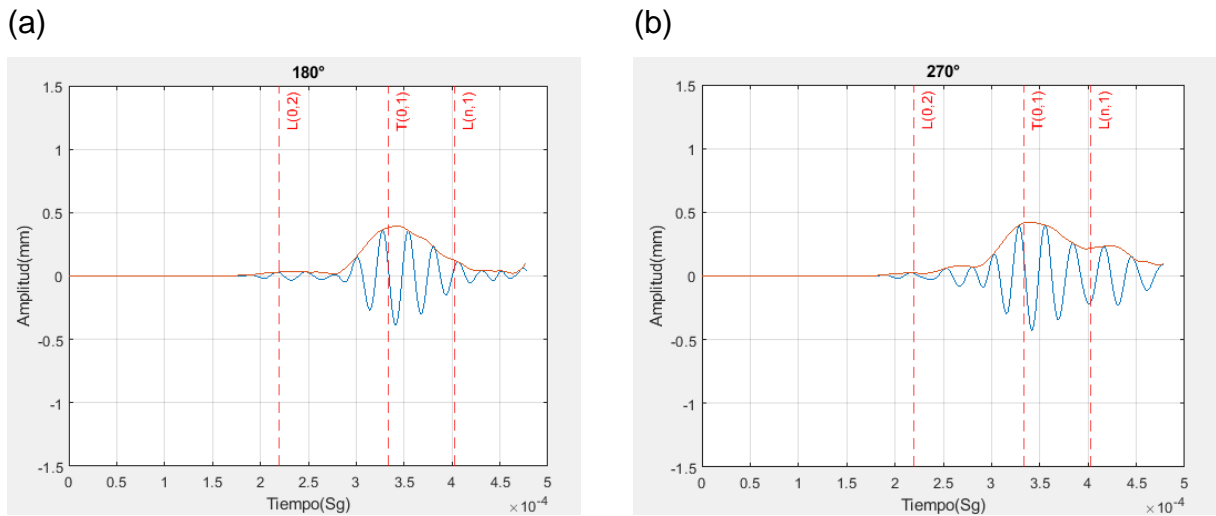


Figura 40. Amplitud vs tiempo de nodos en posición, (a)  $180^\circ$ , (b)  $270^\circ$ .



**4.4.4 Carga circunferencial de  $45^\circ$ .** En la figura 41, de amplitud normalizada vs orden circunferencial, con una carga de  $45^\circ$  teórica, podemos observar que los ordenes circunferenciales tienen amplitudes normalizadas muy similares, en las figuras 43 y 44, podemos observar mas adetalle, como se pierde la configuracion de campana de la velocidad de grupo, siendo mas dificil identificar los ordenes circunferenciales, debido a que los modos exitados se sobreponen uno sobre otro, ademas que el modo de propagación torsional deseado de excitar, no se identifica claramente, como si lo era con

las cargas anteriores debido que antes este presentaba mayor diferencia de amplitud normalizada a los demás modos.

Figura 41. Amplitud normalizada de los órdenes circunferenciales para una carga de 360°.

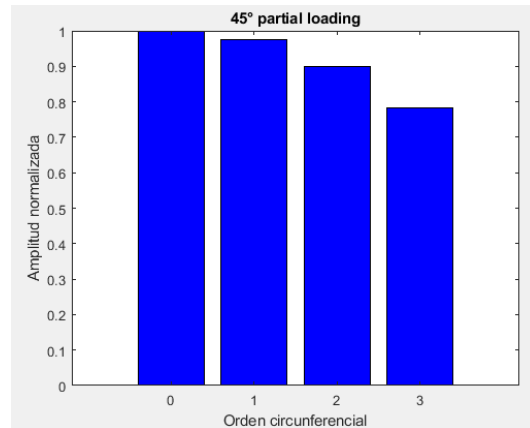
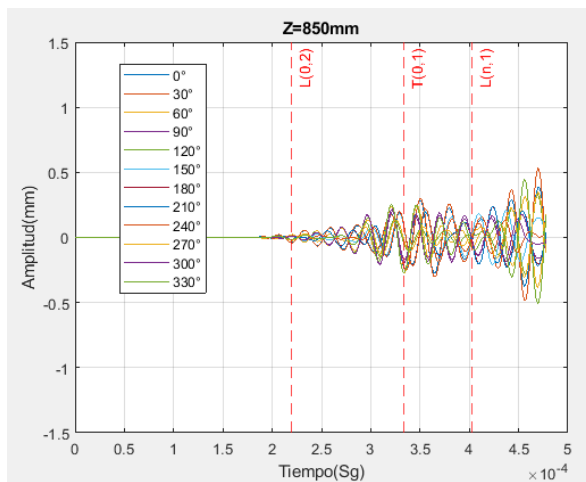


Figura 42. Amplitud vs tiempo de 18 nodos, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo.

(a)



(b)

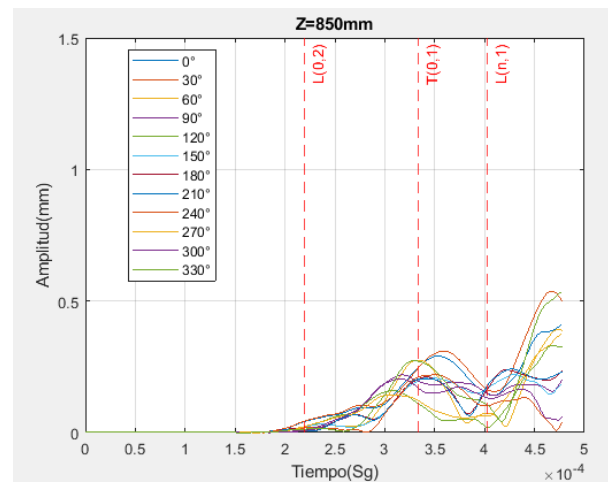
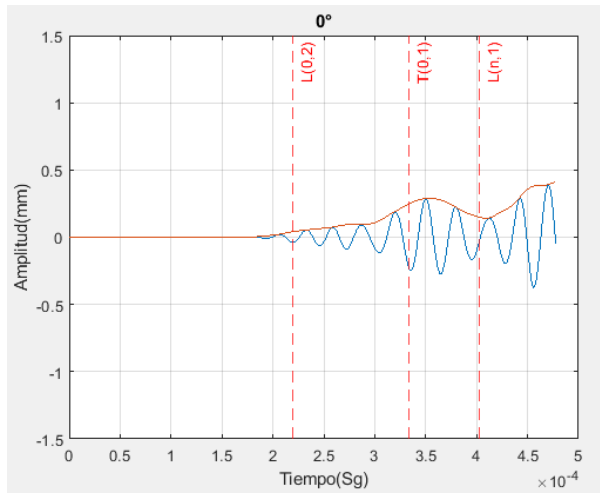


Figura 43. Amplitud vs tiempo de nodos en posición, (a) 0°, (b) 90°.

(a)



(b)

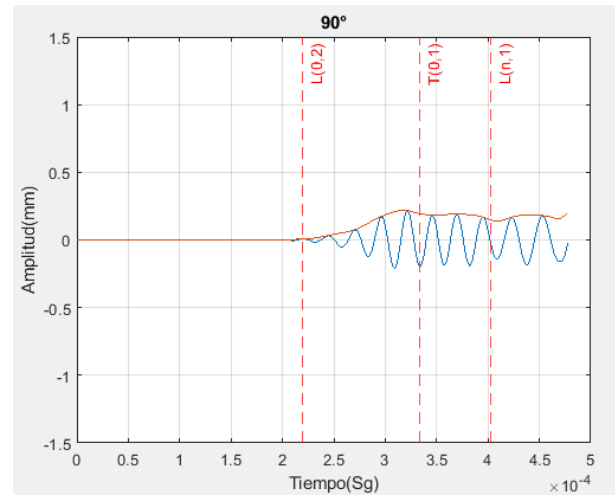
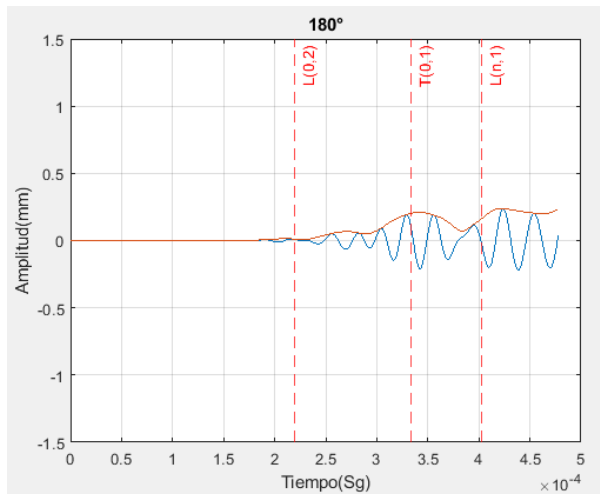
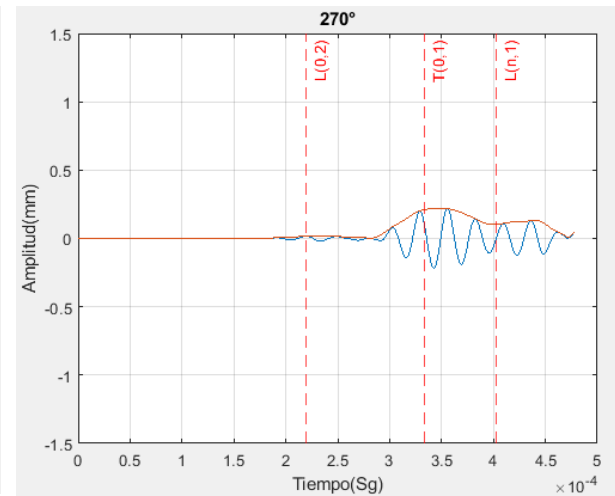


Figura 44. Amplitud vs tiempo de nodos en posición, (a) 180°, (b) 270°.

(a)



(b)

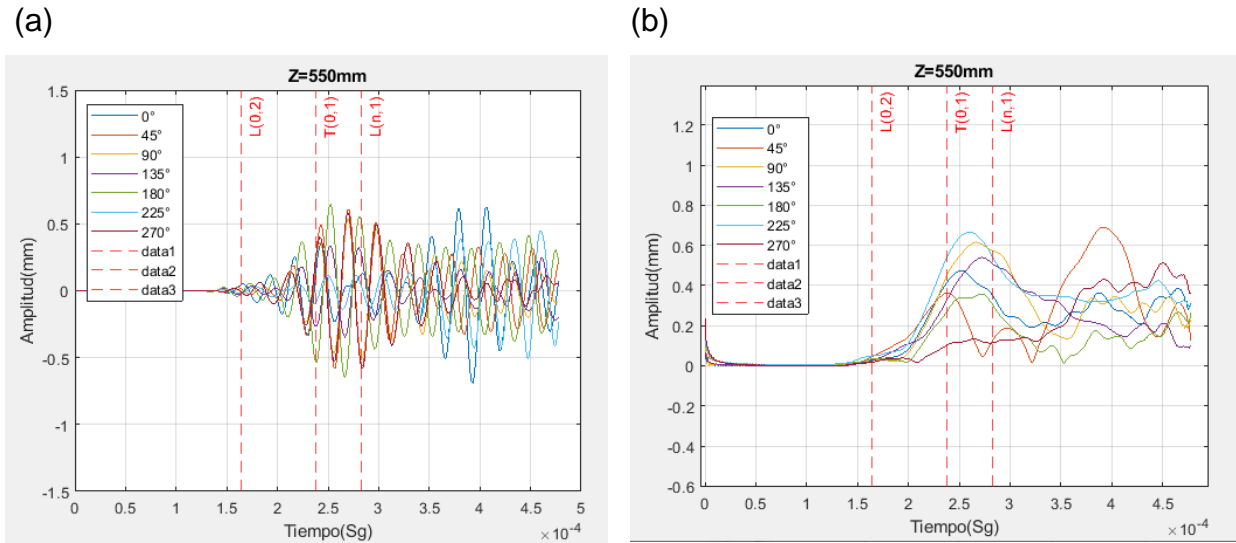


#### 4.5 EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE FOCALIZACIÓN.

En este ensayo, se examina el método de focalización variando el retardo de tiempo y la atenuación de la tubería para lograr focalizar la onda guiada en la ubicación de 0.550m

de distancia longitudinal y con una carga circunferencial de  $90^\circ$  desde el punto superior, en una tubería de diámetro 6" sch 40 excitadas a una frecuencia de 36kHz.

Figura 45. Amplitud vs tiempo de 18 nodos, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo.



Como se observa, la excitación de un solo canal en la figura 45, genera una expansión de modos excitados a lo largo de la tubería de manera desordenada, propagando varios modos de onda, se observa que el instante de tiempo  $t=2.5e-4$  se logra el mayor grado de amplitud.

Para poder tener una noción más clara, se realiza en una gráfica polar este instante como se muestra en figura 46, podemos observar que la mayor cantidad de desplazamiento, generado por un solo canal a una distancia 0.550 mm se focaliza en dirección de  $45^\circ$ , ahora para tener un mejor entendimiento, plasmaremos la construcción del perfil angular en una gráfica cartesiana, para identificar la magnitud de la señal que llega a dicha distancia en determinado tiempo figura 47.

Figura 46. Perfil angular.

Perfil angular de un solo canal Z=550mm



Figura 47. Construcción del perfil angular en coordenadas cartesianas.

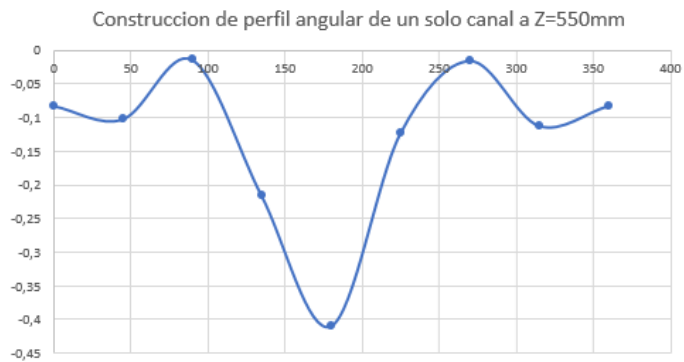
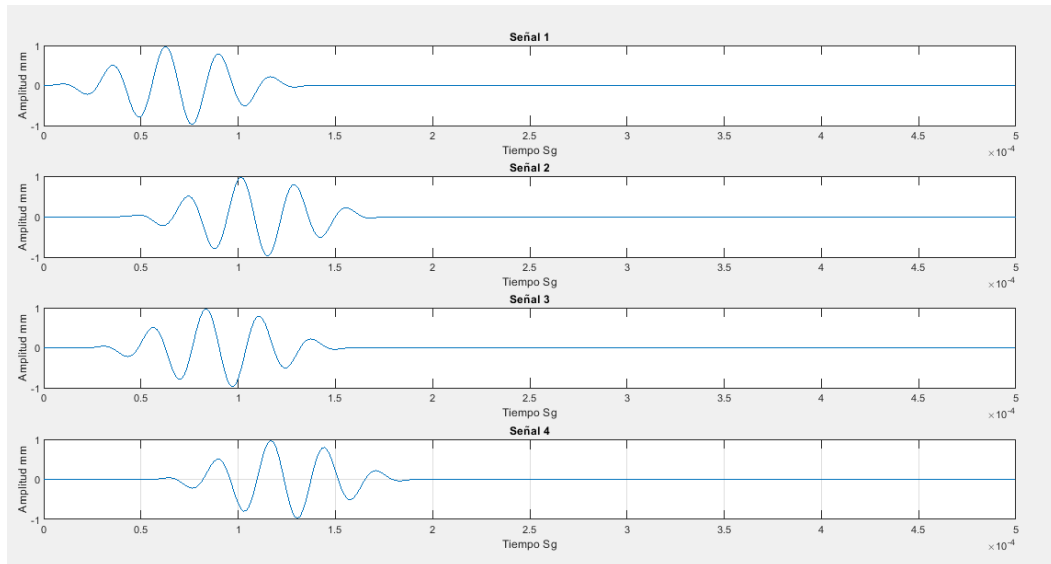


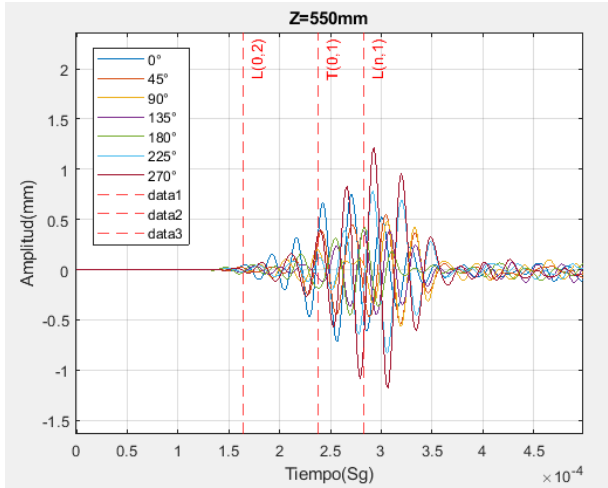
Figura 48. Desfases de los transductores.



Debido a la configuración de carga de 90° sentido circunferencial solo podemos contar con 4 transductores de carga de 90°, a los cuales se les aplico un desfase de excitación, con el fin, que cuando las ondas se expandan en la tubería figura 48, el desfase coincida en la distancia donde se tomaron los datos anteriores, para que se realice convolución como se observa en la figura 49, donde prevaleció un solo modo de propagación eliminando los otros, concentrando la mayor parte de amplitud en dirección de 45° figura 50, de esta forma focalizando las señal, se implementó la ecuación 26 de focalización donde los desfases aplicados fueron para la señal 2  $\Delta t_i=3,80E-05$  en la posición 90°, señal 3  $\Delta t_i=2,08E-05$  en la posición 180° y la señal 4  $\Delta t_i=5,41E-05$  en la posición 270°, todas los desfase de tiempo con respecto a la señal 1 que parte del t=0 y posición 0° figura 48.

Figura 49. Amplitud vs tiempo de 12 nodos, señales con desfase, (a) velocidad de fase, (b) velocidad de grupo.

(a)



(b)

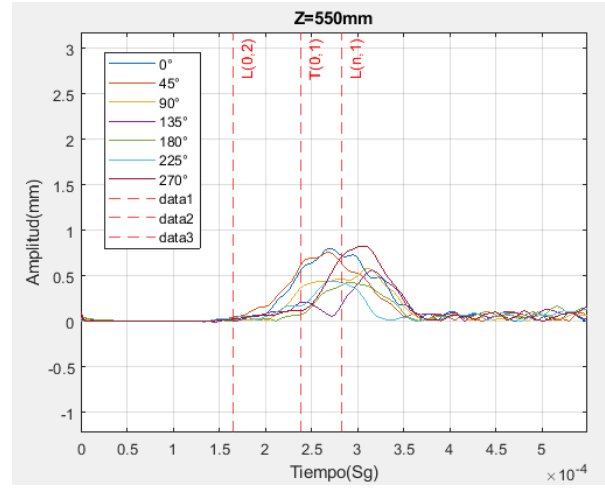
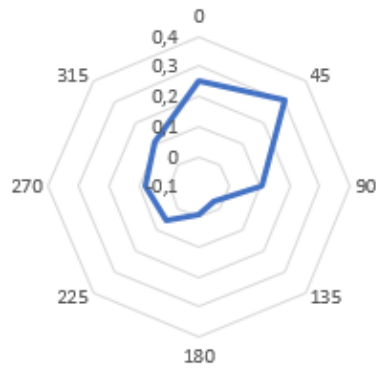


Figura 50. Perfil angular multicanal con desfase.

Perfil angular multicanal con desfase  
enfocado en Z=550mm



## 5. CONCLUSIONES

Se observó que los factores limitantes en la generación de simulación FEM, mediante el uso del software ANSYS, son la frecuencia, dimensiones de la tubería y la velocidad de propagación del modo más lento, las cuales generan que la capacidad computacional de un computador convencional sea insuficiente, siendo necesario para algunas simulaciones contar con la capacidad de un super computador para poder ejecutar la solución de la simulación.

Se observó mediante el análisis de convergencia los valores de frecuencia espacial y temporal los cuales corresponden con lo reportado en la literatura. Se observó que la velocidad teórica de propagación del modo torsional y la velocidad entregada en la simulación, dando como resultado de comparación un error porcentual de 1.7%.

Se observó que a medida que la carga de un solo elemento circunferencial de una excitación normal es mayor, los modos no asimétricos desaparecen, también se observa que a partir de una sola carga circunferencial de 45° la diferencia de amplitudes de los modos generados es imperceptibles.

En la comprobación de la ecuación de focalización propuesta por Li Zhang mediante el uso de desfase de tiempo se observó que es un método sencillo de implementar.

## 6. RECOMENDACIONES

Se recomiendan investigar sobre métodos de FEM semi-analíticos con el fin de encontrar un método de simulación, el cual no implique un costo computacional elevado sin sacrificar calidad de resultados.

Existe la posibilidad de generar con más potencial, modos axialmente simétricos con el método normal expansivo usando varios transductores sobre la superficie, con una distribución simétrica entre sí, pero también existe la oportunidad de evaluar el comportamiento de una excitación con varios transductores, pero limitando su distribución en una sola región, imitando las limitaciones reales en la aplicación en el campo real.

Una vez ya comprobado el método de focalización, es pertinente evaluar y comparar con otros métodos las ventajas y desventajas en la detección de fallas mediante el uso del coeficiente de reflexión.

## BIBLIOGRAFÍA

ADAMS, D. Health monitoring of structural materials and components methods with applications, Chichester, England Hoboken, NJ, Chichester, England Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 2007

ALLEYNE D.N. and CAWLEY P.. The long range detection of corrosion in pipes using lamb waves. Review of Progress in Quantitative NDE, 14:2073{2080,1995.

AMAYA NAVAS, O. El desarrollo sostenible y el derecho fundamental a gozar de un ambiente sano. Bogotá: Universidad Externado de Colombia 2012

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO Y GAS. [Sitio web]. Bogotá: ACP, publicaciones infográficas ACP. [Consulta:5dejulio2022]. Disponible en <https://acp.com.co/web2017/es/publicaciones-e-informes/infografias-acp/114-en-camino-de-los-hidrocarburos/file>

AULD, B. A. Acoustic Fields and Waves in Solids (Krieger, Malabar, FL, 1990), Vol. II, pp. 161-162

CHANG, F. K. Design of integrated SHM system for commercial aircraft applications. CHANG F K. 5th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford:Stanford University Press, 2005.

CORTE CONSTITUCIONAL. Sentencia C-449 de julio 16 2015. M.P. Palacio Palacio, J. I.

DITRI J. J. and ROSE J. L., "Excitation of Guided Wave Modes in Hollow Cylinders by Applied Surface Traction," J. Appl. Phys. 72~7!, 2589–2597 ~1992!

GAZIS, D. C. "Three dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. Analytical foundation," J. Acoust. Soc. Am. 31, 568–573 ~1959

GIURGIUTIU, V. 2007. Structural Health Monitoring: with Piezoelectric Wafer Active Sensors, Elsevier Science

INAUDI, D. Cost-Benefits Analysis in SHM Projects. 5th international conference on structural health monitoring of intelligent infrastructure (SHMII-5), 2011. 1-9.)

LEE, K., Boufadel, M., Chen, B., Foght, J., Hodson, P., Swanson, et al. The behaviour and environmental impacts of crude oil released into aqueous environments. Ottawa: The Royal Society of Canada.), 2015

LI, J. and ROSE, J.L., "Angular-profile tuning of guided waves in hollow cylinders using a circumferential phased array", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., 49(12),1720-1729 (2002)

LI, J., & ROSE, J. L. Excitation and propagation of non-axisymmetric guided waves in a hollow cylinder. The Journal of the Acoustical Society of America, 109(2), 2001 457–464. doi:10.1121/1.1315290 10.1121/1.1315290

MALVERN. L.E. Introduction to the mechanics of a continuous medium. Prentice-Hall, 1969

MIRSKY I. Wave propagation in transversely isotropic circular cylinders, part 1: Theory. The Journal of the Acoustical Society of America, 37(6):1016{1021,1965

MORSE P.M. and FESHBACH H.. Methods of Theoretical Physics. McGraw-Hill Book Company, 1953

MOSER, F., JACOBS, L. J., and QU, J. Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method. *NDT & E International*, 32(4):225–234 1999

PRENDERGAST, D. P. y GSCHWEND, P. M. Assessing the performance and cost of oil spill remediation technologies. *Journal of Cleaner Production*, 78, 2014 233-242.

QUIROGA MENDEZ, Jabid. Stress monitoring of cylindrical structures using guided waves.[en linea], Tesis Doctoral. Universidad politécnica de catalunya, 2018. [Consultado 25 de julio 2022]. Disponible en: <https://Dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=257495>

RAYLEIGH J.W.S.. The theory of sound. Dover, 1945

RIVAS, Z., SÁNCHEZ, J., TRONCONE, F., MÁRQUEZ, R., LEDO DE MEDINA, H., COLINA, M. et al. Nitrógeno y fósforo totales de los ríos tributarios al sistema lago de Maracaibo, Venezuela. *Interciencia*, 34(5), 2009 308314)

ROSE L., Joseph. Ultrasonic guided waves in solid media. Pennsylvania: Cambridge University Press. p. 79

SIBILIO, E., CIAMPOLI, M., and BECK, J. L. Structural health monitoring by Bayesian updating. (June): 2007 13–16.

SILK MG and BAINTON KF. The propagation in metal tubing of ultrasonic wave modes equivalent to lamb waves. *Ultrasonics*, 17(1):11{19, 1979

USEDA, Maria. Ruptura de oleoductos por interferencia externa, daño ambiental y sostenibilidad en Colombia. *Producción + Limpia*. 13. 2018 7-13. 10.22507/pml.v13n2a1

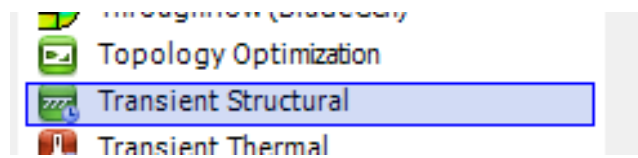
ZHANG, LI. Guided wave focusing potential in hollow cylinders [En línea]. Tesis Doctoral. The Pennsylvania State University, 2005. [Consultado en 1 enero 2022]. Disponible en: <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/6847>.

## ANEXOS

### Anexo A. Procedimiento para correr un programa ANSYS en HPC guane.

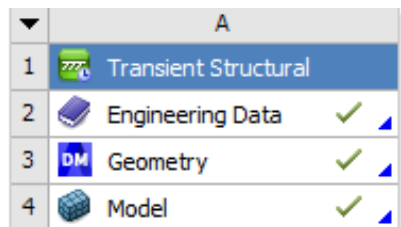
Para el desarrollo de la simulación empleamos el software de análisis de elementos finitos ANSYS 2020R1 el cual la ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, cuenta con licencia de ejecución en super computación vigente, anteriormente detallamos los motivos por el cual decidimos implementar el tipo de análisis “ Transitorio estructural “, este sistema lo podemos encontrar en la ventana de trabajo de Workbench, en el menú de Analysis System que se encuentra la parte superior izquierda, y cuyo icono se puede ver en la siguiente figura 51.

Figura 51. Menú de sistemas de análisis.



Dando doble click sobre el análisis “Transient Structural”, se despliega la siguiente ventana figura 52, donde tenemos que definir los siguientes parámetros

Figura 52. Menú de sistema transitorio estructural.



En “Engineering Data” entraremos a definir los parámetros de las propiedades del material, que para el caso es un acero estructural, cuyas propiedades son: densidad 7850

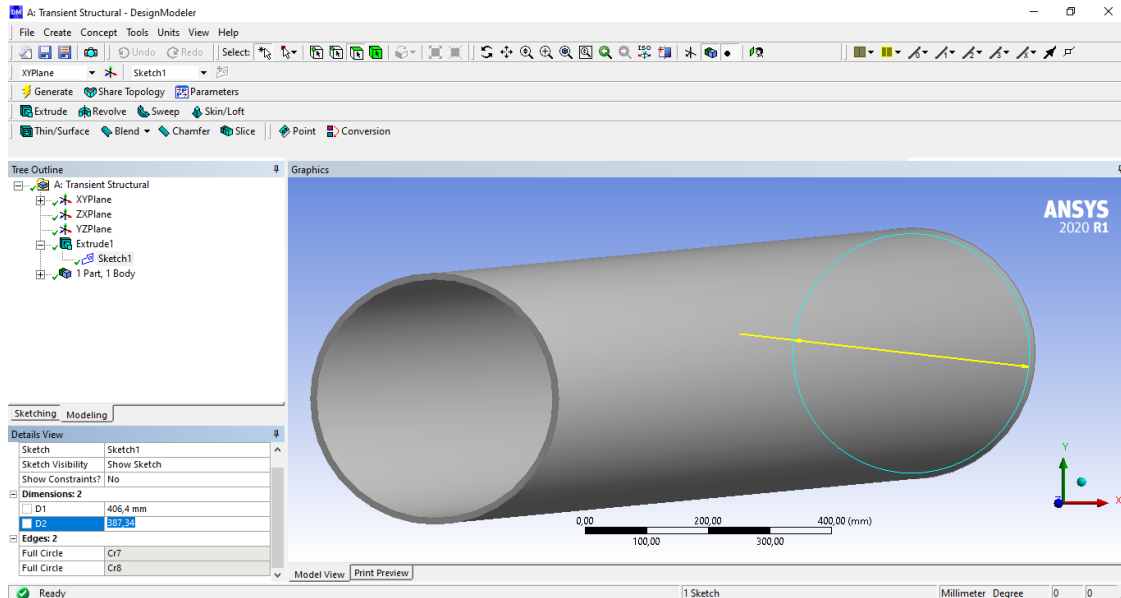
kg/m<sup>3</sup>, un coeficiente de Poisson de 0.3 y un módulo de Young de 2e11 Pa como se muestra en la figura 53.

Figura 53. Datos del material.

Properties of Outline Row 3: Structural Steel					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C <sup>-1</sup>		
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's Modu...			
8	Young's Modulus	2E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0,3			
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
12	Strain-Life Parameters				
20	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa		
21	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa		
22	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa		
23	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		

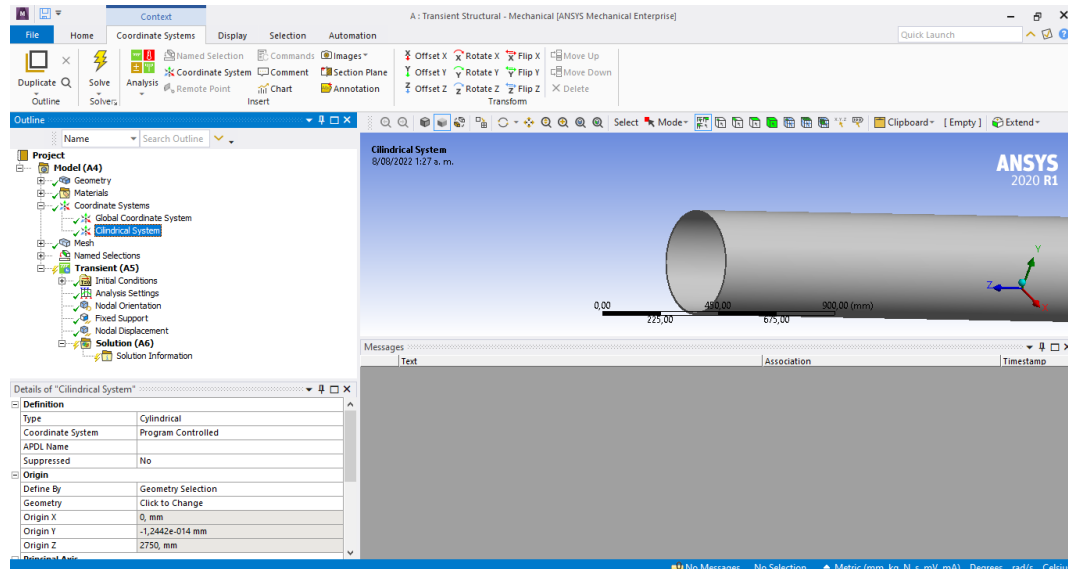
En “geometry”, definiremos los parámetros de la geometría, Workbench nos presenta dos entornos para modelar la geometría de nuestro modelo, seleccionamos, el entorno de Desig Modeler, por la simplicidad de la geometría del modelo, y la simplicidad de cambiar las dimensiones del modelo, en el entorno de Design Modeler, seleccionamos le plano YX donde creamos dos círculos mediante la herramienta Sketching con diámetros de 406.4mm y 387.34mm, luego mediante la herramienta de “Extrude”, creamos el sólido 3D de longitud de 6000 mm como se muestra en la figura 54, datos en mm de una tubería de 16” sch 40.

Figura 54. Interfaz de Design Modeler.



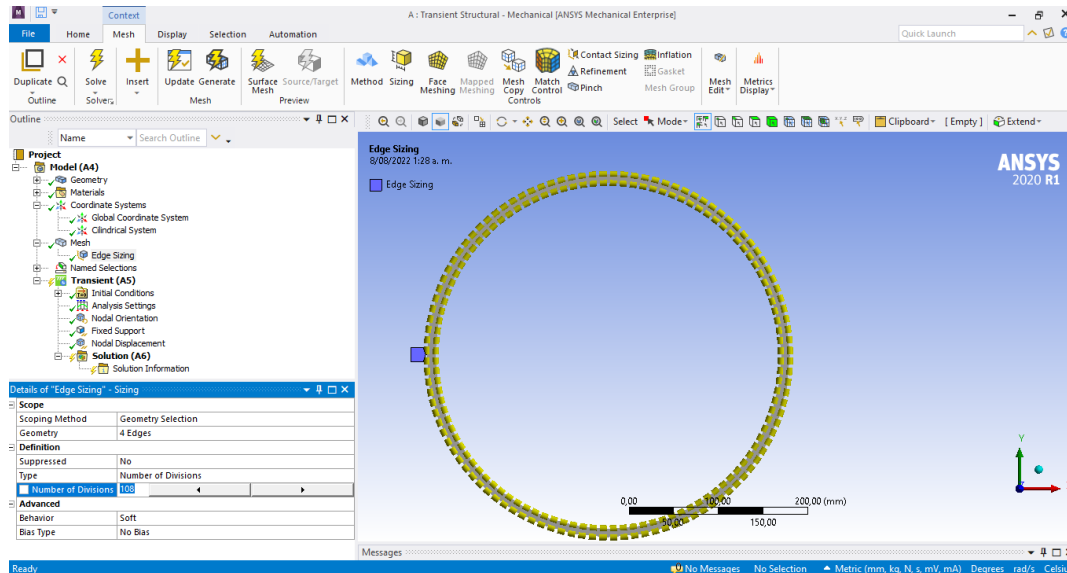
En el entorno “Model”, definiremos las condiciones de contorno y carga, primero debemos definir un sistema de coordenada cilíndricas, debido a que las carga que aplicaremos, es una carga torsional, al igual del desplazamiento que deseamos obtener es en dirección angular, para esto damos click izquierdo sobre Coordinate Systemsy, agregamos un nuevo sistema de coordenadas el cual lo llamamos Cylindrical System, modificando el tipo de sistema a Cilíndrico, como se muestra en la figura 55.

Figura 55. Interfaz de model.



Ahora, definiremos el parámetro del tamaño de malla, en "Mesh" demos click izquierdo y seleccionamos la herramienta de "Edge Sizing" para seleccionar los perímetros del diámetro externo e interno de las dos caras axiales, y como mencionamos, anteriormente, la cantidad de divisiones para una frecuencia de 40kHz es 103.86 el cual lo aproximamos a 108 como de muestra en la figura 56, debido a ser un numero entero múltiplo de 12, se determinó múltiplo de 12 por que es la cantidad de muestras que se tomaran posteriormente.

Figura 56. Particiones de malla.



Definiremos la captura de los nodo sobre la superficie, los cuales tendrán la carga de desplazamiento, utilizando la herramienta de “Named Selections”, crearemos una selección de nodos que llamaremos “TR4” , y utilizando el método de selección “Worksheet”, insertaremos limites que definen el área que ocupa el transductor, de esta forma seccionar los nodos como se muestra en la figura 57, de la misma forma seleccionamos 18 nodos igualmente distribuidos circunferencialmente a una distancia de 5.5m de longitud, los cuales usaremos para capturar los desplazamientos debidos a la excitación.

Ahora definiremos los tiempos de la excitación y de simulación, en la herramienta de “Analysis Settings” definiremos la simulación en 2 etapas, la primera etapa, donde se aplica la señal de ventaneo de ráfaga Hanning, el cual termina en un tiempo=  $0,000125S_g$  y la segunda etapa, es cuando la señal llega al extremo opuesto el cual termina en tiempo=  $0,00191672S_g$  como se muestran en la figura 58, los cálculos son expresados anteriormente.

Figura 57. Captura de nodos para excitación.

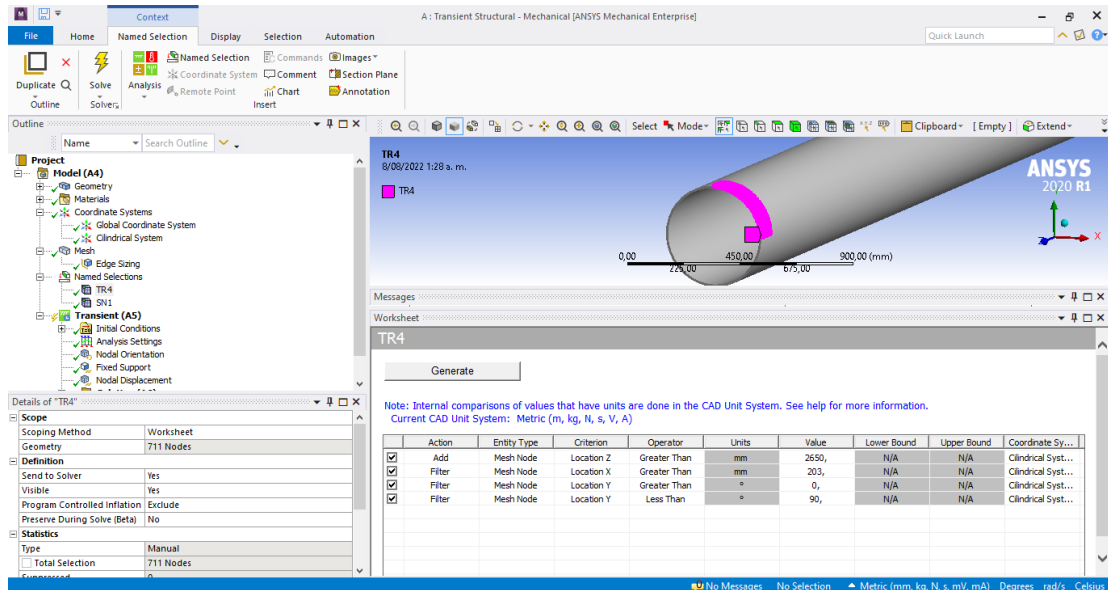
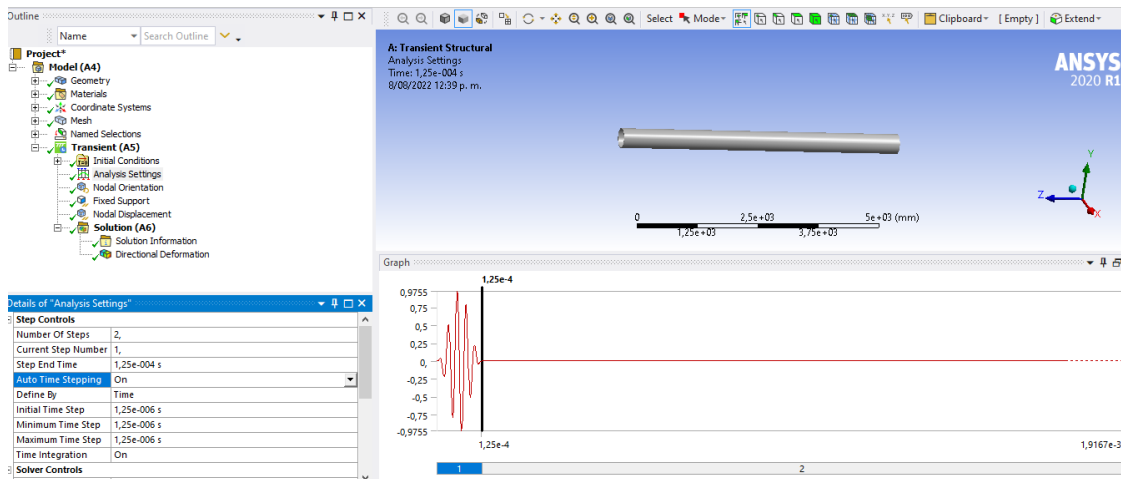
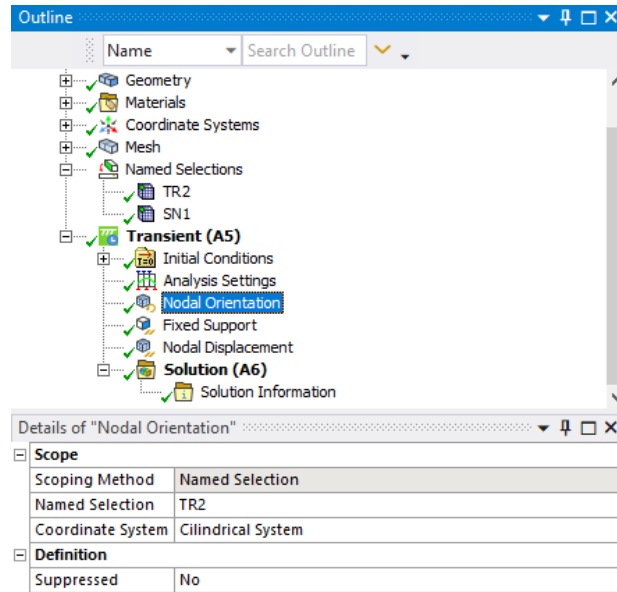


Figura 58. Ajustes de análisis.



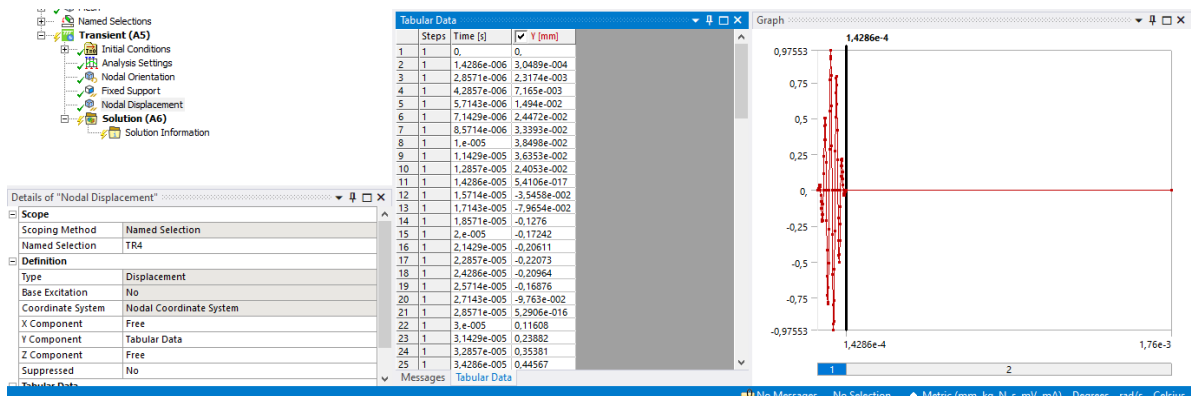
Antes de insertar el valor de las cargas, es necesario insertar mediante la herramienta “Nodal Orientation” el eje de coordenadas que seguirán los nodos con las cargas de excitación el cual es coordenadas cilíndricas como se muestra en la figura 59.

Figura 59. Orientación de nodos.



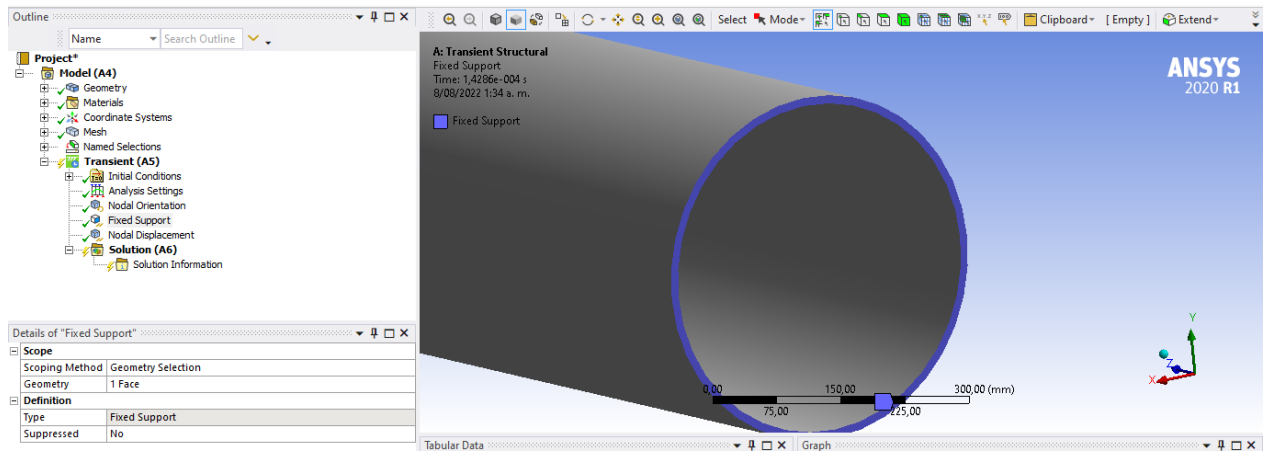
Utilizando la herramienta “Noda displácent”, insertaremos en el componente Y, los valores de tiempo y desplazamiento de la función de ventaneo de ráfaga Hamming, seleccionando el método de selección “Named Seleccion” y seleccionando “TR4”, el cual es el nombre que le dimos a la agrupación de los nodos que ocupa la superficie del transductor como se muestra a continuación en la figura 60.

Figura 60. Introducción de carga en el tiempo.



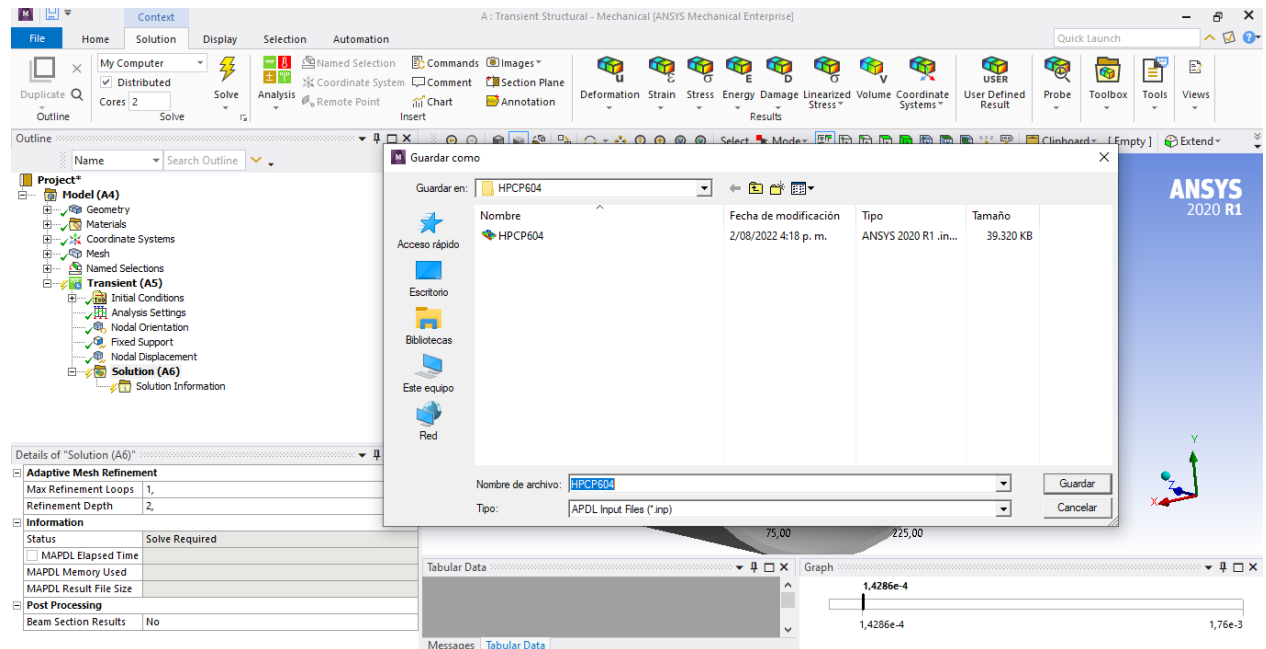
Para las últimas condiciones de contorno mediante la herramienta “Fixed Support” seleccionaremos la cara axial opuesta a la excitación, con el fin de fijarla como punto de no desplazamiento del modelo, como se muestra en la figura 61.

Figura 61. Área soporte, condiciones de contorno.



En resumen, modelamos mediante el análisis de elementos finitos en ANSYS con los parámetros ya señalados, tubería de 16" sch 40 de 5.5m de longitud, acero estructural densidad de 7850 kg/m<sup>3</sup>, un coeficiente de Poisson de 0.3 y un módulo de Young de 2e11 Pa, con una frecuencia de excitación de 40 kHz, con una resolución temporal de 1,25e-6 segundos y un número de divisiones de perímetro de 108 particiones, lo cual género: una malla con 51516 elementos y 361152 de nodos. Debido a el peso de la simulación tuvo que ser ejecutada en un Super Computador (HPC). Para generar la ejecución de la simulación en el HPC se debe crear un documento de salida, el cual se crea en el menú de “solution” en Tools-Write Input file, se guarda la simulación como un archivo. inp como se muestra continuación en la figura 62.

Figura 62. Guardar matriz de malla.



En resumen, el procedimiento para lanzar la ejecución de la simulación en el HPC, es el siguiente, una vez otorgado el usuario para ejecutar trabajos en el HPC por la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, en necesario contar con un terminal de leguaje Linux, que se conecte de manera remota a él servidor del HPC a través de una conexión ssh, en este caso se usó el programa MobaXtrem, una vez, se introdujo el usuario y la contraseña se ejecutan los siguientes comandos, -ssh guane-modele load CAE/ansys/2020r1- con estos comandos, se entra a la plataforma y se carga el módulo de ANSYS, posteriormente con el comando -nano- se abre el archivo y se introduce los comandos que se muestran en la figura 63, se guarda como P11.sh y se lanza mediante los siguientes comandos sbatch P11.sh.

Figura 63. Código de lanzamiento de ANSYS en el HPC.

```
#!/bin/bash
#SBATCH --partition=normal
#SBATCH --error=ansys1_%.j.err
#SBATCH --out=ansys1_%.j.out
#SBATCH --job-name=---P---
#SBATCH --nodes=1
#SBATCH --gres=gpu:1
#SBATCH --ntasks=2
#SBATCH --ntasks-per-node=2
#SBATCH --cpus-per-task=1
#SBATCH --exclusive
#SBATCH --mail-type=ALL
#SBATCH --mail-andresfcoal@gmail.com

module load CAE/ansys/2020r1

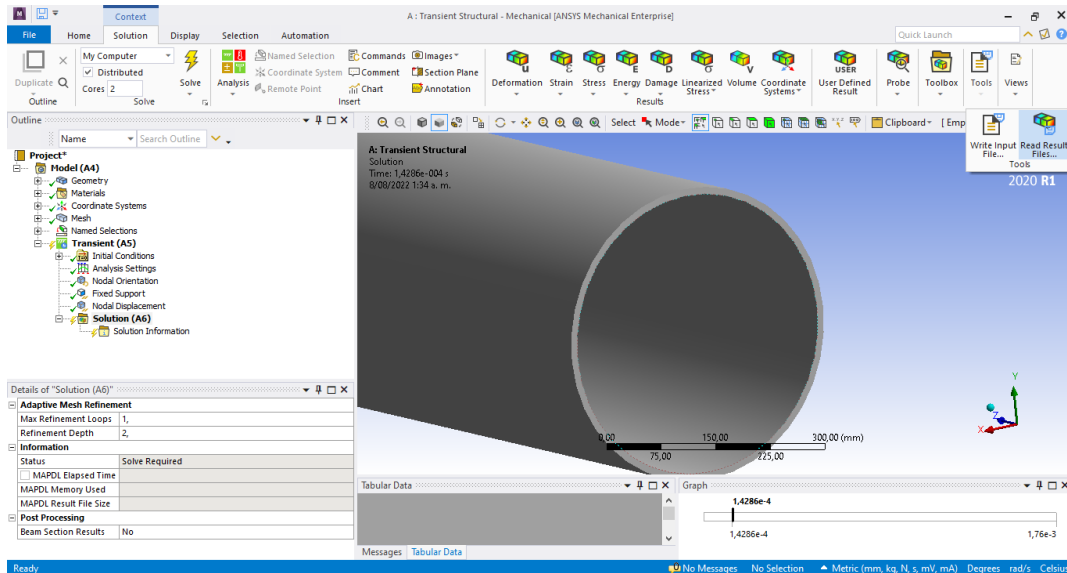
ansys2020r1 -np $SLURM_NTASKS -b nolist -j ansys_slurm -i HPCP603.inp
```

Una vez, se haya terminado la ejecución de la solución tendremos como resultado, un archivo. rst como se muestra en la figura 64, el cual debemos descargar.

Figura 64. Descargar solución del HPC.

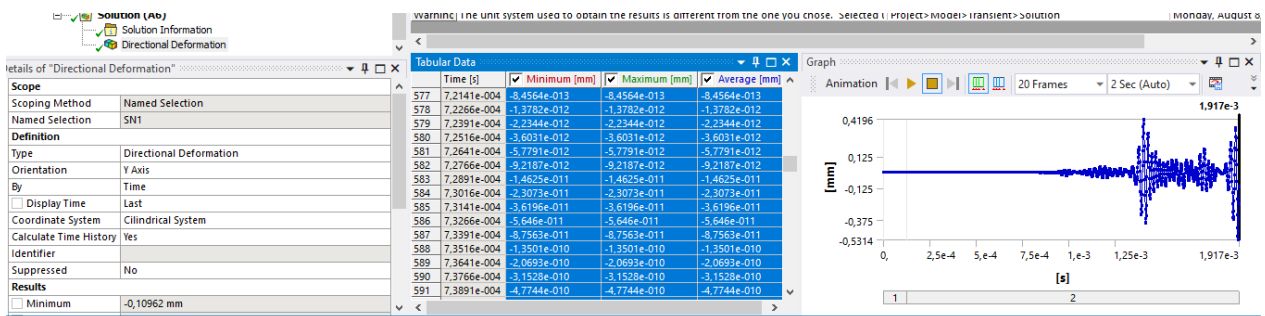
Name	Size (KB)	Last modified	Owner	Group
..				
ansys1_51445.err	1	2022-08-05...	afcorredora	giema
ansys1_51445.out	1 097	2022-08-05...	afcorredora	giema
ansys_slurm.DSP	8 144	2022-08-05...	afcorredora	giema
ansys_slurm.gst	719	2022-08-05...	afcorredora	giema
ansys_slurm.ldhi	342	2022-08-02...	afcorredora	giema
ansys_slurm.mntr	168	2022-08-05...	afcorredora	giema
ansys_slurm.rdb	86 208	2022-08-02...	afcorredora	giema
ansys_slurm.rst	11 283 072	2022-08-05...	afcorredora	giema
ansys_slurm0.rst	48 833 600	2022-08-05...	afcorredora	giema
ansys_slurm1.rst	45 106 880	2022-08-05...	afcorredora	giema
ansys_slurm1.stat	1	2022-08-05...	afcorredora	giema
cleanup-ansys-guane05-1682...	1	2022-08-02...	afcorredora	giema
file.ce	1	2022-08-02...	afcorredora	giema
HPCP603.inp	42 892	2022-08-02...	afcorredora	giema
P11.sh	1	2022-08-02...	afcorredora	giema

Figura 65. Leer solución del resultado en el computador local.



Una vez descargado el archivo solución, mediante el modelo de ANSYS debemos, abrir lo desde el menú “solution”, Tools-Read Result Files como se muestra la figura 65, y esperar a que se cargue la solución.

Figura 66. Lectura de resultados de desplazamiento.



Ahora, observaremos en la figura 66, como obtener los resultados, mediante la herramienta de resultados en el menú de deformación, en deformación direccional, se seleccionamos SN1, que es nodo de los 18 nodos ubicado a 4.1148 m con orientación Y, y coordenadas cilíndricas, tomamos los valores de desplazamiento y los guardamos todos juntos en un archivo Excel.

Figura 67. Código en Matlab.

```
clc; clear;

data=readmatrix("P602-2.xlsx");
t=data(:,2);
fX=data(:,3);
deformaTotal=data(:,7);
deformaTotalT=data(:,11);
s1=data(:,15);
s2=data(:,19);
s3=data(:,23);
s4=data(:,27);
s5=data(:,31);
s6=data(:,35);
s7=data(:,39);
s8=data(:,43);
s9=data(:,47);
s10=data(:,51);
s11=data(:,55);
s12=data(:,59);

polarplot(theta,n(762,:));
grid on;

figure(20)
[up,lo] = envelope(s1);
[up1,lo1] = envelope(s2);
[up2,lo2] = envelope(s3);
[up3,lo3] = envelope(s4);
[up4,lo4] = envelope(s5);
[up5,lo5] = envelope(s6);
[up6,lo6] = envelope(s7);
[up7,lo7] = envelope(s8);
[up8,lo8] = envelope(s9);
[up9,lo9] = envelope(s10);
[up10,lo10] = envelope(s11);
[up11,lo11] = envelope(s12);
[up12,lo12] = envelope(fX);
```

Con Matlab, podemos figurar todas las señales y mediante el comando de “envelope” podemos ver el paquete de ondas guiadas como se muestra en la figura 67.

## Anexo B. Código Matlab para graficar los modos excitados variando carga circunferencial.

```
% Scrip to calculate the ratio of amplitude factor for the first harmonics
% l with respect to the symmetric mode
%alpha is the element size
%l is the number of equally spaced elements
%Delta is the ration between the gap (between elements) and alpha
clear
clc
alpha= 45*(pi/180); % alpha in radians
l=1;% Number of equally spaced elements
Delta=((pi/(2*alpha))-1);%gap to element size (gap/alpha)
rint=130.5; %Interior radius in mm.
n=3; %n is the number of non-axisymmetric modes to calculate

Amplitude_factor_symmetry=l*alpha*rint;
for i=1:n
M=l*i;
Amplitude_factor(1,i)= ((-1)^i*2*rint*sin(l*i*alpha/2)/i)/Amplitude_factor_symmetry;
modes(1,i)=M;
end
for a=1:n
x(1,1)=0;
x(1,a+1)=l*a;
y(1,1)=1;
y(1,a+1)=Amplitude_factor(1,a);
end
bar(x,abs(y),'b'),xlabel('Orden circunferencial');
ylabel('Amplitud normalizada');title('45° partial loading');
```