

Modelamiento y validación computacional de las curvas de dispersión de las ondas guiadas en
una tubería empleando ANSYS

Alejandro Perdomo Tamayo, Johan Rafael Bacca Moreno

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director:

Jabid Eduardo Quiroga Méndez

Doctor en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

Agradezco a Dios por bendecirme la vida, por guiarme a lo largo de mi existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

A mi madre: Fanny, por ser la principal promotora de mis sueños, por confiar y creer en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me ha inculcado.

A mis hermanos Juan David y José Humberto, por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias.

A mi compañero de tesis Johan, un gran amigo a quien estimo tanto y a quien le debo su apoyo incondicional, por facilitarme los caminos para seguir, sin pedir nada a cambio y sin dudar de mi capacidad.

Mi agradecimiento a todos, mi familia, mis amigos que de una u otra manera me brindaron su colaboración y se involucraron en este proyecto.

Agradecimientos a Dios por siempre bendecirme y ser ese apoyo en mi vida, a mis padres Jorge y Marina, por ser las personas fundamentales en darme el amor, apoyo, dedicación y paciencia con la que cada día se preocupaban por darle culminación al proyecto.

A mis hermanos, Jorge y Brayan, por ser las personas que me han acompañado siempre y darme su cariño sincero.

A Sara, que, a pesar de todas las dificultades encontradas al pasar de los años, siempre ha estado dándome el apoyo para continuar con mis proyectos y culminarlos dándome su cariño incondicional.

A mi mejor amiga Mari, por ser esa persona que me ofreció el apoyo incondicional en toda mi carrera profesional y por su amistad de muchos años.

A mi compañero de tesis Alejandro Perdomo por ser la excelente persona que es y estar ahí en los momentos que necesité, por contribuir al desarrollo de nuestra tesis aún con las dificultades obtenidas sin perder la fe y la esperanza de culminar, y a todos los amigos y familiares que me acompañaron durante el proceso.

Contenido

Introducción	14
1. Objetivos.....	17
1.1. Objetivo general.....	17
1.2. Objetivos específicos	17
2. Análisis e inspección de estructuras empleando ondas ultrasónicas guiadas.....	18
2.1. Propagación de ondas en un medio.....	18
2.2. Ondas Lamb	19
2.3. Aspectos generales de una onda.....	20
2.4. Reflexión de ondas mecánicas	21
2.5. Modal Assurance Criterion	22
2.6. Método de diferencias finitas.....	24
2.7. Teoría de placas aproximadas	26
3. Curvas de dispersión de una tubería elástica isotrópica finita empleando el método de elementos finitos	27
3.1. Desarrollo del modelo por medio de FEM.....	28
4. Metodología	29
4.1. ANSYS (APDL) 18.1	29
4.2. Descripción del procedimiento	29
4.2.1. Pre-procesamiento.....	29
4.2.2. Post-procesamiento.	32
5. Resultados	40
5.1. Tablas.....	40
5.2. Curvas de dispersión	42

6. Validación.....	44
6.1. Segunda validación.....	47
7. Conclusiones.....	50
8. Recomendaciones	52
Referencias bibliográficas.....	55
Apéndices.....	57

Lista de tablas

Tabla 1. Frecuencias Tubería Schedule 40	40
Tabla 2. Tipo de Modo Longitudinal.....	41
Tabla 3. Tipo de Modo Torsional	41
Tabla 4. Tipo de Modo Flexionante.....	42
Tabla 5. Frecuencias Tubería Schedule 40 en GUIGUW 43	45

Lista de figuras

Figura 1: Modos de propagación de ondas.	19
Figura 2: Formas de onda.	20
Figura 3: Fenómeno de reflexión de ondas mecánicas longitudinales y transversales.	22
Figura 4: Evidencia del modelo realizado en ANSYS.....	23
Figura 5: Plano de diferencias finitas.....	25
Figura 6: Ejes coordenados ubicados sobre el plano medio de la placa.	27
Figura 7: Corte transversal en la tubería y la misma sección rectangular vista de frente.....	30
Figura 8: Descripción del elemento PLANE25.	31
Figura 9: Acoplamiento de los nodos a detalle.....	32
Figura 10: Diagrama de flujo pre-procesamiento.....	33
Figura 11: Conjunto de nodos seleccionados dentro de la sección rectangular y dirección de desplazamiento escogida para el análisis.....	36
Figura 12: Diagrama de flujo post-procesamiento.....	38
Figura 13: Longitud de onda vs. Frecuencia [Curvas de dispersión]	42
Figura 14: Número de onda vs. Frecuencia [Curvas de dispersión]	43
Figura 15: Velocidad de fase vs. Frecuencia [Curvas de dispersión].....	43
Figura 16: Velocidad de grupo vs. Frecuencia [Curvas de dispersión]	43
Figura 17: Longitud de onda vs. Frecuencia en GUIGUW [Validación].....	45
Figura 18: Número de onda vs. Frecuencia en GUIGUW [Validación].....	46
Figura 19: Velocidad de fase vs. Frecuencia en GUIGUW [Validación].....	46
Figura 20: Velocidad de grupo vs. Frecuencia en GUIGUW [Validación].....	47

Figura 21: Longitud de onda vs. Frecuencia [Segunda validación].....	48
Figura 22: Número de onda vs. Frecuencia [Segunda validación]	48
Figura 23: Velocidad de fase vs. Frecuencia [Segunda validación]	48
Figura 24: Velocidad de grupo vs. Frecuencia [Segunda validación]	49

Lista de Apéndices

Apéndice A. Código ANSYS	57
Apéndice B. Código ANSYS adelante	60
Apéndice C. Código ANSYS detrás	63
Apéndice D. Código MATLAB.....	66
Apéndice E. Graficación del Tipo de modo Longitudinal.....	73
Apéndice F. Graficación del Tipo de modo Torsional	75
Apéndice G. Graficación del tipo de modo Flexionante.....	77

Resumen

Título: Modelado y validación computacional de las curvas de dispersión de las ondas guiadas en una tubería empleando ANSYS.

Autores*: Alejandro Perdomo Tamayo; Johan Rafael Bacca Moreno

Palabras clave: Ondas guiadas, ANSYS (APDL), Curvas de dispersión, Análisis modal.

Descripción:

En los últimos años se han logrado avances tecnológicos e investigativos en el área de monitoreo de equipos e instalaciones como resultado de una comprensión más profunda del fenómeno físico asociado con las pruebas no destructivas (NDT), El análisis modal propone una solución eficiente para determinar las curvas de dispersión de una sección transversal de guía de onda arbitraria. Las curvas de dispersión son esenciales en la localización de discontinuidades basadas en ondas guiadas. De esta forma se logra desarrollar una tecnología que aborda de forma rápida y eficiente el estado integral de las estructuras en inspección, este método reconocido a nivel mundial; es utilizado en numerosas aplicaciones donde otros métodos NDT no son específicamente eficaces. En este trabajo, un cilindro hueco isotrópico se analiza dinámicamente en ANSYS desarrollando un modelo computacional con propiedades específicas de material y dimensión, para obtener frecuencias resonantes y formas de modo asociadas a todas las curvas de dispersión, en conjunto se emplea el programa MATLAB como asistente de computo donde se realiza el respectivo post-procesamiento de la información utilizando programación básica para finalmente obtener las curvas de dispersión.

* Grupo de Investigación GIEMA; Escuela de Ingeniería Mecánica; Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas; Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia.

Abstract

Title: Computational modeling and validation of guided wave dispersion curves in a pipeline using ANSYS.

Authors*: Alejandro Perdomo Tamayo; Johan Rafael Bacca Moreno

Keywords: Guide waves, ANSYS (APDL), Dispersion curves, Modal analysis.

Description:

In recent years, technological and investigative progress has been achieved in the area of monitoring of equipment and installation as a result of a deeper understanding of physical phenomenon associated with the non-destructive tests (NDT). The modal analysis proposes an efficient solution to determine the dispersion curves of an arbitrary waveguide cross-sectional. Dispersion curves are essential in the discontinuity localization based on guided waves. In this way, it is possible to develop a technology that quickly and efficiently addresses the integral state of the structures under inspection, this method recognized worldwide; It is used in specific applications where other NDT methods are not specifically specific. In this work, an isotropic hollow cylinder is dynamically analyzed in ANSYS to obtain resonant frequencies and mode shapes all of them associated with the dispersion curves, working using MATLAB program is used as a computer assistant where the respective post-processing of the information is performed using basic programming to finally obtain the dispersion curves. The numerical results are validated with the software GUIGUW and with some research papers in the area.

* Research Group GIEMA; Mechanical Engineering School; Faculty of Physical and Mechanical Engineering; Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia.

Introducción

La inspección estructural por medio de ondas guiadas concerniente a ensayos no destructivos (NTD) presenta preferencia frente al análisis ultrasónico convencional, debido a factores que priorizan este método. Esta metodología, a diferencia de las tradicionales donde la inspección es localizada, emplea la emisión de ondas ultrasónicas de baja frecuencia que viajan hacia las diferentes direcciones de la estructura, logrando de esta forma la detección de discontinuidades a grandes distancias del punto emisor, incluyendo lugares de difícil o nulo acceso, evitando así la remoción de cuerpos protectores de la estructura y realizando la inspección a altas velocidades.

En la industria, la inspección de tuberías se enfrenta a desafíos exigentes. Los tiempos de registro y la evaluación de integridad en tuberías de más de un kilómetro demandan nuevas tecnologías capaces de determinar daños mecánicos como abolladuras, grietas y deformaciones superficiales. El pertinente estudio de la propagación de una onda guiada en una estructura específica conduce a la obtención de las curvas de dispersión; En ellas, se logra apreciar información detallada sobre las formas de onda que se manifiestan en dicha estructura. Por ejemplo, se puede observar qué modos tienden a ser muy dispersivos, lo cual incide en la propagación de la onda, acortando su recorrido a través del medio. Esto proveería problemas a la detección de daños en estructuras con grandes distancias. Frente a cuerpos geométricos no comunes, la obtención de las curvas de dispersión de forma analítica es un trabajo arduo y extenso, e incluso pueden no tener solución. Problemas técnicos como la atenuación geométrica y reflexiones de onda dificultan la propagación de esta, causando frentes de onda que se redistribuyen por todo el medio, permitiendo que grandes cantidades de energía se dispersen. Para cuerpos geométricos simples como placas o tuberías, es un proceso ya sumamente complicado.

Por tal motivo, se da uso a herramientas computacionales basadas en métodos numéricos, específicamente el método de elementos finitos FEM (por sus siglas en inglés Finite Element Method), facilitan el desarrollo de esta propuesta de investigación.

Durante años, diferentes estudios sobre la propagación de ondas en estructuras elásticas isotrópicas se llevaron a cabo, con el fin de dar respuesta del comportamiento estático y dinámico de sólidos. Para lograr que estas se propaguen de forma particular, en dirección paralela al eje de la estructura y se desplacen grandes distancias, se realiza un exhaustivo estudio de ondas *Lamb*. Un cuerpo volumétrico en presencia de ondas *Lamb* debe presentar una dimensión mucho menor que las otras, originando que esta se convierta en una guía de onda. La teoría de placas permite abordar el problema y del mismo modo facilita el análisis, reduciendo cuantiosamente las ecuaciones presentes, lo que en cuestiones de tiempo y esfuerzo computacional representa una ventaja considerable frente a otras posibles soluciones en la obtención de modos de vibración y sus respectivas curvas de dispersión. De igual forma, se presentan otros desafíos previos para obtener los resultados deseados. La forma de onda (*Waveform*) de una onda guiada es el resultado de la superposición de diferentes modos de onda que se desplazan en direcciones diferentes y son independientes unas de otras, las cuales interactúan con el medio reflejándose y refractándose con cualquier obstáculo que se presente en la estructura, incluyendo sus fronteras. Las formas modales presentes en una estructura elástica libre de material isótropo están conformadas principalmente por dos categorías: Longitudinales y Torsionales. Para lograr la simulación de una perturbación externa que genere ondas armónicas elásticas, se realiza un acoplamiento en las caras transversales de la estructura.

En este trabajo se expone el procedimiento para la obtención de las curvas de dispersión de una tubería comercial Schedule 40, elástica, isotrópica y finita, utilizando el programa FEM de uso

comercial ANSYS (APDL) en su versión 18.1, por medio de “Modal Analysis”, donde se determinarán las frecuencias naturales. Seguido a esto, se exportan los datos al programa de cálculo numérico MATLAB R2018b para el post-procesamiento de los datos y la obtención de las curvas de dispersión.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo computacional en ANSYS para una tubería metálica teniendo en cuenta las propiedades del material y su geometría para generar las curvas de dispersión: velocidad de fase y velocidad de grupo específicas del espécimen estudiado.

1.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo computacional en ANSYS del comportamiento físico-mecánico de una onda guiada en una tubería.
- Obtener las curvas de dispersión para velocidad de fase y velocidad de grupo en función de la frecuencia para una tubería de acero Schedule 40 con diámetro nominal 4 NPS (Norma ASTM A312).
- Validar el modelo computacional desarrollado comprobando los resultados simulados con datos de referencia encontrados en la literatura.

2. Análisis e inspección de estructuras empleando ondas ultrasónicas guiadas

2.1. Propagación de ondas en un medio

La propagación de una onda se entiende como la interacción de átomos interconectados en un medio. Este medio, considerado como continuo, no presenta discontinuidades entre sus partículas, de forma que se puede realizar una descripción matemática de sus propiedades físicas empleando funciones continuas. También se aprecia la masa y la rigidez del medio, las cuales son incidencias del módulo elástico y de la densidad. Con las características previamente mencionadas, el sistema, en presencia de una perturbación externa, genera ondas que se propagan a través de elementos discretos que simulan pequeños cuerpos másicos con propiedades elásticas. Estas propiedades y características, que expresan el tipo de material del cual está compuesto el medio, son los determinantes de la velocidad a la que se propaga la onda (Rose, 2014).

En un cuerpo sólido homogéneo, isótropo y elástico se presentan principalmente dos tipos de modo de onda: Primario (P) y Secundario (S), como se muestra en la Figura 1, las cuales, durante su interacción con el medio, se combinan, lo cual genera ondas con formas de modo particulares. Las Ondas Primarias se propagan en dirección paralela a la guía de onda que presenta la estructura, contrario a su homóloga (S) que se transporta perpendicularmente a la dirección de propagación. Por esta razón, no es posible que las Ondas Secundarias, al generar esfuerzos cortantes, se propaguen en un medio líquido. Como se comentó previamente, la excitación de un cuerpo por una fuerza externa genera una onda particular que contiene sus propias características (número de onda, velocidad de fase, forma de modo) respecto a la frecuencia en la que entró en resonancia.

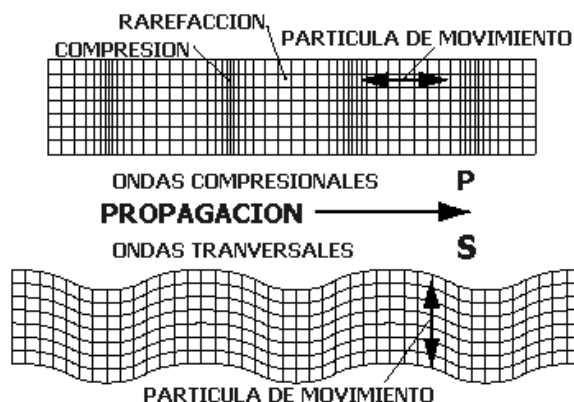


Figura 1: Modos de propagación de ondas. Tomada de sitio web de libre acceso, (Apartado “ondas sísmicas”, Figura 9). Recuperado de:

<http://www.salonhogar.com/ciencias/naturaleza/terremotos/doc2.htm>

2.2. Ondas Lamb

En estructuras sólidas, donde una dimensión es mucho menor en comparación a las otras, las ondas P y S se propagan en dirección paralelo del plano resultante, sirviendo este plano como guía de onda. Las diferentes reflexiones causadas por interferencias presentes en la estructura, como por ejemplo sus fronteras, generan grandes cantidades de ondas conocidas como ondas tipo Lamb. Una característica general de este tipo de onda es que es dependiente del espesor del plano donde se propaga, por esta razón, las ondas Lamb tienden a ser dispersivas. Las formas de modo se clasifican en dos tipos: longitudinales y torsionales, las cuales son el resultado de las ondas P y S excitadas en el medio. Las ondas longitudinales presentan una característica especial, a saber, que sus formas pueden dividirse en simétricas (Longitudinales) y antisimétricas (Flexionantes), tal como se aprecia en la Figura 2. Para lograr que las ondas Lamb resultantes presenten movimiento

armónico, la sección transversal del plano (guía de onda) debe permanecer homogénea y constante con el fin de evitar altas refracciones.

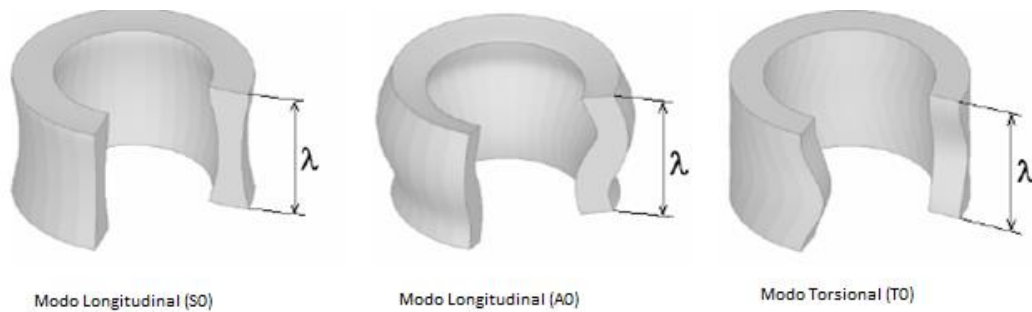


Figura 2: Formas de onda. Tomada de Sorohan, Constantin, Găvan, y Anghel, 2006, p.65.

2.3. Aspectos generales de una onda

Una onda plana armónica unidimensional se puede describir de la siguiente forma: $\Psi(x,t) = A\cos(\omega t - kx)$, donde A es la amplitud, ω es la frecuencia circular, t es el tiempo y k el número de onda circular (onda sinusoidal plana). En apoyo a la correlación previa, se asocian las siguientes ecuaciones: (a) $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$; (b) $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, donde f es la frecuencia, T es el periodo de onda y λ es la longitud de onda. Estas correlaciones se conocen como la “relación de dispersión”. Para una onda que cumple con estas características, la velocidad de fase esta descrita por $Cf = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k}$, y expresa la velocidad a la que una onda armónica cualquiera se encuentra viajando respecto a su frecuencia. Por su parte, la velocidad de grupo se define como la velocidad de propagación de un grupo de ondas con frecuencias similares, esta se obtiene de la forma $Cg = \frac{\lambda}{T} = \frac{d\omega}{dk}$.

Con las correlaciones previamente denotadas, se puede presentar un gráfico que expone estas características propias de cada onda y su respectivo modo de vibrar. Este gráfico, mejor

conocido como curvas de dispersión, permite un análisis exhausto de la propagación de ondas en estructuras y son indispensables en la práctica, debido a que establece las frecuencias y modos de vibración, lo cual permite la selección más eficiente de ondas en función de su dispersión de energía.

2.4. Reflexión de ondas mecánicas

Un frente de onda que se propaga a través de un sólido puede reflejarse o refractarse al incidir con una superficie que separa dos medios de distintas propiedades, disipando la onda y cambiando su modo de vibrar. Este fenómeno está descrito por la *Ley de Snell*. Una onda que incide un plano reflector con un ángulo de incidencia θ_i se consumirá en dos ondas resultantes que se reflejarán cada una en ángulos diferentes. Estas ondas resultantes se consideran de corte transversal y longitudinal, y presentan ángulos de reflexión θ_i y θ_{rt} , y velocidades de propagación C_1 y C_2 respectivamente. La relación entre ambas ondas reflejadas se representa mediante la ecuación $\frac{\sin \theta_{rt}}{C_1} = \frac{\sin \theta_i}{C_2}$. Así las cosas, el fenómeno de reflexión de ondas mecánicas longitudinales y transversales presentan similitudes tal como se aprecia en la Figura 2, y tanto el ángulo de incidencia como el ángulo de reflexión se pueden determinar por expresiones semejantes.

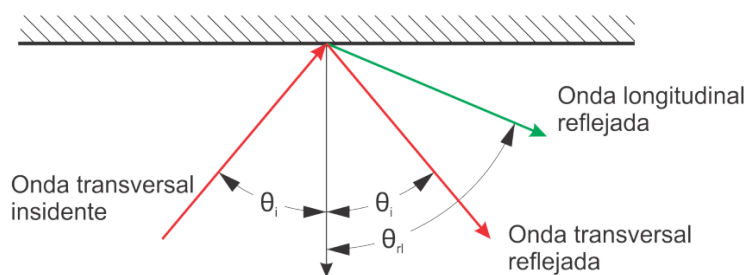


Figura 3: Fenómeno de reflexión de ondas mecánicas longitudinales y transversales. Tomada de Idzi *et al.*, 2017, p.1874

2.5. Modal Assurance Criterion

Modal Assurance Criterion, conocido más comúnmente como MAC, tiene como uso principal validar modelos analíticos de modos de vibración, con modos obtenidos de forma experimental. MAC proporciona un alto grado de consistencia, permitiendo emparejar formas de modo con una gran exactitud. La alta confiabilidad del método permite presentarlo como metodología de validación en proyectos e investigaciones, especialmente en aquellos que se requiera hacer un seguimiento de un patrón de oscilación en un sistema de variación periódico (*mode tracing*) (Sorohan, Constantin, Găvan, y Anghel, 2011). El criterio o número MAC se define como un valor adimensional que se encuentra en un rango de entre 0 y 1; cuando el valor de MAC es igual o cercano a 0 representa modos incongruentes, y los valores iguales a 1 o cercanos indican formas de modos congruentes. El límite de congruencia de modos generalmente está definido por el investigador a cargo del proyecto. Usualmente en los estudios se utiliza como valor límite estándar MAC de 0.85.

En el presente artículo se ha hecho una distorsión de la definición general de MAC, pero se mantienen los criterios que lo conforman. Este cambio se presenta inicialmente por la falta de un modelo a escala debido a la validación que se tomó para la realización de esta investigación. El uso del método MAC se centra específicamente en la dificultad de clasificar los modos de vibración o *Mode Shape* obtenidos en ANSYS. Como se logra evidenciar en la Figura 4, las

frecuencias se presentan en una tabla general, en orden ascendente respecto al valor de la frecuencia en Hz.

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****				
SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.27921E+07	1	1	1
2	0.27921E+07	1	2	2
3	0.27976E+07	1	3	3
4	0.27976E+07	1	4	4
5	0.28079E+07	1	5	5
6	0.28079E+07	1	6	6
7	0.28084E+07	1	7	7
8	0.28084E+07	1	8	8
9	0.28127E+07	1	9	9
10	0.28127E+07	1	10	10
11	0.28317E+07	1	11	11
12	0.28317E+07	1	12	12
13	0.28328E+07	1	13	13
14	0.28328E+07	1	14	14
15	0.28442E+07	1	15	15
16	0.28442E+07	1	16	16
17	0.28638E+07	1	17	17
18	0.28638E+07	1	18	18
19	0.28643E+07	1	19	19
20	0.28643E+07	1	20	20
21	0.28810E+07	1	21	21
22	0.28810E+07	1	22	22
23	0.28817E+07	1	23	23
24	0.28817E+07	1	24	24
25	0.28997E+07	1	25	25
26	0.28997E+07	1	26	26
27	0.29003E+07	1	27	27
28	0.29003E+07	1	28	28
29	0.29215E+07	1	29	29

Figura 4: Evidencia del modelo realizado en ANSYS (autoría propia)

Una vez concluida la lista de frecuencias se procede a desarrollar un código empleando el método MAC, con el fin de categorizar cada frecuencia utilizando sus respectivos desplazamientos estructurales, y realizando un tipo de condición de semejanza entre modos de vibración. Este proceso representa un gran desafío en el desarrollo del modelo computacional y su efectividad es fundamental tanto para los resultados esperados como en la obtención de las curvas de dispersión.

Siendo esencial categorizar cada frecuencia con su respectivo *Mode Shape* (Torsionales, Longitudinales y Flexionantes), se aplica MAC comparando cada desplazamiento con sus homólogos y de esta forma se obtienen los conjuntos de frecuencia respecto al modo de onda. Como lo indican Pastor, Binda y Harcarik (2012), el cálculo del valor MAC entre dos modos se

resuelve por medio del producto escalar normalizado de los dos conjuntos de vectores, símbolo “A” y símbolo “X”, como se presenta a continuación en la Ecuación 1:

$$MAC(r, q) = \frac{|\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_X\}_q|^2}{(\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_A\}_r)(\{\varphi_X\}_q^T \{\varphi_X\}_q)} \quad (1)$$

Donde el símbolo A y el símbolo X representan cada uno el conjunto de vectores propios de la matriz nodal de cada modelo realizado en FEM.

2.6. Método de diferencias finitas

En el estudio de ciertos fenómenos físicos, por lo general se desarrolla un sistema de ecuaciones diferenciales, las cuales tienen condiciones iniciales y de frontera, y son comprobadas para cierto dominio, generando un modelo matemático que le da un avance a su solución; además de esto, es necesaria la ayuda de un modelo computacional, implementando métodos alternativos matemáticos, los cuales nos deben generar una respuesta más exacta a estos problemas.

Como se comentó previamente, la Velocidad de grupo expresa la velocidad de propagación de un conjunto de ondas con frecuencias similares y se expresa como $Cg = \frac{d\omega}{dk}$. Para poder plantear esta definición, empleamos una solución numérica conocida como Método de diferencias finitas. Es habitual aplicar este método para el desarrollo óptimo del proceso debido que analíticamente serían muy complicados.

Las tres formas normalmente usadas en diferencias finitas son la diferencia *Anterior*, la *Central* y la *Posterior*, las cuales son usadas dependiendo a su aplicación, en la cual se puede adicionar o sustraer un término buscando un valor aproximado al obtenido. La diferencia *Anterior* es de la forma: $\nabla_h[f](x) = f(x) - f(x - h)$; la diferencia *Posterior* es una expresión que, dependiendo a su aplicación, el valor h se mantiene constante o se toma el límite $h \rightarrow 0$, por lo que

se expresa de la forma $\Delta_h[f](x) = f(x + h) - f(x)$. Por último, la diferencia *Central* es la media de las diferencias anteriores y posteriores, y se presenta de la forma $\delta_h[f](x) = f\left(x + \frac{1}{2}h\right) - f\left(x - \frac{1}{2}h\right)$.

Este método, que permite calcular numéricamente una solución muy aproximada de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales definidas en un dominio finito, consiste en la aproximación de las derivadas parciales por expresiones algebraicas con valores de la variable dependiente en un número finito de puntos seleccionados en el dominio (González, 2008), como se puede apreciar en la Figura 5.

Como resultado de esta aproximación, la ecuación diferencial parcial que explica el problema se reemplaza por una cantidad finita de ecuaciones algebraicas en términos de los valores de la variable dependiente en los puntos que se seleccionaron. Los valores de estos puntos se convierten en incógnitas y la solución del sistema de ecuaciones da como resultado una solución muy cercana en cada punto seleccionado de la malla.

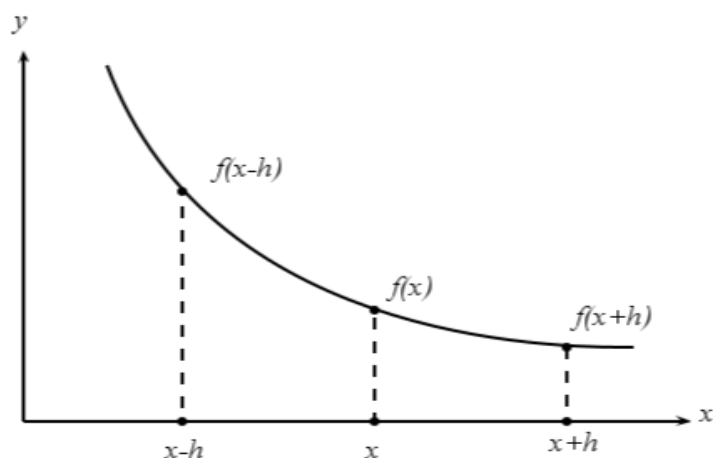


Figura 5: Plano de diferencias finitas. Recuperada de sitio web de libre acceso:

https://es.wikipedia.org/wiki/Diferencia_finita

2.7. Teoría de placas aproximadas

En ingeniería estructural, todo sólido geométrico tridimensional, donde una de sus dimensiones, generalmente el espesor (expresado como h en la Figura 6) es mucho menor que sus otras dos, se puede considerar como placas aproximadas. Esta teoría está basada bajo fundamentos e hipótesis como la de Kirchhoff, la cual propone despreciar la deformación por cortante en la estructura a costo del espesor del cuerpo, lo cual es posible debido a que se establece que las normales al plano medio se mantienen rectas y ortogonales respecto a la deformada, como se muestra en la Figura 6. De este modo, las ecuaciones de equilibrio representadas en sus derivadas parciales quedan en función de los esfuerzos flexionales (Massa, Giró, y Giudici, 2015). Para el análisis de placas aproximadas a menudo se emplean métodos de elementos finitos y por medio de la teoría de Reissner- Mindlin se ejecuta un desarrollo más sencillo en comparación con la de Kirchhoff. Además, si sumamos que las propiedades geométricas y mecánicas del material de la estructura permanecen constantes (no existe desviación longitudinal respecto a una sección transversal), como en el caso de las condiciones expuestas en esta investigación, se simplifica el desarrollo de elementos finitos de forma significativa, asociando el desarrollo del problema por medio de series de Fourier y disminuyendo las variables presentes en las ecuaciones a razón de la eliminación de las mismas respecto en la dirección longitudinal. De igual forma, el estudio solicita menos esfuerzo computacional, consecuencia de los aspectos previamente mencionados, disminuyendo el almacenamiento de datos y la cantidad de iteraciones durante el procesamiento de la información.

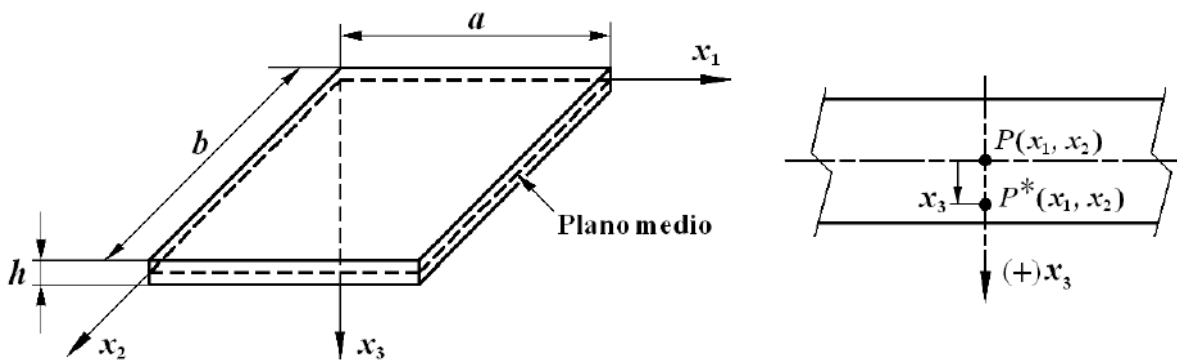


Figura 6: Ejes coordenados ubicados sobre el plano medio de la placa. Tomada de Massa, Giró, y Giudici, 2015, p. 65

3. Curvas de dispersión de una tubería elástica isotrópica finita empleando el método de elementos finitos

Para el caso específico de una estructura tubular que presenta una geometría convencional, la determinación de las curvas de dispersión de forma analítica exige un alto esfuerzo matemático y de análisis; así mismo, se requiere tiempo en la producción de las curvas. En los últimos años, con el desarrollo de métodos numéricos y herramientas computacionales se han logrado formar técnicas que actualmente son las más utilizadas para abordar fenómenos físicos, entre los cuales se encuentra la obtención de las curvas de dispersión. Por medio del Método de elementos finitos (FEM) y un extenso análisis analítico del problema, se plantea una metodología que aborda la investigación planteada en este proyecto de investigación, con la cual se obtienen resultados coherentes, se reduce el tiempo de diseño y se evita la construcción de prototipos a escala, lo cual resulta ventajoso.

3.1. Desarrollo del modelo por medio de FEM

En un estudio de análisis finitos FEM, lo primero es discretizar la estructura en pequeños elementos con geometrías específicas, las cuales se seleccionan respecto al tipo de análisis que se desea desarrollar; estos elementos están conformados por una cantidad de nodos y estos son los encargados de determinar el campo de desplazamiento general. Si además de esto se añaden ecuaciones de movimiento, ecuaciones de equilibrio, relaciones constitutivas del material y las condiciones de frontera presentes en la estructura, obtenemos la siguiente expresión en forma matricial: $[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}$, donde M es la matriz de masa estructural, C es la matriz de amortiguamiento estructural, K es la rigidez estructural, F es el vector de cargas aplicadas y u son los vectores de desplazamiento y sus concernientes derivadas respecto al tiempo. Por medio de una interpretación racional de la ecuación y empleando técnicas de integración directa se puede obtener el recorrido de una onda en una estructura.

Basados en Sorohan, Constantin, Găvan, y Anghel (2006), si tenemos una estructura que presenta un movimiento rígido del cuerpo, se obtienen *eigenfrecuencias* nulas, las cuales obedecen a este tipo de movimiento. Por otro lado, si la estructura tiene simetría, se pueden obtener *eigenfrecuencias* coincidentes. Ahora bien, según los mismos autores, las formas de modo y las frecuencias obtenidas a partir del análisis modal, pertenecen al modo *Lamb* (Sorohan et al., 2006), por lo cual, un modelo FEM de una porción representativa de una placa o un tubo debe ser forzado a describir el modo *Lamb*.

4. Metodología

4.1. ANSYS (APDL) 18.1

ANSYS (APDL), cuya denominación original es “ANSYS Mechanical APDL (ANSYS Parametric Design Language)”, es un software que desarrolla, comercializa y presta servicios de ingeniería por medio de simulación y análisis de sistemas estáticos y dinámicos lineales y no-lineales. Presenta características como la integración, la cual permite la asociación con diferentes programas CAD y CAE para un desarrollo avanzados de proyectos, y el fraccionamiento del problema en módulos, lo cual otorga un desarrollo más detallado y disminuye el nivel de complejidad de cualquier estudio que se realice. Su entorno especial utiliza el FEM para realizar análisis estructurales, permitiendo simular los diferentes fenómenos estáticos y dinámicos de una estructura, desde sus deformaciones y tensiones hasta la realización de análisis modales. Las bibliotecas que lo componen permiten la ejecución de diseños mecánicos complejos y ofrecen un conjunto completo de materiales y algoritmos durante el desarrollo.

4.2. Descripción del procedimiento

4.2.1. Pre-procesamiento: Como bien se comentó, en una tubería hueca de dimensiones estándar, a partir de un análisis modal es posible la aparición de 3 tipos de modos de vibración: Torsionales, Longitudinales y Flexionantes. Con el fin de desarrollar un modelo que requiera bajo consumo computacional teniendo en cuenta el enfoque académico de esta investigación, se propone realizar una transición dimensional del análisis, proyectando la sección transversal de la tubería y sobre ella realizar el

análisis modal. Bajo esta condición, se propone realizar el diseño del modelo empleando método elementos finitos, y para su procesamiento el programa ANSYS (Mechanical APDL 18.1).

Tal como puede visualizarse en la Figura 7, el plano resultante al corte transversal da forma a un rectángulo que mantiene las dimensiones originales de la tubería, de esta forma, de acuerdo con Sorohan, Constantin, Găvan, y Anghel, y empleando la teoría de placas aproximadas, el modelo puede trabajarse como una placa isotrópica vinculando su propiedades a la rigidez del sólido, el módulo de Young y la razón de poisson (2011), asegurando la obtención de los modos longitudinal y flexionante, los cuales se desplazan en dirección axial y radial, respectivamente.

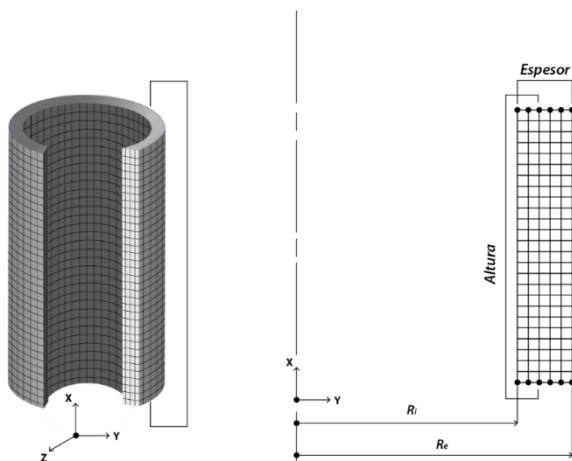


Figura 7: Corte transversal en la tubería y la misma sección rectangular vista de frente (autoría propia).

Aun así, hace falta la obtención de los modos torsionales, los cuales se presentan en dirección de la sección circular de la tubería, específicamente en dirección Z respecto al plano cartesiano especificado. Para garantizar la obtención de las ondas torsionales, es necesario permitir que la sección estructural del modelo, específicamente los nodos que la conforman, pueda desplazarse en las tres dimensiones (X, Y, Z), lo cual es posible empleando el tipo de elemento

PLANE25 de la biblioteca estándar de ANSYS, el cual está compuesto por cuatro nodos, donde cada nodo presenta tres grados de libertad (DOF) que simbolizan las direcciones X, Y, y Z para un sistema de coordenadas cartesiano. En la Figura 8 se expone dicho elemento.

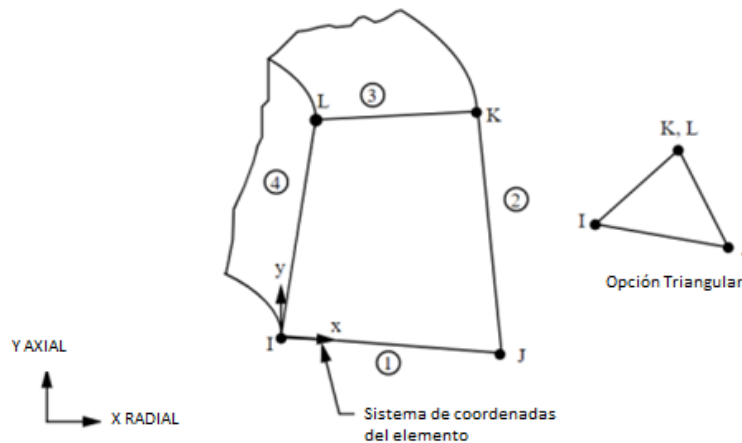


Figura 8: Descripción del elemento PLANE25. Tomado de https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_elem/Hlp_E_PLANE25.html

Definido el tipo de elemento a emplear para el diseño del modelo, se procede a dimensionar la sección, y, seguido, se definen las respectivas propiedades del material. Para poder asegurar un comportamiento correcto de las ondas, es necesario aplicar una condición de frontera en los extremos superior e inferior del modelo. Esta condición se basa en realizar un acoplamiento entre los nodos justamente contrarios, lo cual es posible si se usa la herramienta “coupling /Ceqn”. Durante el acoplamiento se debe garantizar una tolerancia razonable entre nodos acoplados y garantizar el acoplamiento de los nodos correctos, adjudicando la altura del acoplado igual a la longitud del modelo, como lo muestra la Figura 9.

Respecto al análisis modal, se procede a definir el rango de frecuencias con el cual se desea perturbar la estructura, y la cantidad de modos que se quiere extraer del estudio. A pesar de que

ANSYS nos permite precisar esta cantidad, el número de frecuencias está determinado por la altura de la sección transversal del modelo, en pocas palabras la longitud de la tubería, esto debido a la relación directa que tiene la longitud de onda respecto a dicha longitud: $\lambda = L/p$, donde p puede tomar valores de $p=1,2,3...$. En la Figura 10 se muestra un diagrama de flujo que expone el proceso de pre-procesamiento.

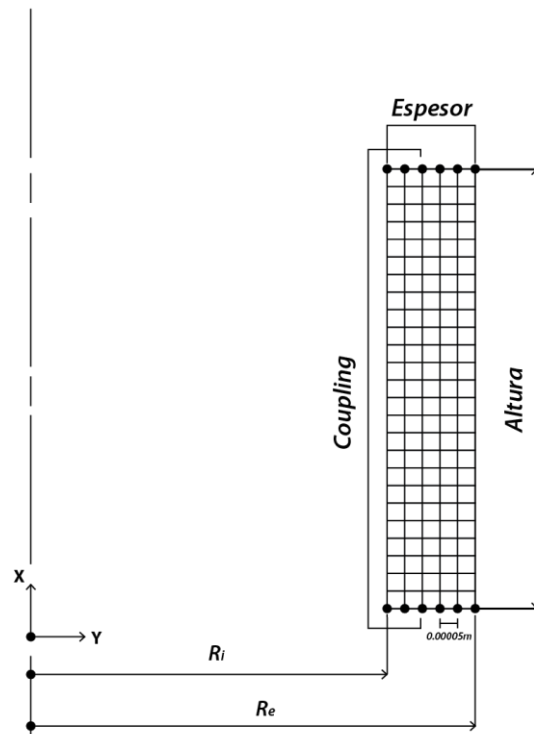


Figura 9: Acoplamiento de los nodos a detalle (autoría propia)

4.2.2. Post-procesamiento: Por medio de ANSYS y su biblioteca de estudio “Análisis Modal”, es posible obtener las frecuencias a las cuales una estructura entra en resonancia, sin

embargo, no es suficiente si se desea obtener las curvas de dispersión de dicha estructura. En función a esto se debe realizar un procedimiento de post-procesamiento con los datos obtenidos del análisis modal. En dicho procedimiento es necesario catalogar las frecuencias respecto a sus modos de vibrar.

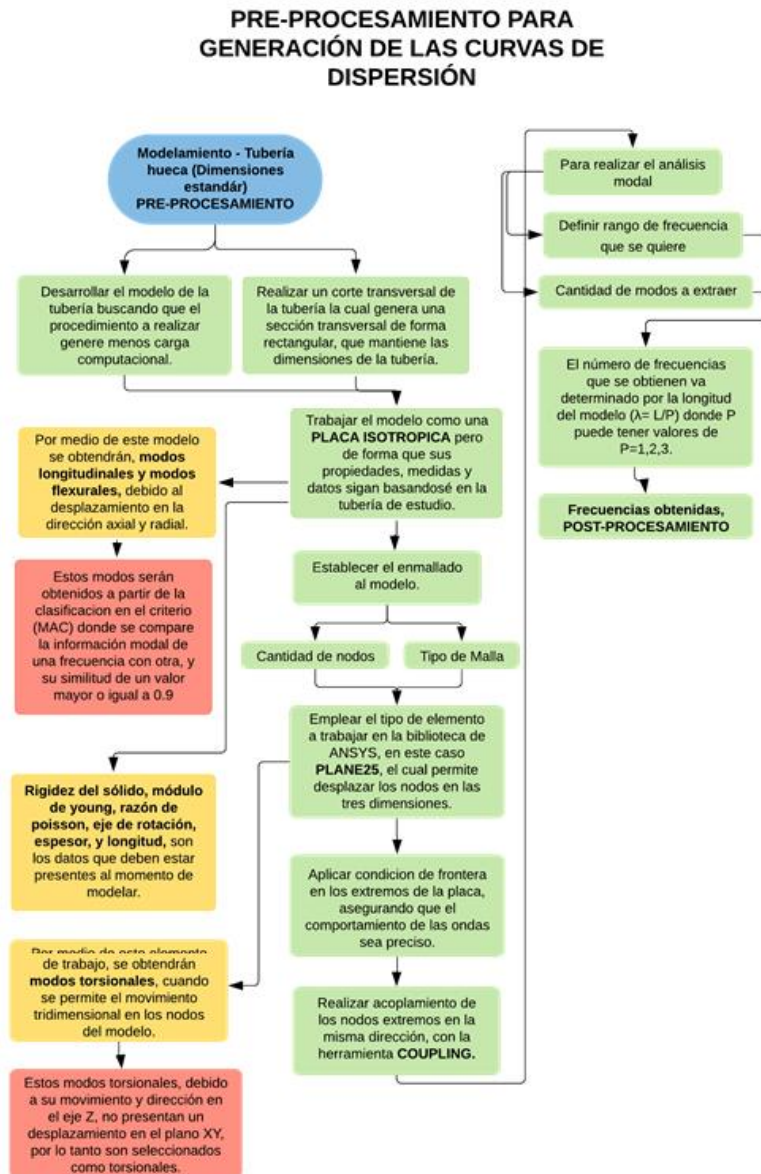


Figura 10: Diagrama de flujo pre-procesamiento

Tal como se comentó en líneas anteriores, para una estructura tubular es posible que aparezcan tres tipos de modos: Torsionales, Longitudinales y Flexionantes. Una forma de poder preseleccionar los modos es por medio de una inspección visual, lo cual se consigue por medio del visualizador gráfico de ANSYS; allí se puede apreciar, además del tipo de modo, el número de onda (K) respecto a la frecuencia en estudio. No obstante, esta opción es supremamente ineficiente al momento de tener que visualizar alrededor de 100 frecuencias que quedan como resultado del análisis. A razón de estos, se realiza una automatización del proceso de selección de modos a partir del desplazamiento nodal. Al realizar un estudio de la dinámica que tienen los nodos respecto a cada frecuencia resultante, se puede evidenciar que estos tienen una forma característica de movimiento respecto al tipo de modo al cual pertenecen. A partir de allí se emplea un código basado en condicionales y ciclos lógicos en conjunto con la implementación del MAC, con el cual es posible categorizar las frecuencias. Esto consiste en determinar el nivel de similitud entre los comportamientos resultantes de los nodos respecto a cada frecuencia con la cual la estructura entró en resonancia. Una forma de ejemplificar dicha condición es la siguiente: para un modo de vibrar torsional, la similitud de acuerdo con el comportamiento dinámico de los nodos va a ser muy bajo o nulo respecto al comportamiento dinámico de un modo flexionante; por el contrario, para comportamientos nodales de modos de vibrar similares, es decir, un modo torsional vs torsional, el resultado de similitud va a ser muy alto. Cabe resaltar que es necesario que el conjunto de nodos y la dirección del desplazamiento (sea X, Y, o Z) deben ser los mismos al momento de realizar el proceso de confrontación. Definido el procedimiento, es necesario obtener los desplazamientos respecto a cada frecuencia resultante del análisis modal, y además establecerlos en una tabla para seguidamente exportarlos de ANSYS con el fin de manipular dichos datos. Esto es posible una vez finalizado el análisis modal, empleando el comando **VGET* dentro del ciclo lógico **Do*, en el cual

se toma el desplazamiento final en la dirección deseada (para este caso en la dirección X) de cada nodo y, finalmente, se almacena en tablas predeterminadas tal como se muestra a continuación:

```
*DO,cont,1,75,1          !BUQLE *DO INICIA EN 1, FINALIZA EN 75.

SET, , , , , ,cont,      !CONTADOR DEL BUQLE

*VGET,TABLA1(1,cont),NODE, ,U,X    !EN EL VECTOR "TABLA1" EN LA POSICIÓN
                                     "(1,cont)" SE ALMACENA EL DESPLAZAMIENTO
                                     DEL NODO EN LA DIRECCION "X"

*ENDDO                      !CIERRE DEL BUQLE
```

De esta forma quedan almacenados en tablas los desplazamientos en dirección X de los 12.621 nodos que componen nuestro mallado estructural, y, empleando el comando **VWRITE*, se pueden guardar las tablas para el respectivo post-procesamiento (para realizar una inspección más profunda, remitirse al Apéndice A: Código ANSYS). Para poder obtener las curvas de dispersión, se deben importar los desplazamientos nodales que se encuentran inmersos en las tablas previamente obtenidas por medio de ANSYS a la interfaz de programación de MATLAB R2018b.

Como se logra apreciar, las frecuencias no se encuentran catalogadas por tipo de modo -tal como es necesario tenerlos con el fin de proceder a obtener velocidad de grupo, velocidad de fase y demás variables necesarias para la obtención de las curvas de dispersión-, a razón de esto se selecciona un conjunto de nodos en dirección Y, formando una columna dentro del mallado rectangular. Esta columna de nodos seleccionada al azar, o, más específicamente, sus desplazamientos Figura 11, será la encargada de categorizar respecto a su frecuencia respectiva el tipo de modo (mode shape), con el fin de proceder a definir las curvas de dispersión.

A razón de la condición de frontera utilizada en el modelo (acoplamiento), el par de nodos perteneciente a los límites inferior y superior del conjunto de nodos preseleccionado presentarán

desplazamientos homólogos. En cuanto a los nodos que componen el interior del vector, se emplea un ciclo para seleccionarlos y seguidamente importarlos a una matriz donde cada una de sus columnas almacenará los desplazamientos nodales de las frecuencias totales obtenidas del análisis modal. Definida esta matriz, se procede a eliminar las frecuencias denominadas “frecuencias error”, las cuales son valores erróneos, resultado de la convergencia de datos durante el procesamiento interno de ANSYS. Esta labor se ejecuta realizando una inspección visual, y deben ser eliminadas tanto en las tablas nodales como en la tabla de frecuencias. En la Figura 12 se muestra un diagrama de flujo que expone el proceso de post-procesamiento.

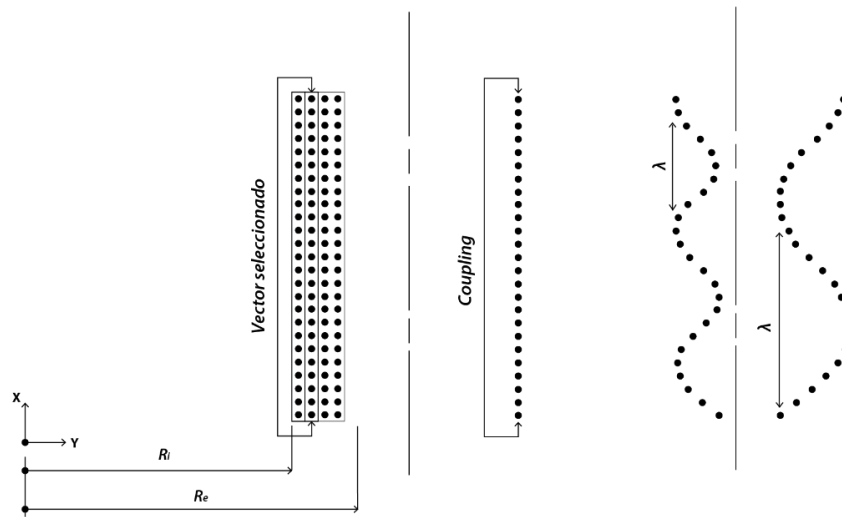


Figura 11: Conjunto de nodos seleccionados dentro de la sección rectangular y dirección de desplazamiento escogida para el análisis.

4.2.2.1. Modos torsionales. De acuerdo a la investigación previa, se logra concluir que los modos torsionales no presentan desplazamiento en el plano X, Y; por el contrario, presentan desplazamiento en el plano Z. Con el fin de facilitar el procedimiento posterior donde se emplea MAC (el cual condiciona la comparación a dos variables), se procede a definir los desplazamientos concernientes a los modos torsionales de acuerdo a esta restricción, de este modo se emplea una condición lógica, la cual se encarga de seleccionar todo modo que en la sumatoria de sus desplazamientos en la dirección X o Y sea igual a cero (0). De esta forma se van filtrando todas las frecuencias con modo de vibrar torsionales, y se redirigen de la matriz a una tabla que almacenará todas las frecuencias de este tipo.

4.2.2.2. Modos flexionantes – Modos longitudinales. Como resultado de la preselección y traslado de los modos torsionales, en la matriz se encuentran los concernientes a modos flexionantes y modos longitudinales. Ambos presentan desplazamientos tanto en la dirección X como en Y y no en Z, de esta forma, en vez de realizar una selección visual en ANSYS -la cual es supremamente ineficiente teniendo en cuenta la cantidad de modos y el tiempo empleado en la labor de inspeccionar cada uno- se emplea el código MAC tal como se presentan en el apartado 2.5. Así se procede dentro de un ciclo o bucle, a realizar la comparación entre las frecuencias resultantes dentro de la matriz. A medida que transcurre el ciclo, se van comparando los modos y se van redirigiendo a sus respectivas tablas de acuerdo a la función de MAC; para este caso, se puso como valor límite de aceptación $x > 0,9$, de forma que todo resultado que diese mayor a este valor cumpliría con el nivel de similitud de tipo modo y las frecuencias se asociaban entre sí redirigiéndose a sus respectivas tablas. El proceso continúa manteniendo la primera frecuencia de comparación fija y alternándose las demás frecuencias a medida que el ciclo avanza, hasta llegar a comparar todas las frecuencias dentro de la matriz. Como resultado se obtienen en vectores

independientes los modos Torsionales, Flexionantes y Longitudinales con sus respectivas frecuencias.

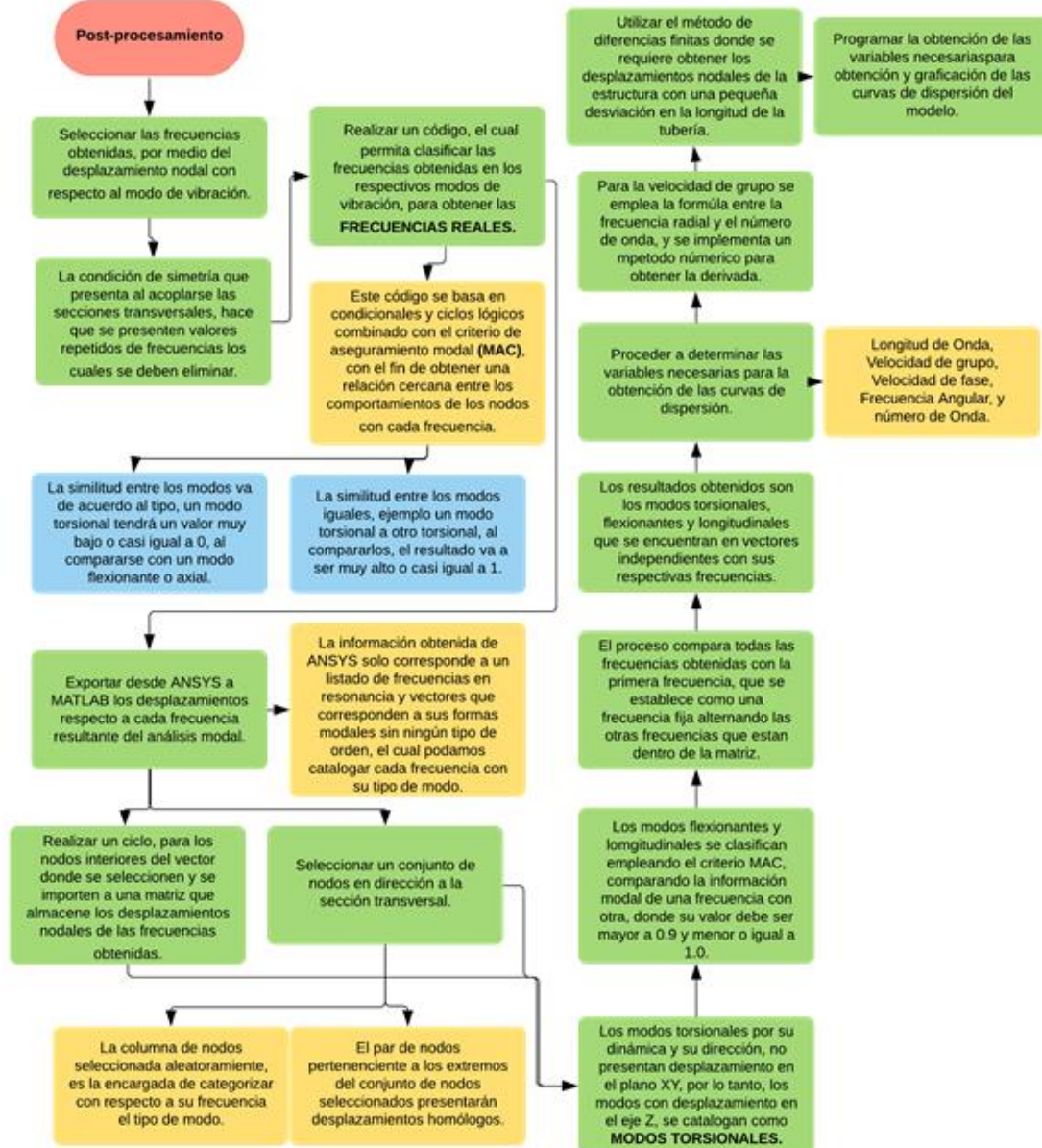


Figura 12: Diagrama de flujo post-procesamiento (autoría propia)

Debido a la condición de simetría que presentan los modos, se logra apreciar que estos se encuentran en pares de igual desplazamiento y frecuencia. Estos modos pares no representan ningún valor de interés para la investigación, ni para las curvas de dispersión; por el contrario, aumenta las variables del procedimiento y da lugar a posibles confusiones. Por tal razón, se procede a eliminarlos por medio de un ciclo lógico. De acuerdo con el apartado 2.3, se procede a determinar las variables necesarias para la obtención de las curvas de dispersión (λ , velocidad de grupo, velocidad de fase, frecuencia angular y número de onda). Respecto a la velocidad de grupo, es necesario implementar la teoría de diferencias finitas para su obtención. Esto significa obtener los desplazamientos nodales de la estructura con una desviación en su dimensión Y (longitud de la tubería), que para el caso fue del 2,5% de su longitud original.

De acuerdo con el apartado 2.6, implementando la teoría de diferencias finitas centrada y resolviendo el mismo pre-procesamiento y post-procesamiento con la desviación mencionada (revisar apéndice B: Código ANSYS adelante; y apéndice C: Código ANSYS atrás), se logran obtener los valores necesarios para dar solución a la ecuación planteada y, finalmente, se obtiene la velocidad de grupo respecto a cada frecuencia. Así mismo, de acuerdo con la literatura, y empleando las ecuaciones descritas en el Capítulo 1, se procede a programar la obtención de las variables necesarias para finalmente lograr obtener y graficar las curvas de dispersión del modelo propuesto.

5. Resultados

5.1. Tablas

Los resultados expuestos en este bloque son, respectivamente, las frecuencias de tubería Schedule 40 (Tabla 1) con especificaciones técnicas (Módulo de Young $E=121.1\text{GPa}$; coeficiente de Poisson $\nu=0.301$; densidad $\rho=4460\text{Kg/m}^3$, diámetro nominal 4'', diámetro exterior 3.937'', espesor de pared 0.3937'', longitud de tubería 39.37''), tipo de modo longitudinal (Tabla 2), tipo de modo torsional (Tabla 3) y tipo de modo flexionante (Tabla 4). En los Apéndices E, F, y G se grafican los desplazamientos de los tipos de modo expuestos en las tablas 2, 3, y 4, respectivamente.

Tabla 1

<i>Frecuencias Tubería Schedule 40</i>	
<u>Nro. de frecuencia</u>	<u>Frecuencia (Hz)</u>
10	18904
20	38808
30	58558
40	78450
50	98359
60	118178
70	138218
80	158338
90	178745
100	198370

Tabla 2

<i>Tipo de Modo Longitudinal</i>			
<u>Nro. de frecuencia</u>	<u>Lambda (λ) (mm)</u>	<u>Velocidad de grupo (m/s)</u>	<u>Velocidad de fase (m/s)</u>
10	0.368779	786	1360
20	0.038420	5396	5551
30	0.029189	5441	5513
40	0.024093	5433	5494
50	0.020706	5408	5479
60	0.018238	5370	5464
70	0.016336	5321	5447
80	0.014815	5259	5426
90	0.013565	5180	5402
100	0.012516	5082	5374

Tabla 3

<i>Tipo de Modo Torsional</i>			
<u>Nro. de frecuencia</u>	<u>Lambda (λ) (mm)</u>	<u>Velocidad de grupo (m/s)</u>	<u>Velocidad de fase (m/s)</u>
10	0.075605	3181	3181
20	0.146309	3181	3181
30	0.095066	3181	3181
40	0.070443	3181	3181
50	0.055914	3181	3181
60	0.046307	3181	3181
70	0.039471	3181	3181
80	0.034347	3181	3181
90	0.030353	3181	3181
100	0.027143	3181	3181

Tabla 4

<i>Tipo de Modo Flexionante</i>			
<u>Nro. de frecuencia</u>	<u>Lambda (λ) (mm)</u>	<u>Velocidad de grupo (m/s)</u>	<u>Velocidad de fase (m/s)</u>
10	0.176745	2519	6638
20	0.083721	2183	1459
30	0.054852	2633	1692
40	0.040787	2869	1879
50	0.032463	3011	2029
60	0.026961	3102	2152
70	0.023053	3161	2254
80	0.020135	3201	2340
90	0.017873	3227	2414
100	0.016067	3244	2478

5.2. Curvas de dispersión

En este bloque se exponen, respectivamente, la Longitud de onda vs. Frecuencia (Figura 13), el Número de onda vs. Frecuencia (Figura 14), la Velocidad de fase vs. Frecuencia (Figura 15), y la Velocidad de grupo vs. Frecuencia (Figura 16).

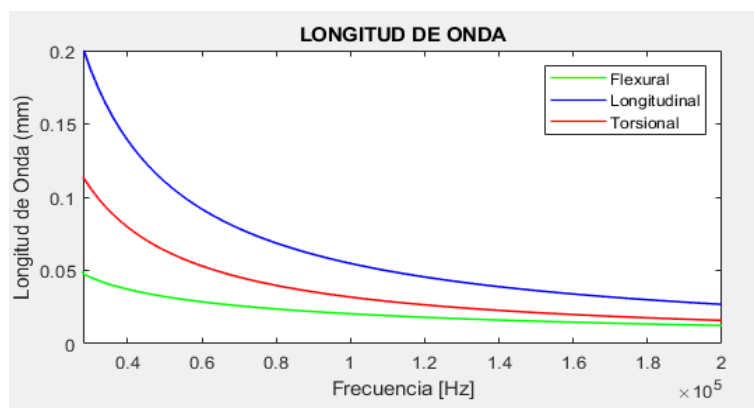


Figura 13: Longitud de onda vs. Frecuencia [Curvas de dispersión] (autoría propia)

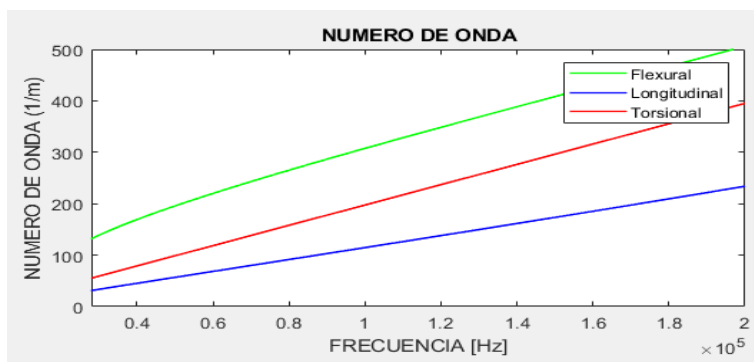


Figura 14: Número de onda vs. Frecuencia [Curvas de dispersión] (autoría propia)

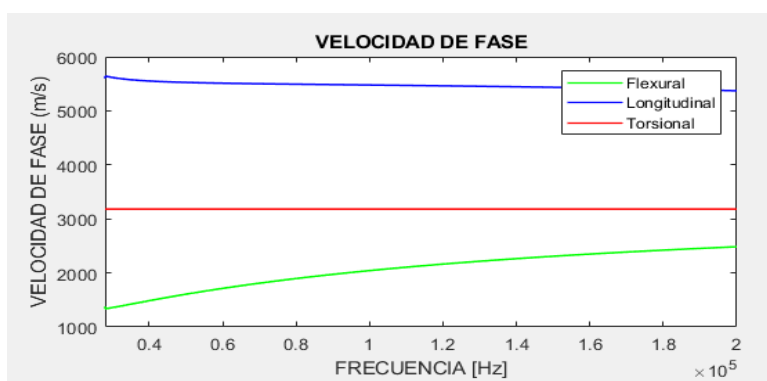


Figura 15: Velocidad de fase vs. Frecuencia [Curvas de dispersión] (autoría propia)

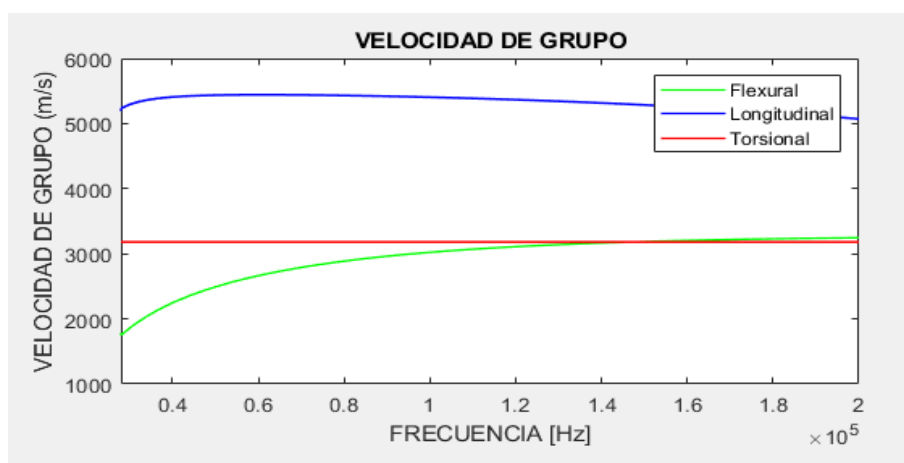


Figura 16: Velocidad de grupo vs. Frecuencia [Curvas de dispersión] (autoría propia)

6. Validación

La validación se implementó basándonos en dos criterios. Inicialmente, se realizó una revisión a profundidad de los procedimientos y técnicas matemáticas aplicadas en investigaciones, literatura e informes científicos previos. En segunda instancia, empleando el software *GUIGUW* realizamos la validación de los resultados, comparando las curvas de dispersión e interponiendo una tras otra, permitiendo un análisis de visualización directa que permite una refrendación concreta. El proceso de validación consiste en el emparejamiento de las curvas obtenidas, descritas en los apartados anteriores, con las curvas que el software *GUIGUW* obtiene con su respectiva programación. A partir de esto, es indispensable buscar inconsistencias y verificar hasta qué punto se asemejan, o si por el contrario se diferencian.

Referidos directamente a dicho programa, es válido dejar expreso que este cumple con los estándares de calidad y es de carácter confiable, dado que carece de irregularidades y, por el contrario, es una herramienta certificada para los procesos de obtención de curvas de dispersión. Si el lector está interesado en conocer más acerca del programa o valerse de él, puede visitar esta dirección web¹.

Correspondiente con los resultados presentados anteriormente, específicamente con la Tabla 1 (Frecuencias de tubería Schedule 40) expuesta en el apartado 7.1. (*Tablas*), y las figuras expuestas en el apartado 7.2. (*Curvas de dispersión*), a saber, Figura 13 (Longitud de onda vs. Frecuencia), Figura 14 (Número de onda vs. Frecuencia), Figura 15 (Velocidad de fase vs. Frecuencia), y Figura 16 (Velocidad de grupo vs. Frecuencia), presentamos a continuación sus paralelos respectivos, es decir, sus validaciones con el programa *GUIGUW*, las cuales se presentan

¹ <http://www.guiguw.com/>

en la Tabla 5 (Frecuencias de tubería Schedule 40 en *GUIGUW*), la Figura 17 (Longitud de onda vs. Frecuencia), la Figura 18 (Número de onda vs. Frecuencia), la Figura 19 (Velocidad de fase vs. Frecuencia) y la Figura 20 (Velocidad de grupo vs. Frecuencia), respectivamente:

Tabla 5

Frecuencias Tuberia Schedule 40 en GUIGUW	
Nro. De frecuencia	Frecuencia (Hz)
10	18000
20	38000
30	58000
40	78000
50	98000
60	118000
70	138000
80	158000
90	178000
100	198000

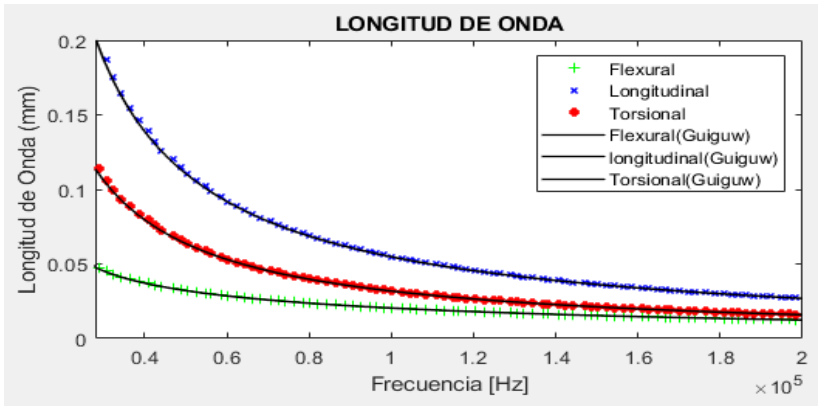


Figura 17: Longitud de onda vs. Frecuencia en GUIGUW [Validación] (autoría propia)

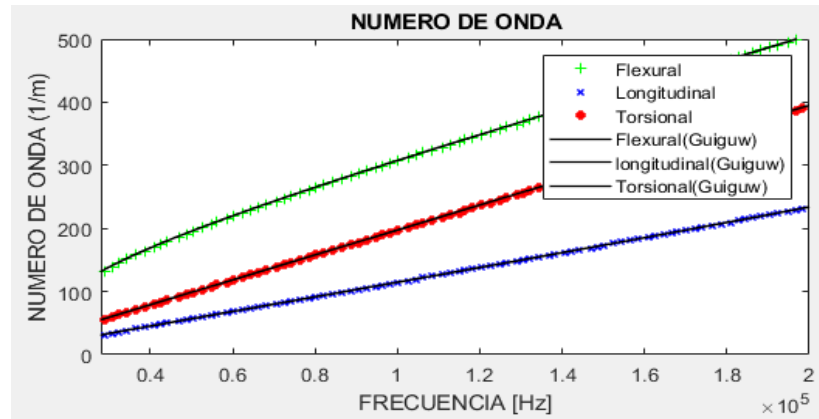


Figura 18: Número de onda vs. Frecuencia en GUIGUW [Validación] (autoría propia)

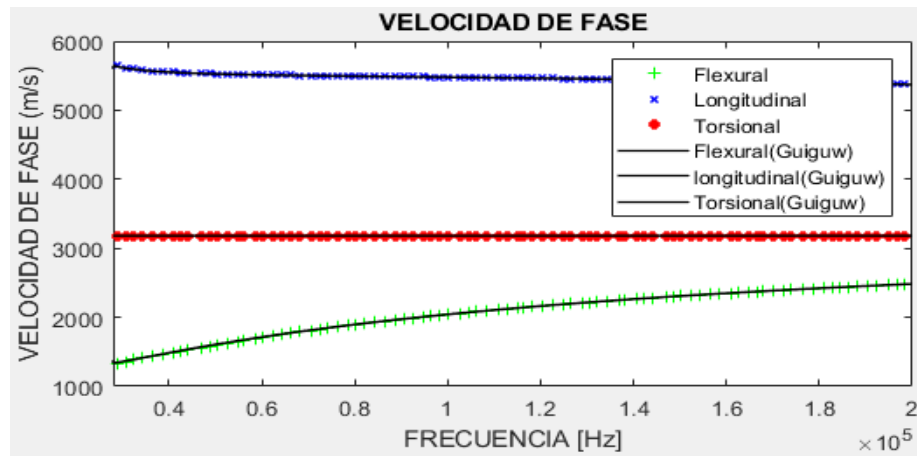


Figura 19: Velocidad de fase vs. Frecuencia en GUIGUW [Validación] (autoría propia)

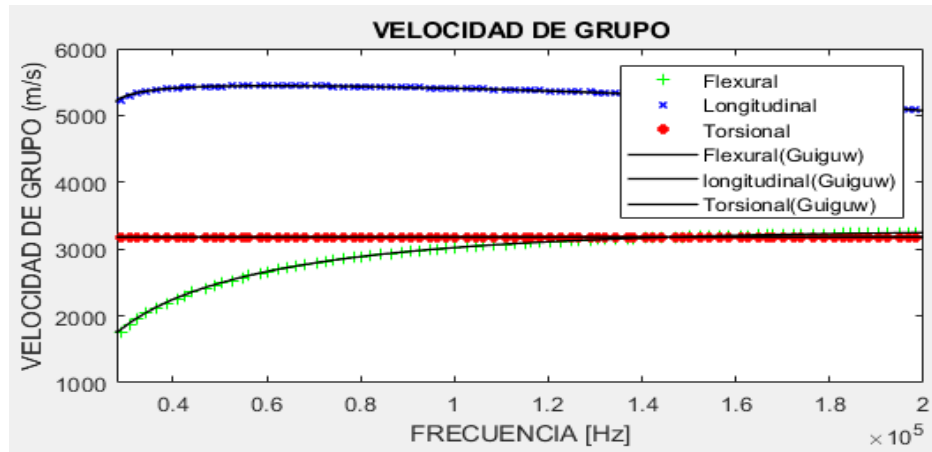


Figura 20: Velocidad de grupo vs. Frecuencia en GUIGUW [Validación] (autoría propia)

6.1. Segunda validación

Con el fin de verificar, aunado a la intención de exponer otro material y otro Scheduled, procedemos a realizar la segunda validación. Teniendo en cuenta el paso a paso realizado en el software ANSYS para obtener las frecuencias del modelo y después de realizar este procedimiento, continuamos con el sistema de cómputo MATLAB para proceder a realizar el orden preciso de las frecuencias y cada uno de los modos de vibración para este sistema.

La validación presentada en este segmento se realiza con los siguientes datos específicos: Módulo de Young $E=212\text{GPa}$; Coeficiente de Poisson $\nu=0.29$; Densidad $\rho=7850\text{Kg/m}^3$; Diámetro exterior $D=14\text{mm}$; Espesor de pared $T=1\text{mm}$. Los datos adjuntos no tienen un Scheduled normalizado, por lo tanto, damos los valores. Por otra parte, las frecuencias en estudio van en un rango de $0\text{Hz}-1500\text{KHz}$. A continuación, presentamos las curvas obtenidas segunda validación.

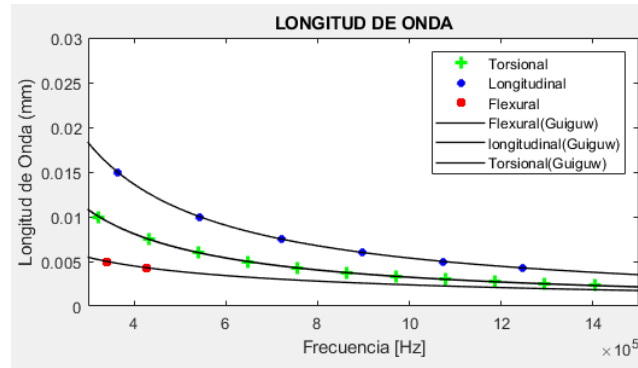


Figura 21: Longitud de onda vs. Frecuencia [Segunda validación] (autoría propia)

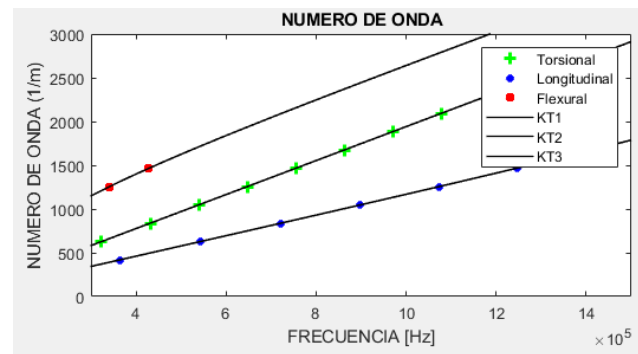


Figura 22: Número de onda vs. Frecuencia [Segunda validación] (autoría propia)

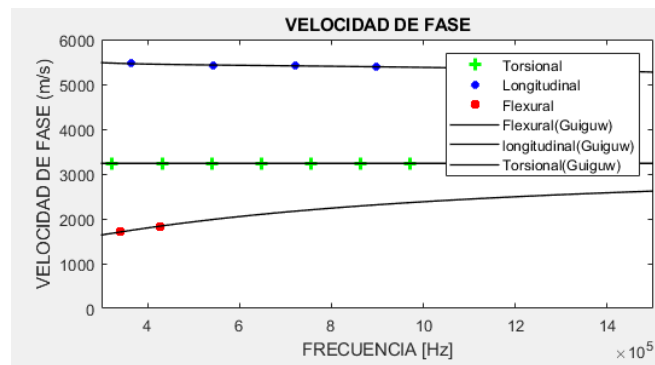


Figura 23: Velocidad de fase vs. Frecuencia [Segunda validación] (autoría propia)

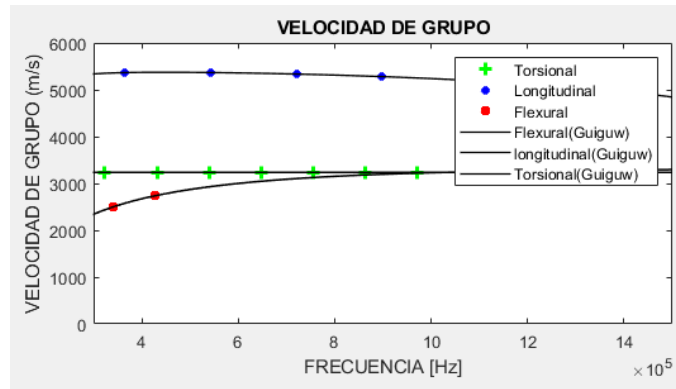


Figura 24: Velocidad de grupo vs. Frecuencia [Segunda validación] (autoría propia)

Al realizar el procedimiento para la obtención de las curvas que demostramos anteriormente, hay un error que no obedece a un mal procedimiento hecho por nuestra autoría, sino que su origen probablemente sea por el software GUIGUW. Se demuestran que las gráficas no están obtenidas desde el punto (0,0) debido al error presentado, por tal razón se ajustan. Los puntos obtenidos de colores azules, verdes y rojos, son los puntos que corroboran el funcionamiento del código y la validación con la gráfica obtenida por el software. Así mismo, podemos observar que la cantidad de puntos de la segunda validación son menores, esto debido a nuestra intención de obtener una verificación más óptima, se realizó esta validación demostrando que se deben obtener los puntos con el paso a paso del procedimiento dado, utilizando gran tiempo en la obtención de cada uno de ellos.

7. Conclusiones

En este trabajo se realizó el estudio de la propagación de las ondas guiadas en una tubería de acero comercial. El fin último fue la obtención de las curvas de dispersión por medio de un método accesible para condiciones académicas, utilizando herramientas computacionales que se encuentran presentes en el medio mencionado. Estos resultados dan paso al desarrollo de tecnologías de optimización en el área de mantenimiento industrial, mantenimiento aeroespacial, automotriz, sector de hidrocarburos, etc. En este sentido, se presentan a continuación las conclusiones de la investigación:

1. El modelo computacional desarrollado en esta investigación, empleando Métodos de Elementos Finitos (FEM), provee un estudio de propagación de energía, el cual se encuentra respaldado con los resultados obtenidos de forma analítica desarrollados en estudios previos. Esta predice frecuencias y modos de vibración con gran exactitud para el caso de materiales isotrópicos y estructuras con geometrías comunes, proveyendo un tipo de análisis basado en 2D, el cual disminuye el costo computacional y facilita el estudio de análisis numérico. De igual manera, se logran representar gráficamente los modos de vibración para un cuerpo volumétrico en un plano bidimensional. El modelo computacional desarrollado representa gráficamente los modos de vibración para un cuerpo volumétrico en un plano bidimensional. Usando la teoría de placas aproximadas, se obtienen los desplazamientos nodales en las tres direcciones presentes en la tubería, a esto se le suma la representación animada de los modos obtenidos y las gráficas de color que especifican los esfuerzos existentes en la estructura respecto a cada frecuencia. Estos datos claves representan la información necesaria para la obtención de las curvas de dispersión.

Finalmente, el programa permite la exportación de los datos para el respectivo post-procesamiento en un programa externo permitiendo efectuar la obtención de las curvas y otros resultados de interés.

2. Por medio del modelo computacional, y usando herramientas técnicas de *MATLAB R2018b* se logró obtener las curvas de dispersión. De esta manera, se presenta gráficamente la Velocidad de fase vs. Frecuencia, Velocidad de grupo vs. Frecuencia, y también otras variables de interés (Número de onda vs Frecuencia, Longitud de onda vs. Frecuencia). Para la velocidad de grupo V_g , expresada mediante la forma $C_g = \frac{d\omega}{dk}$, se utilizó un artificio matemático de conocido por método de diferencias finitas. Aunque los resultados presentan un alto grado de precisión, es posible utilizar un método más sofisticado que permita una derivación con mayor congruencia.
3. La validación, como se expresa en el apartado 6, la implementamos basándonos en dos criterios. Primeramente, utilizamos una dedicada relación entre los procedimientos y técnicas matemáticas realizadas con la revisión literaria e informes científicos previos. En segunda instancia, con el programa *GUIGUW* realizamos la validación de los resultados, comparando las curvas de dispersión e interponiendo una tras otra, permitiendo un análisis de visualización directa que permite una refrendación concreta. Como conclusión, obtuvimos una similitud aceptable que valida la metodología y aprueba este documento como apoyo a investigaciones venideras y posibles futuros trabajos que den continuación a esta investigación.

8. Recomendaciones

El fundamento general de este proyecto se centra en la inspección preventiva y predictiva en estructuras metálicas por medio de ensayos no destructivos NDT, especialmente en tuberías. Como se sugirió anteriormente, las curvas de dispersión permiten al investigador obtener la información necesaria para seleccionar los modos indicados, basándose en la dispersión de energía en cada frecuencia. Seleccionados los modos óptimos, se procede a la realización de una tecnología basada en la metodología presentada en esta investigación. El alcance de una futura investigación puede llegar al desarrollo de un mecanismo generador de perturbaciones externas que incidan en medios estructurales.

El modelo presentado cumple con la obtención de las curvas de dispersión para una tubería con las dimensiones previamente especificadas, tal como se logra evidenciar en la validación. A pesar de esto, este código no se puede tomar para uso estándar de tuberías, en su caso se debe tomar como método de guía. Las razones consisten principalmente en que, a tuberías con diferentes Schedule, sus dimensiones cambian, y dichos cambios pueden llegar a niveles drásticos con diámetros que pueden alcanzar hasta medio metro, siendo el caso del transporte de crudo pesado. Esta desviación genera que la tolerancia del mallado se tenga que proveer de nuevo. A razón de un aumento drástico del mallado, que en conjunto aumenta la cantidad de nodos y elementos, el modelo exige mayor capacidad computacional, implicando un equipo de alto rendimiento. En caso de no condicionar el equipo bajo estos estándares y que no se realice un ajuste de la tolerancia, los resultados obtenidos en las frecuencias no cumplirán con el estado de “emparejamiento” tal como se aprecia en las Figuras expuestas en el apartado 6 (Validación). En su lugar, desde el punto de

vista teórico, dicho emparejamiento debe presentarse con exactitud igual como se planteó en los códigos que se encuentran en los apéndices de esta investigación.

En cuanto a las curvas de dispersión, cada valor representativo proviene de las frecuencias obtenidas en ANSYS. Como se apreciará en los códigos expuestos en los apéndices, las frecuencias emanadas están condicionadas a la altura de la sección transversal que se tomó para el desarrollo del diseño. En total se pueden llegar a obtener entre 10 y 15 frecuencias para modos Longitudinal y Flexionante, esto implica muy pocas frecuencias y delimita las curvas. Con el fin de obtener un rango amplio de valores y tener las curvas totalmente definidas se debe garantizar un mayor número de Longitudes de onda (λ), lo cual es posible realizando un aumento en la altura de la sección transversal teniendo en cuenta $\lambda = \frac{L}{p}$; $P=1,2,3...$, tal como se presentó en el capítulo 4.

Dentro de los valores obtenidos en ANSYS nos encontraremos con frecuencias que denominamos “frecuencias error”; estas frecuencias son resultado de la convergencia en el procesamiento interno de ANSYS y no deben tenerse en cuenta, por esta razón se debe realizar una inspección visual e identificarlas para continuamente eliminarlas en el código MATLAB.

El modelo computacional anunciado puede presentar obviedades, como también puede estar expuesto a optimizaciones y recomendaciones prácticas. En este proyecto se buscó realizar la metodología más sencilla posible para la comprensión de los interesados. Las exigencias técnicas como el conocimiento previo de programación y comprensión básica de *ANSYS APDL* requeridas para la comprensión de este proyecto son mínimas comparadas a otras literaturas que abarcan el mismo tema con modelos más complejos.

El estudio de las curvas de dispersión y, más específicamente, el de ondas guiadas, ha ido aumentando al transcurrir del tiempo. Esta propuesta alcanza los dominios del mantenimiento

industrial, aumentando cada vez los entes interesados. A futuro, se espera que el método de análisis e inspección por medio de ondas guiadas sea líder en la industria y permita expandir y crear nuevos procesos NDT industriales.

Referencias bibliográficas

Barski, M., Stawiarski, A., Chwal, M. (2016). Dispersion relations for composite structures, Part II: Methods of determining dispersion curves. *Composites Theory and Practice*, 16. pp. 147-153.

González, O. (2008). *Extensión del Método de las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo para el estudio de Estructuras Híbridas de microondas, incluyendo circuitos concentrados Activos y Pasivos* (Tesis doctoral). Universidad de Cantabria, Santander, España.

Idzi, J., Rojo, B., Iturrioz, I., Groth, E., y Clarke, T., (2017). Estudio de la propagación de ondas guiadas sobre un riel ferroviario. *Mecánica Computacional*, 35, pp. 1869 – 1886.

Massa, Giró, y Giudici (2015). *Compendio de cálculo estructural para ingeniería mecánica y aeronáutica*. Bogotá, Colombia: FCEFYN - Universidad Nacional de Colombia.

Pastor, M., Binda, M., y Harcarik, T., (2012). Modal assurance criterion. *Procedia Engineering*, 48, pp. 543 – 548.

Rose, J. (2014). *Ultrasonic Guided Waves in solid media*. New York: Cambridge University Press.

Sorohan, S., Constantin, N., Găvan, M., y Anghel, V., (2006). Numerical extraction of dispersion curves used in lamb wave inspections. pp. 56 – 67.

Sorohan, S., Constantin, N., Găvan, M., y Anghel, V., (2011). Extraction of dispersion curves for waves propagating in free complex waveguides by standard finite element codes. *Ultrasonics*, 51, pp. 503 – 515.

Apéndices

Apéndice A. Código ANSYS

```

/NOPR      ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO    ! Echo following commands to log
/FINISH    ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
! WE SUGGEST YOU REMOVE THIS LINE AND THE FOLLOWING STARTUP LINES
!*
/NOPR
KEYN,PR_SET,1          !CARACTERISTICAS PRINCIPALES PARA MOSTRAR EN LA GUI, COMO ES UN ANALISIS MODAL, SELECCIONAMOS "Structural"
KEYN,PR_STRUC,1        !LAS DEMAS OPCIONES (ANALISIS TERMICOS, ELECTRICOS, FLUIDOS) NO SON SELECCIONADAS, A RAZON DE ESTO OBTIENEN VALOR "0"
KEYN,PR_THERM,0
KEYN,PR_FLUID,0
KEYN,PR_ELMAG,0
KEYN,MAGNOD,0
KEYN,MAGEDG,0
KEYN,MAGHFE,0
KEYN,MAGELC,0
KEYN,PR_MULT,0
/GO
!*
!*
/PREP7      !INGRESAMOS AL MENU "Preprocessor" -> "Element Type" -> "Add/Edit/Delete"
!*
ET,1,PLANE25      !MANUALMENTE PONEMOS EL TIPO DE ELEMENTO QUE UTILIZAMOS EN NUESTRO ANALISIS "PLANE25"
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,    !A CONTINUACION VAMOS A DEFINIR NUESTRO MATERIAL
MPTEMP,1,0        !INGRESAMOS A "Material Props" -> "Material Models" -> "Structural" -> "Linear" -> "Elastic" -> "Isotropic"
MPDATA,EX,1,,210E9      !INGRESAMOS MODULO DE ELASTICIDAD. PARA EL CASO PROPIO E=210E9
MPDATA,PRXY,1,,0.33     !INGRESAMOS MODULO DE YOUNG. PARA EL CASO PROPIO PRXY=0.33
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7800      !INGRESAMOS A "Density" E INGRESAMOS LA DENSIDAD. PARA EL CASO PROPIO DENS=7800
BLC4,0.05113,0,0.00602,0.03      !A CONTINUACION REGRESAMOS AL MENU DE "Preprocessor" E INGRESAMOS A "Modeling" -> "Create" -> "Areas" -> "Rectangle" -> "By 2 Corners"
Y ALLI INGRESAMOS LAS MEDIDAS DE LA SECCION TRANSVERSAL REPRESENTATIVA DEL LA TUBERIA. X=0.05113; Y=0; W=0.00602; H=0.03
!*
ESIZE,0.5E-04      !REGRESAMOS AL MENU DE "Preprocessor" E INGRESAMOS A "Meshing" -> "Size Cntrl" -> "SmartSize" -> "Adv Opts" ALLI EN LA OPCION "SIZE"
REGISTRAMOS EL TAMAÑO QUE VA TENER NUESTRO MALLADO. PARA EL CASO PROPIO size=0.00005
SMRTSIZE, ,1,1,2,15,28,1.5,1,1,4,0      !AQUI VEMOS EL REGISTRO DE LAS DEMAS OPCIONES QUE NOS PERMITE REGISTRAR EL MENU "Adv Opts",
A RAZON DE NUESTRO ANALISIS PERMANECEN IGUAL
!*
MSHAPE,0,2D      !UNA VEZ REALIZADO ESTE TRABAJO VOLVEMOS AL MENU "Meshing" Y NOS DIRIGIMOS A LA OPCION "MeshTool"
SE NOS DESPLIEGA UN MENU FLOTANTE; CON EL INDICADOR DEL MAOUSE DAMOS CLICK IZQUIERDO EN EL AREA QUE TENEMOS EN LA INTERFAZ
Y A CONTINUACION CLICK EN "Mesh" Y "Close"
MSHKEY,0      !OBSERVAREMOS COMO SE VA GENERANDO EL MALLADO EN NUESTRA AREA, LOS INDICADORES A CONTINUACION INFORMAN EL REGISTRO DEL MALLADO
!*
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CPCYC,ALL,0.00001,0,0,0.03,0,0      !UNA VEZ TERMINADO EL MALLADO, VOLVEMOS AL MENU "Preprocessor" Y NOS DIRIGIMOS A LA OPCION "Coupling/Ceqn".
AQUI VAMOS A PONER NUESTRA CONDICION DE FRONTERA. VAMOS A "Offset Nodes"
EN EL MENU DESPLEGADO PONEMOS LA TOLERANCIA DEL COUPLING TOLER=0.00001.
Y REGISTRAMOS LA ALTURA QUE DEBE TENER NUESTRO ACOPLAMIENTO QUE DEBE SER IGUAL A LA ALTURA DE LA SECCION TRANSVERSAL DY=0.03

/SOL
!*
!AL TERMINAR ESTA TAREA DAMOS POR FINALIZADO EL PRE-PROCESO DONDE DEFINIMOS EL TIPO DE ELEMENTO,
PROPIEDADES DEL MATERIAL, DISEÑO, MALLADO, CONDICIONES DE CONTORNO.
CERRAMOS EL MENU "Preprocessor" Y NOS DIRIGIMOS AL SIGUIENTE MENU "Solution"
!EN EL MENU "Solution" NOS DIRIGIMOS A "Analysis Type" -> "New Analysis" Y SELECCIONAMOS LA OPCION "Modal" (OPCION 2)
ANTYPE,2
!*
!*
/MDOPT,LANB,300      !SEGUIDO VAMOS A LA OPCION "Analysis Options" DONDE VAMOS A DEFINIR LAS OPCIONES DEL ANALISIS.
SELECCIONAMOS "Block Lanczos", INGRESAMOS LA CANTIDAD DE MODOS A EXTRAER DE NUESTRO ANALISIS No=300.

EQSLV,SPAR
MXPAND,300, , , 0      !INGRESAMOS TAMBIEN EL NUMERO DE MODOS A EXPANDIR MXPAND=300 Y ACEPTAMOS.
LUMPM,0
PSTRES,0
!*
/MDOPT,LANB,300,0,3000000, ,OFF      !EN EL NUEVO MENU FLOTANTE SELECCIONAMOS EL RANGO DE FRECUENCIAS
EN LAS QUE VA ENTRAR EN RESONANCIA NUESTRA ESTRUCTURA. FREQINICIAL=0, FREFINAL=3000000

/STATUS,SOLU

```

```

SOLVE                                !AL FINALIZAR, DENTRO DEL MENU "Solution" NOS DIRIGIMOS A LA OPCION "Solve" -> "Current LS"
                                     Y DE ESTE MODO NUESTRO ANALISIS EMPEZARA A RESOLVERSE
/POST1                               !A PARTIR DE AQUI DEJAREMOS DE UTILIZAR LA GUI Y EMPEZAREMOS A USAR CODIGO BASE APDL SENCILLO PARA SEGUIR CON EL DESARROLLO.
*DIM,TABLA1,ARRAY,12621,75          !DEFINIMOS LA MATRIZ "TABLA1" DONDE VAMOS A INGRESAR EL COMPORTAMIENTO DE LOS 12621 NODOS DE LAS PRIMERAS 75 FRECUENCIAS OBTENIDAS.

*DO,cont,1,75,1                     !POR MEDIO DE UN CICLO "DO" EMPEZAMOS A OBTENER EL COMPORTAMIENTO NODAL O LOS "DOF" DE CADA NODO
                                     Y LOS VAMOS INGRESANDO A LA TABLA ANTERIORMENTE DEFINIDA

SET, , , , , , ,cont,
*VGET,TABLA1(1,cont),NODE, ,U,X
*ENDDO

                                     !POR MOTIVOS DE ESFUERZO COMPUTACIONAL Y CONDICIONES MISMAS DE ANSYS 18, DEBEMOS DIVIDIR EL PROCESO.
                                     EN LUGAR DE SACAR LAS 272 FRECUENCIAS EN UNA SOLA TABLA, SACAMOS 4 TABLAS POR SEPARADO.

/SOL
!*
ANTYPE,2
!*
!*
MODEOPT,LANB,300
EQSLV,SPAR
MXPAND,300, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0
!*
MODEOPT,LANB,300,1410000,3000000, ,OFF    !IMPORTANTE: EL PROCESO PARA LA OBTENCION DE LAS 4 TABLAS ES IGUAL SOLO CON UNA EXCEPCIÓN,
                                             EN EL MOMENTO DE REGISTRAR LA FRECUENCIA INICIAL PARA CADA ESTUDIO DEBEMOS GARANTIZAR QUE NO SE REPITAN LAS FRECUENCIAS;
                                             ESTO SE LOGRA CONOCIENDO LA ULTIMA FRECUENCIA DE LA TABLA EXACTAMENTE ANTERIOR. PARA EL CASO PROPIO LA FREQ=75

/STATUS,SOLU
SOLVE
/POST1
*DIM,TABLA2,ARRAY,12621,76

*DO,cont2,1,76,1
SET, , , , , , ,cont2,
*VGET,TABLA2(1,cont2),NODE, ,U,X
*ENDDO

/SOL
!*
ANTYPE,2
!*
!*
MODEOPT,LANB,300
EQSLV,SPAR
MXPAND,300, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0
!*
MODEOPT,LANB,300,2120000,3000000, ,OFF

/STATUS,SOLU
SOLVE
/POST1
*DIM,TABLA3,ARRAY,12621,76

*DO,cont3,1,76,1
SET, , , , , , ,cont3,
*VGET,TABLA3(1,cont3),NODE, ,U,X

/SOL
!*
ANTYPE,2
!*
!*
MODEOPT,LANB,300
EQSLV,SPAR
MXPAND,300, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0
!*
MODEOPT,LANB,300,2792000,3000000, ,OFF

/STATUS,SOLU
SOLVE
/POST1
*DIM,TABLA4,ARRAY,12621,45

*DO,cont4,1,45,1
SET, , , , , , ,cont4,
*VGET,TABLA4(1,cont4),NODE, ,U,X
*ENDDO

```


!A CONTINUACION SE PROCEDE A EXPORTAR LAS TABLAS YA LLENAS,
ANSYS 18 SOLO NOS PERMITE EXPORTAR UN MAXIMO DE 19 DATOS (19 FRECUENCIAS).
A RAZON DE ESTO VOLVEMOS A DIVIDIR LAS 272 FREQ EN GRUPO DE 19 OBTENIENDO EN TOTAL 15 TABLAS A EXPORTAR.

```
*CFOPEN, 'TABLA1', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA1(1,1), TABLA1(1,2), TABLA1(1,3), TABLA1(1,4), TABLA1(1,5), TABLA1(1,6), TABLA1(1,7), TABLA1(1,8), TABLA1(1,9), TABLA1(1,10),
TABLA1(1,11), TABLA1(1,12), TABLA1(1,13), TABLA1(1,14), TABLA1(1,15), TABLA1(1,16), TABLA1(1,17), TABLA1(1,18), TABLA1(1,19)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA2', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA1(1,20), TABLA1(1,21), TABLA1(1,22), TABLA1(1,23), TABLA1(1,24), TABLA1(1,25), TABLA1(1,26), TABLA1(1,27), TABLA1(1,28), TABLA1(1,29), TABLA1(1,30),
TABLA1(1,31), TABLA1(1,32), TABLA1(1,33), TABLA1(1,34), TABLA1(1,35), TABLA1(1,36), TABLA1(1,37), TABLA1(1,38)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA3', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA1(1,39), TABLA1(1,40), TABLA1(1,41), TABLA1(1,42), TABLA1(1,43), TABLA1(1,44), TABLA1(1,45), TABLA1(1,46), TABLA1(1,47), TABLA1(1,48), TABLA1(1,49),
TABLA1(1,50), TABLA1(1,51), TABLA1(1,52), TABLA1(1,53), TABLA1(1,54), TABLA1(1,55), TABLA1(1,56), TABLA1(1,57)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA4', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA1(1,58), TABLA1(1,59), TABLA1(1,60), TABLA1(1,61), TABLA1(1,62), TABLA1(1,63), TABLA1(1,64), TABLA1(1,65), TABLA1(1,66), TABLA1(1,67), TABLA1(1,68),
TABLA1(1,69), TABLA1(1,70), TABLA1(1,71), TABLA1(1,72), TABLA1(1,73), TABLA1(1,74), TABLA1(1,75)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA5', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA2(1,1), TABLA2(1,2), TABLA2(1,3), TABLA2(1,4), TABLA2(1,5), TABLA2(1,6), TABLA2(1,7), TABLA2(1,8), TABLA2(1,9), TABLA2(1,10),
TABLA2(1,11), TABLA2(1,12), TABLA2(1,13), TABLA2(1,14), TABLA2(1,15), TABLA2(1,16), TABLA2(1,17), TABLA2(1,18), TABLA2(1,19)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA6', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA2(1,20), TABLA2(1,21), TABLA2(1,22), TABLA2(1,23), TABLA2(1,24), TABLA2(1,25), TABLA2(1,26), TABLA2(1,27), TABLA2(1,28),
TABLA2(1,29), TABLA2(1,30), TABLA2(1,31), TABLA2(1,32), TABLA2(1,33), TABLA2(1,34), TABLA2(1,35), TABLA2(1,36), TABLA2(1,37), TABLA2(1,38)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA7', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA2(1,39), TABLA2(1,40), TABLA2(1,41), TABLA2(1,42), TABLA2(1,43), TABLA2(1,44), TABLA2(1,45), TABLA2(1,46), TABLA2(1,47), TABLA2(1,48), TABLA2(1,49),
TABLA2(1,50), TABLA2(1,51), TABLA2(1,52), TABLA2(1,53), TABLA2(1,54), TABLA2(1,55), TABLA2(1,56), TABLA2(1,57)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA8', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA2(1,58), TABLA2(1,59), TABLA2(1,60), TABLA2(1,61), TABLA2(1,62), TABLA2(1,63), TABLA2(1,64), TABLA2(1,65), TABLA2(1,66), TABLA2(1,67),
TABLA2(1,68), TABLA2(1,69), TABLA2(1,70), TABLA2(1,71), TABLA2(1,72), TABLA2(1,73), TABLA2(1,74), TABLA2(1,75), TABLA2(1,76)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA9', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA3(1,1), TABLA3(1,2), TABLA3(1,3), TABLA3(1,4), TABLA3(1,5), TABLA3(1,6), TABLA3(1,7), TABLA3(1,8), TABLA3(1,9), TABLA3(1,10),
TABLA3(1,11), TABLA3(1,12), TABLA3(1,13), TABLA3(1,14), TABLA3(1,15), TABLA3(1,16), TABLA3(1,17), TABLA3(1,18), TABLA3(1,19)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA10', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA3(1,20), TABLA3(1,21), TABLA3(1,22), TABLA3(1,23), TABLA3(1,24), TABLA3(1,25), TABLA3(1,26), TABLA3(1,27), TABLA3(1,28),
TABLA3(1,29), TABLA3(1,30), TABLA3(1,31), TABLA3(1,32), TABLA3(1,33), TABLA3(1,34), TABLA3(1,35), TABLA3(1,36), TABLA3(1,37), TABLA3(1,38)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA11', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA3(1,39), TABLA3(1,40), TABLA3(1,41), TABLA3(1,42), TABLA3(1,43), TABLA3(1,44), TABLA3(1,45), TABLA3(1,46), TABLA3(1,47),
TABLA3(1,48), TABLA3(1,49), TABLA3(1,50), TABLA3(1,51), TABLA3(1,52), TABLA3(1,53), TABLA3(1,54), TABLA3(1,55), TABLA3(1,56), TABLA3(1,57)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA12', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA3(1,58), TABLA3(1,59), TABLA3(1,60), TABLA3(1,61), TABLA3(1,62), TABLA3(1,63), TABLA3(1,64), TABLA3(1,65), TABLA3(1,66), TABLA3(1,67),
TABLA3(1,68), TABLA3(1,69), TABLA3(1,70), TABLA3(1,71), TABLA3(1,72), TABLA3(1,73), TABLA3(1,74), TABLA3(1,75), TABLA3(1,76)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA13', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA4(1,1), TABLA4(1,2), TABLA4(1,3), TABLA4(1,4), TABLA4(1,5), TABLA4(1,6), TABLA4(1,7), TABLA4(1,8), TABLA4(1,9), TABLA4(1,10), TABLA4(1,11),
TABLA4(1,12), TABLA4(1,13), TABLA4(1,14), TABLA4(1,15), TABLA4(1,16), TABLA4(1,17), TABLA4(1,18), TABLA4(1,19)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA14', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA4(1,20), TABLA4(1,21), TABLA4(1,22), TABLA4(1,23), TABLA4(1,24), TABLA4(1,25), TABLA4(1,26), TABLA4(1,27), TABLA4(1,28), TABLA4(1,29),
TABLA4(1,30), TABLA4(1,31), TABLA4(1,32), TABLA4(1,33), TABLA4(1,34)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN, 'TABLA15', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA4(1,39), TABLA4(1,40), TABLA4(1,41), TABLA4(1,42), TABLA4(1,43), TABLA4(1,44), TABLA4(1,45)
(20F12.5)
*CFCLOSE
```

```
)/GOP ! Resume printing after UNDO process
)! We suggest a save at this point
```

Apéndice B. Código ANSYS adelante

```

/NOPR      ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO    ! Echo following commands to log
FINISH     ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
! WE SUGGEST YOU REMOVE THIS LINE AND THE FOLLOWING STARTUP LINES
!*
/NOPR
KEYW,PR_SET,1          !CARACTERISTICAS PRINCIPALES PARA MOSTRAR EN LA GUI, COMO ES UN ANALISIS MODAL, SELECCIONAMOS "Structural"
KEYW,PR_STRUC,1        !LAS DEMAS OPCIONES (ANALISIS TERMICOS, ELECTRICOS, FLUIDOS) NO SON SELECCIONADAS, A RAZON DE ESTO OBTIENEN VALOR "0"
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULT,0
/GO
!*
!*
/PREP7          !INGRESAMOS AL MENU "Preprocessor" -> "Element Type" -> "Add/Edit/Delete"
!*
ET,1,PLANE25     !MANUALMENTE PONEMOS EL TIPO DE ELEMENTO QUE UTILIZAMOS EN NUESTRO ANALISIS "PLANE25"
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,    !A CONTINUACION VAMOS A DEFINIR NUESTRO MATERIAL
MPTEMP,1,0        !INGRESAMOS A "Material Props" -> "Material Models" -> "Structural" -> "Linear" -> "Elastic" -> "Isotropic"
MPDATA,EX,1,,210E9 !INGRESAMOS MODULO DE ELASTICIDAD. PARA EL CASO PROPIO E=210E9
MPDATA,PRXY,1,,0.33 !INGRESAMOS MODULO DE YOUNG. PARA EL CASO PROPIO PRXY=0.33
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7800 !INGRESAMOS A "Density" E INGRESAMOS LA DENSIDAD. PARA EL CASO PROPIO DENS=7800
BLC4,0.05113,0,0.00602,0.03075 !A CONTINUACION REGRESAMOS AL MENU DE "Preprocessor" E INGRESAMOS A "Modeling" -> "Create" -> "Areas" -> "Rectangle" -> "By 2 Corners"
Y ALLI INGRESAMOS LAS MEDIDAS DE LA SECCION TRASVERSAL REPRESENTATIVA DEL LA TUBERIA. X=0.05113; Y=0; W=0.00602; H=0.03075
!*
ESIZE,0.5E-04     !REGRESAMOS AL MENU DE "Preprocessor" E INGRESAMOS A "Meshing" -> "Size Cntrl" -> "SmartSize" -> "Adv Opts"
ALLI EN LA OPCION "SIZE" REGISTRAMOS EL TAMAÑO QUE VA TENER NUESTRO MALLADO. PARA EL CASO PROPIO size=0.00005
SMRTSIZE, ,1,1,2,15,28,1.5,1,1,4,0 !AQUI VEMOS EL REGISTRO DE LAS DEMAS OPCIONES QUE NOS PERMITE REGISTRAR EL MENU "Adv Opts",
A RAZON DE NUESTRO ANALISIS PERMANECEN IGUAL
!*
MSHAPE,0,2D       !UNA VEZ REALIZADO ESTE TRABAJO VOLVEMOS AL MENU "Meshing" Y NOS DIRIGIMOS A LA OPCION "MeshTool"
SE NOS DESPLIEGA UN MENU FLOTANTE; CON EL INDICADOR DEL MAOUSE DAMOS CLICK IZQUIERDO EN EL AREA QUE TENEMOS EN LA INTERFAZ
Y A CONTINUACION CLICK EN "Mesh" Y "Close"
!*OBSERVAREMOS COMO SE VA GENERANDO EL MALLADO EN NUESTRA AREA, LOS INDICADORES A CONTINUACION INFORMAN EL REGISTRO DEL MALLADO
MSHKEY,0
!*
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CPCYC,ALL,0.00001,0,0,0.03075,0,0 !UNA VEZ TERMINADO EL MALLADO, VOLVEMOS AL MENU "Preprocessor" Y NOS DIRIGIMOS A LA OPCION "Coupling/Ceqn".
AQUI VAMOS A PONER NUESTRA CONDICION DE FRONTERA. VAMOS A "Offset Nodes"
Y REGISTRAMOS LA ALTURA QUE DEBE TENER NUESTRO ACOPLAMIENTO QUE DEBE SER IGUAL A LA ALTURA DE LA SECCION TRANSVERSAL DY=0.03
/SOL
!*
!AL TERMINAR ESTA TAREA DAMOS POR FINALIZADO EL PRE-PROCESO DONDE DEFINIMOS EL TIPO DE ELEMENTO,
PROPIEDADES DEL MATERIAL, DISEÑO, MALLADO, CONDICIONES DE CONTORNO. CERRAMOS EL MENU "Preprocessor" Y NOS DIRIGIMOS AL SIGUIENTE MENU "Solution"
ANTYPE,2          !EN EL MENU "Solution" NOS DIRIGIMOS A "Analysis Type" -> "New Analysis" Y SELECCIONAMOS LA OPCION "Modal" (OPCION 2)
!*
!*
MODOPT,LANB,300    !SEGUIDO VAMOS A LA OPCION "Analysis Options" DONDE VAMOS A DEFINIR LAS OPCIONES DEL ANALISIS.
SELECCIONAMOS "Block Lanczos", INGRESAMOS LA CANTIDAD DE MODOS A EXTRAER DE NUESTRO ANALISIS No=300.
EQSLV,SPAR
MXPAND,300, , ,0   !INGRESAMOS TAMBIEN EL NUMERO DE MODOS A EXPANDIR MXPAND=300 Y ACEPTAMOS.
LUMPM,0
PSTRES,0
!*
MODOPT,LANB,300,0,3000000, ,OFF !EN EL NUEVO MENU FLOTANTE SELECCIONAMOS EL RANGO DE FRECUENCIAS
EN LAS QUE VA ENTRAR EN RESONANCIA NUESTRA ESTRUCTURA. FREQUENCIAL=0, FREFINAL=3000000
/STATUS,SOLU
SOLVE             !AL FINALIZAR, DENTRO DEL MENU "Solution" NOS DIRIGIMOS A LA OPCION "Solve" -> "Current LS"
Y DE ESTE MODO NUESTRO ANALISIS EMPEZARA A RESOLVERSE
/POST1            !A PARTIR DE AQUI DEJAREMOS DE UTILIZAR LA GUI Y EMPEZAREMOS A USAR CODIGO BASE APDL SENCILLO PARA SEGUIR CON EL DESARROLLO.
*DIM,TABLA1,ARRAY,12621,75 !DEFINIMOS LA MATRIZ "TABLA1" DONDE VAMOS A INGRESAR EL COMPORTAMIENTO DE LOS 12621 NODOS DE LAS PRIMERAS 75 FRECUENCIAS OBTENIDAS.
*DO,cont,1,75,1   !POR MEDIO DE UN CICLO "DO" EMPEZAMOS A OBTENER EL COMPORTAMIENTO MODAL O LOS "DOF" DE CADA NODO
Y LOS VAMOS INGRESANDO A LA TABLA ANTERIORMENTE DEFINIDA

```

```
*CFCLOS
*CFOPEN, 'TABLA2A', ' ', ' '
*VWRITE, TABLA1(1,1), TABLA1(1,2), TABLA1(1,3), TABLA1(1,4), TABLA1(1,5), TABLA1(1,6), TABLA1(1,7), TABLA1(1,8), TABLA1(1,9), TABLA1(1,10),
TABLA1(1,11), TABLA1(1,12), TABLA1(1,13), TABLA1(1,14), TABLA1(1,15), TABLA1(1,16), TABLA1(1,17), TABLA1(1,18), TABLA1(1,19)
(20F12.5)
*CFCLOSE
```

```

*VWRITE,TABLA1(1,20),TABLA1(1,21),TABLA1(1,22),TABLA1(1,23),TABLA1(1,24),TABLA1(1,25),TABLA1(1,26),TABLA1(1,27),TABLA1(1,28),TABLA1(1,29),
TABLA1(1,30),TABLA1(1,31),TABLA1(1,32),TABLA1(1,33),TABLA1(1,34),TABLA1(1,35),TABLA1(1,36),TABLA1(1,37),TABLA1(1,38)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA3A',' ',' '
*VWRITE,TABLA1(1,39),TABLA1(1,40),TABLA1(1,41),TABLA1(1,42),TABLA1(1,43),TABLA1(1,44),TABLA1(1,45),TABLA1(1,46),TABLA1(1,47),
TABLA1(1,48),TABLA1(1,49),TABLA1(1,50),TABLA1(1,51),TABLA1(1,52),TABLA1(1,53),TABLA1(1,54),TABLA1(1,55),TABLA1(1,56),TABLA1(1,57)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA4A',' ',' '
*VWRITE,TABLA1(1,58),TABLA1(1,59),TABLA1(1,60),TABLA1(1,61),TABLA1(1,62),TABLA1(1,63),TABLA1(1,64),TABLA1(1,65),TABLA1(1,66),TABLA1(1,67),
TABLA1(1,68),TABLA1(1,69),TABLA1(1,70),TABLA1(1,71),TABLA1(1,72),TABLA1(1,73),TABLA1(1,74),TABLA1(1,75)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA5A',' ',' '
*VWRITE,TABLA2(1,1),TABLA2(1,2),TABLA2(1,3),TABLA2(1,4),TABLA2(1,5),TABLA2(1,6),TABLA2(1,7),TABLA2(1,8),TABLA2(1,9),
TABLA2(1,10),TABLA2(1,11),TABLA2(1,12),TABLA2(1,13),TABLA2(1,14),TABLA2(1,15),TABLA2(1,16),TABLA2(1,17),TABLA2(1,18),TABLA2(1,19)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA6A',' ',' '
*VWRITE,TABLA2(1,20),TABLA2(1,21),TABLA2(1,22),TABLA2(1,23),TABLA2(1,24),TABLA2(1,25),TABLA2(1,26),TABLA2(1,27),TABLA2(1,28),
TABLA2(1,29),TABLA2(1,30),TABLA2(1,31),TABLA2(1,32),TABLA2(1,33),TABLA2(1,34),TABLA2(1,35),TABLA2(1,36),TABLA2(1,37),TABLA2(1,38)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA7A',' ',' '
*VWRITE,TABLA2(1,39),TABLA2(1,40),TABLA2(1,41),TABLA2(1,42),TABLA2(1,43),TABLA2(1,44),TABLA2(1,45),TABLA2(1,46),TABLA2(1,47),
TABLA2(1,48),TABLA2(1,49),TABLA2(1,50),TABLA2(1,51),TABLA2(1,52),TABLA2(1,53),TABLA2(1,54),TABLA2(1,55),TABLA2(1,56),TABLA2(1,57)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA8A',' ',' '

*VWRITE,TABLA2(1,58),TABLA2(1,59),TABLA2(1,60),TABLA2(1,61),TABLA2(1,62),TABLA2(1,63),TABLA2(1,64),TABLA2(1,65),TABLA2(1,66),
TABLA2(1,67),TABLA2(1,68),TABLA2(1,69),TABLA2(1,70),TABLA2(1,71),TABLA2(1,72),TABLA2(1,73),TABLA2(1,74),TABLA2(1,75),TABLA2(1,76)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA9A',' ',' '
*VWRITE,TABLA3(1,1),TABLA3(1,2),TABLA3(1,3),TABLA3(1,4),TABLA3(1,5),TABLA3(1,6),TABLA3(1,7),TABLA3(1,8),TABLA3(1,9),TABLA3(1,10),
TABLA3(1,11),TABLA3(1,12),TABLA3(1,13),TABLA3(1,14),TABLA3(1,15),TABLA3(1,16),TABLA3(1,17),TABLA3(1,18),TABLA3(1,19)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA10A',' ',' '
*VWRITE,TABLA3(1,20),TABLA3(1,21),TABLA3(1,22),TABLA3(1,23),TABLA3(1,24),TABLA3(1,25),TABLA3(1,26),TABLA3(1,27),TABLA3(1,28),
TABLA3(1,29),TABLA3(1,30),TABLA3(1,31),TABLA3(1,32),TABLA3(1,33),TABLA3(1,34),TABLA3(1,35),TABLA3(1,36),TABLA3(1,37),TABLA3(1,38)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA11A',' ',' '
*VWRITE,TABLA3(1,39),TABLA3(1,40),TABLA3(1,41),TABLA3(1,42),TABLA3(1,43),TABLA3(1,44),TABLA3(1,45),TABLA3(1,46),TABLA3(1,47),
TABLA3(1,48),TABLA3(1,49),TABLA3(1,50),TABLA3(1,51),TABLA3(1,52),TABLA3(1,53),TABLA3(1,54),TABLA3(1,55),TABLA3(1,56),TABLA3(1,57)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA12A',' ',' '
*VWRITE,TABLA3(1,58),TABLA3(1,59),TABLA3(1,60),TABLA3(1,61),TABLA3(1,62),TABLA3(1,63),TABLA3(1,64),TABLA3(1,65),TABLA3(1,66),TABLA3(1,67),
TABLA3(1,68),TABLA3(1,69),TABLA3(1,70),TABLA3(1,71),TABLA3(1,72),TABLA3(1,73),TABLA3(1,74),TABLA3(1,75),TABLA3(1,76)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA13A',' ',' '

*VWRITE,TABLA4(1,1),TABLA4(1,2),TABLA4(1,3),TABLA4(1,4),TABLA4(1,5),TABLA4(1,6),TABLA4(1,7),TABLA4(1,8),TABLA4(1,9),TABLA4(1,10),
TABLA4(1,11),TABLA4(1,12),TABLA4(1,13),TABLA4(1,14),TABLA4(1,15),TABLA4(1,16),TABLA4(1,17),TABLA4(1,18),TABLA4(1,19)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA14A',' ',' '
*VWRITE,TABLA4(1,20),TABLA4(1,21),TABLA4(1,22),TABLA4(1,23),TABLA4(1,24),TABLA4(1,25),TABLA4(1,26),TABLA4(1,27),TABLA4(1,28),
TABLA4(1,29),TABLA4(1,30),TABLA4(1,31),TABLA4(1,32),TABLA4(1,33),TABLA4(1,34)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA15A',' ',' '
*VWRITE,TABLA4(1,39),TABLA4(1,40),TABLA4(1,41),TABLA4(1,42),TABLA4(1,43),TABLA4(1,44),TABLA4(1,45)
(20F12.5)
*CFCLOSE

)/GOP      ! Resume printing after UNDO process
)/! We suggest a save at this point

```


Apéndice C. Código ANSYS detrás

```

/NOPR      ! Suppress printing of UNDO process
/PMACRO    ! Echo following commands to log
FINISH     ! Make sure we are at BEGIN level
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no SAVE found
! WE SUGGEST YOU REMOVE THIS LINE AND THE FOLLOWING STARTUP LINES
!*
/NOPR
KEYW,PR_SET,1           !CARACTERISTICAS PRINCIPALES PARA MOSTRAR EN LA GUI, COMO ES UN ANALISIS MODAL, SELECCIONAMOS "Structural"
KEYW,PR_STRUC,1         !LAS DEMAS OPCIONES (ANALISIS TERMICOS, ELECTRICOS, FLUIDOS) NO SON SELECCIONADAS, A RAZON DE ESTO OBTIENEN VALOR "0"
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
/GO
!*
!*
/PREP7           !INGRESAMOS AL MENU "Preprocessor" -> "Element Type" -> "Add/Edit/Delete"
!*
ET,1,PLANE25     !MANUALMENTE PONEMOS EL TIPO DE ELEMENTO QUE UTILIZAMOS EN NUESTRO ANALISIS "PLANE25"
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,    !A CONTINUACION VAMOS A DEFINIR NUESTRO MATERIAL
MPTEMP,1,0        !INGRESAMOS A "Material Props" -> "Material Models" -> "Structural" -> "Linear" -> "Elastic" -> "Isotropic"
MPDATA,EX,1,,210E9 !INGRESAMOS MODULO DE ELASTICIDAD. PARA EL CASO PROPIO E=210E9
MPDATA,PRXY,1,,0.33 !INGRESAMOS MODULO DE YOUNG. PARA EL CASO PROPIO PRXY=0.33
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7800 !INGRESAMOS A "Density" E INGRESAMOS LA DENSIDAD. PARA EL CASO PROPIO DENS=7800
BLC4,0.05113,0,0.00602,0.02925 !A CONTINUACION REGRESAMOS AL MENU DE "Preprocessor" E INGRESAMOS A "Modeling" -> "Create" -> "Areas" -> "Rectangle" -> "By 2 Corners"
Y ALLI INGRESAMOS LAS MEDIDAS DE LA SECCION TRASVERSAL REPRESENTATIVA DEL LA TUBERIA. X=0.05113; Y=0; W=0.00602; H=0.02925
.....
!*
ESIZE,0.5E-04     !REGRESAMOS AL MENU DE "Preprocessor" E INGRESAMOS A "Meshing" -> "Size Cntrl" -> "SmartSize" -> "Adv Opts"
ALLI EN LA OPCION "SIZE" REGISTRAMOS EL TAMAÑO QUE VA TENER NUESTRO MALLADO. PARA EL CASO PROPIO size=0.00005
SMRTSIZE, ,1,1,2,15,28,1.5,1,1,4,0 !AQUI VEMOS EL REGISTRO DE LAS DEMAS OPCIONES QUE NOS PERMITE REGISTRAR EL MENU "Adv Opts",
A RAZON DE NUESTRO ANALISIS PERMANECEN IGUAL
!*
MSHKEY,0,2D       !UNA VEZ REALIZADO ESTE TRABAJO VOLVEMOS AL MENU "Meshing" Y NOS DIRIGIMOS A LA OPCION "MeshTool" SE NOS DESPLIEGA UN MENU FLOTANTE;
CON EL INDICADOR DEL MAOUSE DAMOS CLICK IZQUIERDO EN EL AREA QUE TENEMOS EN LA INTERFAZ Y A CONTINUACION CLICK EN "Mesh" Y "Close"
!*OBSERVAREMOS COMO SE VA GENERANDO EL MALLADO EN NUESTRA AREA, LOS INDICADORES A CONTINUACION INFORMAN EL REGISTRO DEL MALLADO
!*
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
CPCYC,ALL,0.00001,0,0,0.02925,0,0 !UNA VEZ TERMINADO EL MALLADO, VOLVEMOS AL MENU "Preprocessor" Y NOS DIRIGIMOS A LA OPCION "Coupling/Ceqn).
AQUI VAMOS A PONER NUESTRA CONDICION DE FRONTERA. VAMOS A "Offset Nodes"
EN EL MENU DESPLEGADO PONEMOS LA TOLERANCIA DEL COUPLING TOLER=0.00001.
Y REGISTRAMOS LA ALTURA QUE DEBE TENER NUESTRO ACOPLAMIENTO QUE DEBE SER IGUAL A LA ALTURA DE LA SECCION TRANSVERSAL DY=0.0292

/SOL
!*
!*
ANTYPE,2
!*
!*
MODOPT,LANB,300    !SEGUIDO VAMOS A LA OPCION "Analysis Options" DONDE VAMOS A DEFINIR LAS OPCIONES DEL ANALISIS.
SELECCIONAMOS "Block Lanczos", INGRESAMOS LA CANTIDAD DE MODOS A EXTRAER DE NUESTRO ANALISIS No=300.

EQSLV,SPAR
MXPAND,300, , ,0    !INGRESAMOS TAMBIEN EL NUMERO DE MODOS A EXPANDIR MXPAND=300 Y ACEPTAMOS.
LUMPM,0
PSTRES,0
!*
MODOPT,LANB,300,0,3000000, ,OFF !EN EL NUEVO MENU FLOTANTE SELECCIONAMOS EL RANGO DE FRECUENCIAS
EN LAS QUE VA ENTRAR EN RESONANCIA NUESTRA ESTRUCTURA. FREQINICIAL=0, FREFINAL=3000000

/STATUS,SOLU
SOLVE              !AL FINALIZAR, DENTRO DEL MENU "Solution" NOS DIRIGIMOS A LA OPCION "Solve" -> "Current LS"
Y DE ESTE MODO NUESTRO ANALISIS EMPEZARA A RESOLVERSE
/POST1
*DIM,TABLA1,ARRAY,12621,75 !A PARTIR DE AQUI DEJAREMOS DE UTILIZAR LA GUI Y EMPEZAREMOS A USAR CODIGO BASE APDL SENCILLO PARA SEGUIR CON EL DESARROLLO.
!DEFINIMOS LA MATRIZ "TABLA1" DONDE VAMOS A INGRESAR EL COMPORTAMIENTO DE LOS 12621 NODOS DE LAS PRIMERAS 75 FRECUENCIAS OBTENIDAS.

*DO,cont,1,75,1
!
```

```

SET, , , , , , cont,
*VGET,TABLA1(1,cont),NODE, ,U,X
*ENDDO

!POR MOTIVOS DE ESFUERZO COMPUTACIONAL Y CONDICIONES MISMAS DE ANSYS 18, DEBEMOS DIVIDIR EL PROCESO.
EN LUGAR DE SACAR LAS 272 FRECUENCIAS EN UNA SOLA TABLA, SACAMOS 4 TABLAS POR SEPARADO.

/SOL
!*
ANTYPE,2
!*
!*
MODOPT,LANB,300
EQSLV,SPAR
MXPAND,300, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0
!*
MODOPT,LANB,300,1410000,3000000, ,OFF !IMPORTANTE: EL PROCESO PARA LA OBTENCION DE LAS 4 TABLAS ES IGUAL SOLO CON UNA EXCEPCION,
EN EL MOMENTO DE REGISTRAR LA FRECUENCIA INICIAL PARA CADA ESTUDIO DEBEMOS GARANTIZAR QUE NO SE REPITAN LAS FRECUENCIAS;
ESTO SE LOGRA CONOCIENDO LA ULTIMA FRECUENCIA DE LA TABLA EXACTAMENTE ANTERIOR. PARA EL CASO PROPIO LA FREQ=75

/STATUS,SOLU
SOLVE
/POST1
*DIM,TABLA2,ARRAY,12621,76

*DO,cont2,1,76,1
SET, , , , , , cont2,
*VGET,TABLA2(1,cont2),NODE, ,U,X
*ENDDO

/SOL
!*
ANTYPE,2
!*
!*
MODOPT,LANB,300
EQSLV,SPAR
MXPAND,300, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0
!*
MODOPT,LANB,300,2120000,3000000, ,OFF
/STATUS,SOLU
SOLVE
/POST1
*DIM,TABLA3,ARRAY,12621,76

*DO,cont3,1,76,1
SET, , , , , , cont3,
*VGET,TABLA3(1,cont3),NODE, ,U,X
*ENDDO

/SOL
!*
ANTYPE,2
!*
!*
MODOPT,LANB,300
EQSLV,SPAR
MXPAND,300, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0
!*
MODOPT,LANB,300,2792000,3000000, ,OFF
/STATUS,SOLU
SOLVE
/POST1
*DIM,TABLA4,ARRAY,12621,45

*DO,cont4,1,45,1
SET, , , , , , cont4,
*VGET,TABLA4(1,cont4),NODE, ,U,X
*ENDDO

!A CONTINUACION SE PROCEDE A EXPORTAR LAS TABLAS YA LLENAS, ANSYS 18 SOLO NOS PERMITE EXPORTAR UN MAXIMO DE 19 DATOS (19 FRECUENCIAS);
A RAZON DE ESTO VOLVEMOS A DIVIDIR LAS 272 FREQ EN FRUPO DE 19 OBTENIENDO EN TOTAL 15 TABLAS A EXPORTAR.

*CFOPEN,'TABLA1D',' ',' '
*VWRITE,TABLA1(1,1),TABLA1(1,2),TABLA1(1,3),TABLA1(1,4),TABLA1(1,5),TABLA1(1,6),TABLA1(1,7),TABLA1(1,8),TABLA1(1,9),TABLA1(1,10),
TABLA1(1,11),TABLA1(1,12),TABLA1(1,13),TABLA1(1,14),TABLA1(1,15),TABLA1(1,16),TABLA1(1,17),TABLA1(1,18),TABLA1(1,19)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA2D',' ',' '
*VWRITE,TABLA1(1,20),TABLA1(1,21),TABLA1(1,22),TABLA1(1,23),TABLA1(1,24),TABLA1(1,25),TABLA1(1,26),TABLA1(1,27),TABLA1(1,28),
TABLA1(1,29),TABLA1(1,30),TABLA1(1,31),TABLA1(1,32),TABLA1(1,33),TABLA1(1,34),TABLA1(1,35),TABLA1(1,36),TABLA1(1,37),TABLA1(1,38)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA3D',' ',' '
*VWRITE,TABLA1(1,39),TABLA1(1,40),TABLA1(1,41),TABLA1(1,42),TABLA1(1,43),TABLA1(1,44),TABLA1(1,45),TABLA1(1,46),TABLA1(1,47),TABLA1(1,48),
TABLA1(1,49),TABLA1(1,50),TABLA1(1,51),TABLA1(1,52),TABLA1(1,53),TABLA1(1,54),TABLA1(1,55),TABLA1(1,56),TABLA1(1,57)
(20F12.5)
*CFCLOSE
*CFOPEN,'TABLA4D',' ',' '

```

```

*VWRITE,TABLA1(1,58),TABLA1(1,59),TABLA1(1,60),TABLA1(1,61),TABLA1(1,62),TABLA1(1,63),TABLA1(1,64),TABLA1(1,65),TABLA1(1,66),TABLA1(1,67),
TABLA1(1,68),TABLA1(1,69),TABLA1(1,70),TABLA1(1,71),TABLA1(1,72),TABLA1(1,73),TABLA1(1,74),TABLA1(1,75)
(20F12.5)
*CFCLOS
*CFOPEN,'TABLA5D',' ',' '
*VWRITE,TABLA2(1,1),TABLA2(1,2),TABLA2(1,3),TABLA2(1,4),TABLA2(1,5),TABLA2(1,6),TABLA2(1,7),TABLA2(1,8),TABLA2(1,9),TABLA2(1,10),
TABLA2(1,11),TABLA2(1,12),TABLA2(1,13),TABLA2(1,14),TABLA2(1,15),TABLA2(1,16),TABLA2(1,17),TABLA2(1,18),TABLA2(1,19)
(20F12.5)
*CFCLOS
*CFOPEN,'TABLA6D',' ',' '
*VWRITE,TABLA2(1,20),TABLA2(1,21),TABLA2(1,22),TABLA2(1,23),TABLA2(1,24),TABLA2(1,25),TABLA2(1,26),TABLA2(1,27),TABLA2(1,28),
TABLA2(1,29),TABLA2(1,30),TABLA2(1,31),TABLA2(1,32),TABLA2(1,33),TABLA2(1,34),TABLA2(1,35),TABLA2(1,36),TABLA2(1,37),TABLA2(1,38)
(20F12.5)
*CFOPEN,'TABLA7D',' ',' '
*VWRITE,TABLA2(1,39),TABLA2(1,40),TABLA2(1,41),TABLA2(1,42),TABLA2(1,43),TABLA2(1,44),TABLA2(1,45),TABLA2(1,46),TABLA2(1,47),TABLA2(1,48),
TABLA2(1,49),TABLA2(1,50),TABLA2(1,51),TABLA2(1,52),TABLA2(1,53),TABLA2(1,54),TABLA2(1,55),TABLA2(1,56),TABLA2(1,57)
(20F12.5)
*CFCLOS
*CFOPEN,'TABLA8D',' ',' '
*VWRITE,TABLA2(1,58),TABLA2(1,59),TABLA2(1,60),TABLA2(1,61),TABLA2(1,62),TABLA2(1,63),TABLA2(1,64),TABLA2(1,65),TABLA2(1,66),
TABLA2(1,67),TABLA2(1,68),TABLA2(1,69),TABLA2(1,70),TABLA2(1,71),TABLA2(1,72),TABLA2(1,73),TABLA2(1,74),TABLA2(1,75),TABLA2(1,76)
(20F12.5)
*CFCLOS
*CFOPEN,'TABLA9D',' ',' '
*VWRITE,TABLA3(1,1),TABLA3(1,2),TABLA3(1,3),TABLA3(1,4),TABLA3(1,5),TABLA3(1,6),TABLA3(1,7),TABLA3(1,8),TABLA3(1,9),TABLA3(1,10),
TABLA3(1,11),TABLA3(1,12),TABLA3(1,13),TABLA3(1,14),TABLA3(1,15),TABLA3(1,16),TABLA3(1,17),TABLA3(1,18),TABLA3(1,19)
(20F12.5)
*CFCLOS
*CFOPEN,'TABLA10D',' ',' '
*VWRITE,TABLA3(1,20),TABLA3(1,21),TABLA3(1,22),TABLA3(1,23),TABLA3(1,24),TABLA3(1,25),TABLA3(1,26),TABLA3(1,27),TABLA3(1,28),TABLA3(1,29),
TABLA3(1,30),TABLA3(1,31),TABLA3(1,32),TABLA3(1,33),TABLA3(1,34),TABLA3(1,35),TABLA3(1,36),TABLA3(1,37),TABLA3(1,38)
(20F12.5)
*CFCLOS
*CFOPEN,'TABLA11D',' ',' '
*VWRITE,TABLA3(1,39),TABLA3(1,40),TABLA3(1,41),TABLA3(1,42),TABLA3(1,43),TABLA3(1,44),TABLA3(1,45),TABLA3(1,46),TABLA3(1,47),TABLA3(1,48),
TABLA3(1,49),TABLA3(1,50),TABLA3(1,51),TABLA3(1,52),TABLA3(1,53),TABLA3(1,54),TABLA3(1,55),TABLA3(1,56),TABLA3(1,57)
(20F12.5)
*CFCLOS
*CFOPEN,'TABLA12D',' ',' '
*VWRITE,TABLA3(1,58),TABLA3(1,59),TABLA3(1,60),TABLA3(1,61),TABLA3(1,62),TABLA3(1,63),TABLA3(1,64),TABLA3(1,65),TABLA3(1,66),
TABLA3(1,67),TABLA3(1,68),TABLA3(1,69),TABLA3(1,70),TABLA3(1,71),TABLA3(1,72),TABLA3(1,73),TABLA3(1,74),TABLA3(1,75),TABLA3(1,76)
(20F12.5)
*CFCLOS
*CFOPEN,'TABLA13D',' ',' '
*VWRITE,TABLA4(1,1),TABLA4(1,2),TABLA4(1,3),TABLA4(1,4),TABLA4(1,5),TABLA4(1,6),TABLA4(1,7),TABLA4(1,8),TABLA4(1,9),TABLA4(1,10),
TABLA4(1,11),TABLA4(1,12),TABLA4(1,13),TABLA4(1,14),TABLA4(1,15),TABLA4(1,16),TABLA4(1,17),TABLA4(1,18),TABLA4(1,19)
(20F12.5)
*CFCLOS
*CFOPEN,'TABLA14D',' ',' '
*VWRITE,TABLA4(1,20),TABLA4(1,21),TABLA4(1,22),TABLA4(1,23),TABLA4(1,24),TABLA4(1,25),TABLA4(1,26),TABLA4(1,27),TABLA4(1,28),
TABLA4(1,29),TABLA4(1,30),TABLA4(1,31),TABLA4(1,32),TABLA4(1,33),TABLA4(1,34)
(20F12.5)
*CFCLOS
*CFOPEN,'TABLA15D',' ',' '
*VWRITE,TABLA4(1,39),TABLA4(1,40),TABLA4(1,41),TABLA4(1,42),TABLA4(1,43),TABLA4(1,44),TABLA4(1,45)
(20F12.5)
*CFCLOS

```

```

)/GOP      ! Resume printing after UNDO process
)! We suggest a save at this point

```

Apéndice D. Código MATLAB

```

%IMPORTAMOS LAS TABLAS OBTENIDAS DEL PROCESO EN ANSYS
load TABLA1
load TABLA2
load TABLA3
load TABLA4
load TABLA5
load TABLA6
load TABLA7
load TABLA8
load TABLA9
load TABLA10
load TABLA11
load TABLA12
load TABLA13
load TABLA14
load TABLA15
load FREQ
%-----
load TABLA1A
load TABLA2A
load TABLA3A
load TABLA4A
load TABLA5A
load TABLA6A
load TABLA7A
load TABLA8A
load TABLA9A
load TABLA10A
load TABLA11A
load TABLA12A
load TABLA13A
load TABLA14A
load TABLA15A
load FREQA
%-----
load TABLA1D
load TABLA2D
load TABLA3D
load TABLA4D
load TABLA5D
load TABLA6D
load TABLA7D
load TABLA8D
load TABLA9D

load TABLA10D
load TABLA11D
load TABLA12D
load TABLA13D
load TABLA14D
load TABLA15D
load FREQD
%-----
%IMPORTAMOS TODOS LOS DESPLAZAMIENTOS A UNA UNICA TABLA.
TABLANODOSX=[TABLA1,TABLA2,TABLA3,TABLA4,TABLA5,TABLA6,TABLA7,TABLA8,TABLA9,TABLA10,TABLA11,TABLA12,TABLA13,TABLA14,TABLA15];
%-----
%A CONTINUACION VAMOS A LISTAR LOS NODOS (EIGENVALUES) CON EL CUAL VAMOS A
%REALIZAR MAC, DEFINIDOS EN EL PRE-ESTUDIO. ESTOS LOS COMPONEN EL NODO #4,
%#1, Y LOS NODOS QUE SE ENCUENTRAN EN EL RANGO ENTRE [642-1240].
EIGENVALUOS(1,:)=TABLANODOSX(4,:); %DEINIMOS EL PRIMER NODO EL CUAL SU ANALOGO ES EL #4.
cont=642;
for x=2:599
    EIGENVALUOS(x,:)=TABLANODOSX(cont,:); %CILO PARA OBTENER LOS NODOS INTERIORES DENTRO DEL RANGO[642-1240].
    cont=cont+1;
end
EIGENVALUOS(x+1,:)=TABLANODOSX(1,:); %DEINIMOS EL ULTIMO NODO EL CUAL SU ANALOGO ES EL #1.
% %-----
%ELIMONAMOS LOS MODOS DENOMINADOS, MODOS ERROR.
EIGENVALUOS(:,1)=[];
EIGENVALUOS(:,1)=[];
EIGENVALUOS(:,7)=[];
FREQ(1,:)=[];
FREQ(1,:)=[];
FREQ(7,:)=[];

```



```

%-----
%MODOS TORSIONALES: POR MEDIO DE UN ANALISIS E INVESTIGACION PODEMOS
%DOCUMENTAR QUE LOS MODOS TORSIONALES NO PRESENTAN DESPLAZAMIENTO EN
%DIRECCION X, POR ESTA RAZON INFERIMOS CUALES FRECUENCIAS DE LAS OBTENIDAS
%EN ANSYS SON MODOS TORSIONALES.
cont=1;
cont2=1;
[filas,columnas]=size(EIGENVALUOS);
for x=1:columnas
    S=sum(EIGENVALUOS(:,x)); %SUMAMOS EL DESPLAZAMIENTO TOTAL.
    if S==0 %SI LA SUMA ES IGUAL A "0"; NOS INDICA QUE NO HUBO DESPLAZAMIENTO CONCLUYENDO QUE SE TRATA DE UN MODO TORSIONAL.
        T2D(cont,2)=FREQ(x,2);
        T2D(cont,1)=x;
        cont=cont+1;
    else
        EIGENVALUOS2(:,cont2)=EIGENVALUOS(:,x); %EN CASO CONTRARIO LOS DIRECCIONAMOS A UNA NUEVA TABLA.
        FREQAPOYO2(cont2,1)=FREQ(x,2);
        cont2=cont2+1;
    end
end
end
%-----
%MODOS TORSIONALES: EXPORTAMOS LA FRECUENCIA RESPECTIVA A LA TABLA
%"TOSIONALES" PERO EN UNA SOLA DIRECCION.
[filas,columnas]=size(T2D);
cont=1;
for x=1:2:filas
    TORSIONALES(cont,2)=T2D(x,2);
    TORSIONALES(cont,1)=cont;
    cont=cont+1;
end
end
%-----
%MAC: APLICAMOS "MAC" CON EL FIN DE PODER DIFERENCIAR ENTRE LOS MODOS
%TORSIONALES CON LOS FLEXURALES.
PAREJALF2=ones(1,2);
[filas,columnas]=size(EIGENVALUOS2);
cont1=1;
cont2=2;
for x=1:1:12247
    MAC= (abs(EIGENVALUOS2(:,cont1)*EIGENVALUOS2(:,cont2)))^2/((EIGENVALUOS2(:,cont1)*EIGENVALUOS2(:,cont1))*(EIGENVALUOS2(:,cont2)*EIGENVALUOS2(:,cont2)));
    if MAC>0.9 %SI EL VALOR DE MAC ES MAYOR A 0.9 EXPORTAMOS LA PAREJA DE MODOS A UNA TABLA.
        PAREJALF2(cont1,1)=FREQAPOYO2(cont1,1);
        PAREJALF2(cont1,2)=FREQAPOYO2(cont2,1);
        cont1=cont1+1;
        cont2=cont1+1;
    else
        cont2=cont2+1;
        if cont2==columnas
            cont1=cont1+1;
            cont2=cont1+1;
        end
    end
end
end
%-----
%NOS DESHACEMOS LAS COLUMNAS CEROS (0) QUE SE GENERAN EN EL CICLO MAC.
[filas,columnas]=size(PAREJALF2);
cont=1;
for x=1:filas
    if PAREJALF2(x,1)~=0
        PAREJALF(cont,1)=PAREJALF2(x,1);
        PAREJALF(cont,2)=PAREJALF2(x,2);
        cont=cont+1;
    end
end
end
%SEPARAMOS LOS MODOS EN LONGITUDINALES Y EN FLEXURALES. Y EN UNA SOLA
%DIRECCION.
[filas,columnas]=size(PAREJALF);
cont=1;
for x=1:2:filas
    LONGITUDINALES(cont,1)=cont;
    LONGITUDINALES(cont,2)=PAREJALF(x,1);
    FLEXURALES(cont,1)=cont;
    FLEXURALES(cont,2)=PAREJALF(x,2);
    cont=cont+1;
end
end
%-----

```

```

%OBTENEMOS LOS LANDA RESPECTIVOS.
[filas,columna]=size(TORSIONALES);
for x=1:filas
    TORSIONALES(x,3)=(0.03)/x;          %OBTENEMOS LANDA CON LA OPERACION ANEXADA TENIENDO EN CUENTA QUE LANDA=L/P P=1,2,3...
end
[filas,columna]=size(LONGITUDINALES);
for x=1:filas
    LONGITUDINALES(x,3)=(0.03)/x;      %OBTENEMOS LANDA CON LA OPERACION ANEXADA TENIENDO EN CUENTA QUE LANDA=L/P P=1,2,3...
end
[filas,columna]=size(FLEXURALES);
for x=1:filas
    FLEXURALES(x,3)=(0.03)/x;        %OBTENEMOS LANDA CON LA OPERACION ANEXADA TENIENDO EN CUENTA QUE LANDA=L/P P=1,2,3...
end
%-----
%OBTENEMOS LAS VELOCIDADES DE FASE (VF).
[filas,columna]=size(TORSIONALES);
for x=1:filas
    W=(2*pi)*(TORSIONALES(x,2));
    KT(x,1)=(2*pi)/(TORSIONALES(x,3));
    VFT(x,1)= W/KT(x,1);
end
[filas,columna]=size(LONGITUDINALES);
for x=1:filas
    W=(2*pi)*(LONGITUDINALES(x,2));
    KL(x,1)=(2*pi)/(LONGITUDINALES(x,3));
    VFL(x,1)= W/KL(x,1);
end
[filas,columna]=size(FLEXURALES);
for x=1:filas
    W=(2*pi)*(FLEXURALES(x,2));
    KF(x,1)=(2*pi)/(FLEXURALES(x,3));
    VFF(x,1)= W/KF(x,1);
end
%-----
%-----
%-----
%-----
%REPETIMOS EL PROCESO PARA UNA PERTURBACION DE 2.5% ADELANTE.
TABLANODOSXA=[TABLA1A,TABLA2A,TABLA3A,TABLA4A,TABLA5A,TABLA6A,TABLA7A,TABLA8A,TABLA9A,TABLA10A,TABLA11A,TABLA12A,TABLA13A,TABLA14A,TABLA15A];
%-----
%CONTINUACION VAMOS A LISTAR LOS NODOS (EIGENVALUES) CON EL CUAL VAMOS A
%REALIZAR MAC, DEFINIDOS EN EL PRE-ESTUDIO. ESTOS LOS COMPONEN EL NODO #4,
%#1, Y LOS NODOS QUE SE ENCUENTRAN EN EL RANGO ENTRE [642-1240].
EIGENVALUOSA(1,:)=TABLANODOSXA(4,:);          %DEINIMOS EL PRIMER NODO EL CUAL SU ANALOGO ES EL #4.
cont=642;
for x=2:599
    EIGENVALUOSA(x,:)=TABLANODOSXA(cont,:);      %CILO PARA OBTENER LOS NODOS INTERIORES DENTRO DEL RANGO[642-1240].
    cont=cont+1;
end
EIGENVALUOSA(x+1,:)=TABLANODOSXA(1,:);          %DEINIMOS EL ULTIMO NODO EL CUAL SU ANALOGO ES EL #1.
%-----
%ELIMINAMOS LOS MODOS DENOMINADOS, MODOS ERROR.
EIGENVALUOSA(:,1)=[];
EIGENVALUOSA(:,1)=[];
EIGENVALUOSA(:,7)=[];
FREQA(1,:)=[];
FREQA(1,:)=[];
FREQA(7,:)=[];
%-----
%MODOS TORSIONALES: POR MEDIO DE UN ANALISIS E INVESTIGACION PODEMOS
%DOCUMENTAR QUE LOS MODOS TORSIONALES NO PRESENTAN DESPLAZAMIENTO EN
%DIRECCION X, POR ESTA RAZON INFERIMOS CUALES FRECUENCIAS DE LAS OBTENIDAS
%EN ANSYS SON MODOS TORSIONALES.
cont=1;
cont2=1;
[filas,columna]=size(EIGENVALUOSA);
for x=1:columna
    S=sum(EIGENVALUOSA(:,x));          %SUMAMOS EL DESPLAZAMIENTO TOTAL.
    if S==0                            %SI LA SUMA ES IGUAL A "0"; NOS INDICA QUE NO HUBO DESPLAZAMIENTO CONCLUYENDO QUE SE TRATA DE UN MODO TORSIONAL.
        T2DA(cont,2)=FREQA(x,2);
        T2DA(cont,1)=x;
        cont=cont+1;
    else

```

```

        EIGENVALUOS2A(:,cont2)=EIGENVALUOSA(:,x); %EN CASO CONTRARIO LOS DIRECCIONAMOS A UNA NUEVA TABLA.
        FREQAPOYO2A(cont2,1)=FREQA(x,2);
        cont2=cont2+1;
    end
end
%-----
%MODOS TORSIONALES: EXPORTAMOS LA FRECUENCIA RESPECTIVA A LA TABLA
%"TOSIONALES" PERO EN UNA SOLA DIRECCION.
[filas,columna]=size(T2DA);
cont=1;
for x=1:2:filas
    TORSIONALES(cont,2)=T2DA(x,2);
    TORSIONALES(cont,1)=cont;
    cont=cont+1;
end
%-----
%MAC: APLICAMOS "MAC" CON EL FIN DE PODER DIFERENCIAR ENTRE LOS MODOS
%TORSIONALES CON LOS FLEXURALES.
PAREJALF2A=ones(1,2);
[filas,columna]=size(EIGENVALUOS2A);
cont1=1;
cont2=2;
for x=1:1:12247
    MACA= (abs(EIGENVALUOS2A(:,cont1)*EIGENVALUOS2A(:,cont2)))^2/((EIGENVALUOS2A(:,cont1)*EIGENVALUOS2A(:,cont1))*(EIGENVALUOS2A(:,cont2)*EIGENVALUOS2A(:,cont2)));
    if MACA>0.9 %SI EL VALOR DE MAC ES MAYOR A 0.9 EXPORTAMOS LA PAREJA DE MODOS A UNA TABLA.
        PAREJALF2A(cont1,1)=FREQAPOYO2A(cont1,1);
        PAREJALF2A(cont1,2)=FREQAPOYO2A(cont2,1);
        cont1=cont1+1;
        cont2=cont1+1;

    else
        cont2=cont2+1;
        if cont2==columna
            cont1=cont1+1;
            cont2=cont1+1;
        end
    end
end
end
%-----
%NOS DESHACEMOS LAS COLUMNAS CEROS (0) QUE SE GENERAN EN EL CICLO MAC.
[filas,columna]=size(PAREJALF2A);
cont=1;
for x=1:filas
    if PAREJALF2A(x,1)~=0
        PAREJALFA(cont,1)=PAREJALF2A(x,1);
        PAREJALFA(cont,2)=PAREJALF2A(x,2);
        cont=cont+1;
    end
end
%SEPARAMOS LOS MODOS EN LONGITUDINALES Y EN FLEXURALES. Y EN UNA SOLA
%DIRECCION.
[filas,columna]=size(PAREJALFA);
cont=1;
for x=1:2:filas
    LONGITUDINALES(cont,1)=cont;
    LONGITUDINALES(cont,2)=PAREJALFA(x,1);
    FLEXURALES(cont,1)=cont;
    FLEXURALES(cont,2)=PAREJALFA(x,2);
    cont=cont+1;
end
%-----
%OBTENEMOS LOS LANDA RESPECTIVOS.
[filas,columna]=size(TORSIONALES);
for x=1:filas
    TORSIONALES(x,3)=(0.03075)/x; %OBTENEMOS LANDA CON LA OPERACION ANEXADA TENIENDO EN CUENTA QUE LANDA=L/P P=1,2,3...
end
[filas,columna]=size(LONGITUDINALES);
for x=1:filas
    LONGITUDINALES(x,3)=(0.03075)/x; %OBTENEMOS LANDA CON LA OPERACION ANEXADA TENIENDO EN CUENTA QUE LANDA=L/P P=1,2,3...
end
[filas,columna]=size(FLEXURALES);
for x=1:filas
    FLEXURALES(x,3)=(0.03075)/x; %OBTENEMOS LANDA CON LA OPERACION ANEXADA TENIENDO EN CUENTA QUE LANDA=L/P P=1,2,3...
end
%-----

```

```

%OBTENEMOS LAS VELOCIDADES DE FASE (VF).
[filas,columnas]=size(TORSIONALES);
for x=1:filas
    WAT(x,1)=(2*pi)*(TORSIONALES(x,2));
    KAT(x,1)=(2*pi)/(TORSIONALES(x,3));
end
[filas,columnas]=size(LONGITUDINALES);
for x=1:filas
    WAL(x,1)=(2*pi)*(LONGITUDINALES(x,2));
    KAL(x,1)=(2*pi)/(LONGITUDINALES(x,3));
end
[filas,columnas]=size(FLEXURALES);
for x=1:filas
    WAF(x,1)=(2*pi)*(FLEXURALES(x,2));
    KAF(x,1)=(2*pi)/(FLEXURALES(x,3));
end
%-----
%-----
%-----
%-----
%REPETIMOS EL PROCESO PARA UNA PERTURBACION DE 2.5% DETRAS.
TABLANODOSXD=[TABLA1D,TABLA2D,TABLA3D,TABLA4D,TABLA5D,TABLA6D,TABLA7D,TABLA8D,TABLA9D,TABLA10D,TABLA11D,TABLA12D,TABLA13D,TABLA14D,TABLA15D];
%-----
%CONTINUACION VAMOS A LISTAR LOS MODOS (EIGENVALUES) CON EL CUAL VAMOS A
%REALIZAR MAC, DEFINIDOS EN EL PRE-ESTUDIO. ESTOS LOS COMPONEN EL NODO #4,
%#1, Y LOS MODOS QUE SE ENCUENTRAN EN EL RANGO ENTRE [642-1240].
EIGENVALUOSD(1,:)=TABLANODOSXD(4,:); %DEINIMOS EL PRIMER NODO EL CUAL SU ANALOGO ES EL #4.
cont=642;
for x=2:599
    EIGENVALUOSD(x,:)=TABLANODOSXD(cont,:); %CILO PARA OBTENER LOS MODOS INTERIORES DENTRO DEL RANGO[642-1240].
    cont=cont+1;
end
EIGENVALUOSD(x+1,:)=TABLANODOSXD(1,:); %DEINIMOS EL ULTIMO NODO EL CUAL SU ANALOGO ES EL #1.
% %-----

%ELIMINAMOS LOS MODOS DENOMINADOS, MODOS ERROR.
EIGENVALUOSD(:,1)=[];
EIGENVALUOSD(:,1)=[];
EIGENVALUOSD(:,7)=[];
FREQD(1,:)=[];
FREQD(1,:)=[];
FREQD(7,:)=[];
%-----
%MODOS TORSIONALES: POR MEDIO DE UN ANALISIS E INVESTIGACION PODEMOS
%DOCUMENTAR QUE LOS MODOS TORSIONALES NO PRESENTAN DESPLAZAMIENTO EN
%DIRECCION X, POR ESTA RAZON INFERIMOS CUALES FRECUENCIAS DE LAS OBTENIDAS
%EN ANSYS SON MODOS TORSIONALES.
cont=1;
cont2=1;
[filas,columnas]=size(EIGENVALUOSD);
for x=1:columnas
    S=sum(EIGENVALUOSD(:,x)); %SUMAMOS EL DESPLAZAMIENTO TOTAL.
    if S==0 %SI LA SUMA ES IGUAL A "0"; NOS INDICA QUE NO HUBO DESPLAZAMIENTO CONCLUYENDO QUE SE TRATA DE UN MODOS TORSIONAL.
        T2DD(cont,2)=FREQD(x,2);
        T2DD(cont,1)=x;
        cont=cont+1;
    else
        EIGENVALUOS2D(:,cont2)=EIGENVALUOSD(:,x); %EN CASO CONTRARIO LOS DIRECCIONAMOS A UNA NUEVA TABLA.
        FREQAPOYO2D(cont2,1)=FREQD(x,2);
        cont2=cont2+1;
    end
end
%-----
%MODOS TORSIONALES: EXPORTAMOS LA FRECUENCIA RESPECTIVA A LA TABLA
%"TOSIONALES" PERO EN UNA SOLA DIRECCION.
[filas,columnas]=size(T2DD);
cont=1;
for x=1:2:filas
    TORSIONALES2D(cont,2)=T2DD(x,2);
    TORSIONALES2D(cont,1)=cont;
    cont=cont+1;
end
%-----
~
%MAC: APLICAMOS "MAC" CON EL FIN DE PODER DIFERENCIAR ENTRE LOS MODOS
%TORSIONALES CON LOS FLEXURALES.
PAREJALF2D=ones(1,2);
[filas,columnas]=size(EIGENVALUOS2D);
cont1=1;
cont2=2;
for x=1:1:12247

```

```

MACD= (abs(EIGENVALUOS2D(:,cont1))*EIGENVALUOS2D(:,cont2))^2/((EIGENVALUOS2D(:,cont1))*EIGENVALUOS2D(:,cont1))*(EIGENVALUOS2D(:,cont2))*EIGENVALUOS2D(:,cont2));
if MACD>0.9 %SI EL VALOR DE MAC ES MAYOR A 0.9 EXPORTAMOS LA PAREJA DE MODOS A UNA TABLA.
    PAREJALF2D(cont1,1)=FREQAPOYO2D(cont1,1);
    PAREJALF2D(cont1,2)=FREQAPOYO2D(cont2,1);
    cont1=cont1+1;
    cont2=cont1+1;

else
    cont2=cont2+1;
    if cont2==columna
        cont1=cont1+1;
        cont2=cont1+1;
    end
end
end
%-----
%NOS DESHACEMOS LAS COLUMNAS CEROS (0) QUE SE GENERAN EN EL CICLO MAC.
[filas,columna]=size(PAREJALF2D);
cont=1;
for x=1:filas
    if PAREJALF2D(x,1)~=0
        PAREJALFD(cont,1)=PAREJALF2D(x,1);
        PAREJALFD(cont,2)=PAREJALF2D(x,2);
        cont=cont+1;
    end
end
%SEPARAMOS LOS MODOS EN LONGITUDINALES Y EN FLEXURALES. Y EN UNA SOLA
%DIRECCION.
[filas,columna]=size(PAREJALFD);
cont=1;
for x=1:2:filas
    LONGITUDINALES2D(cont,1)=cont;
    LONGITUDINALES2D(cont,2)=PAREJALFD(x,1);
    FLEXURALES2D(cont,1)=cont;
    FLEXURALES2D(cont,2)=PAREJALFD(x,2);
    cont=cont+1;
end
%-----
%OBTENEMOS LOS LANDA RESPECTIVOS.
[filas,columna]=size(TORSIONALES2D);
for x=1:filas
    TORSIONALES2D(x,3)=(0.02925)/x; %OBTENEMOS LANDA CON LA OPERACION ANEXADA TENIENDO EN CUENTA QUE LANDA=L/P P=1,2,3...
end
[filas,columna]=size(LONGITUDINALES2D);
for x=1:filas
    LONGITUDINALES2D(x,3)=(0.02925)/x; %OBTENEMOS LANDA CON LA OPERACION ANEXADA TENIENDO EN CUENTA QUE LANDA=L/P P=1,2,3...
end
[filas,columna]=size(FLEXURALES2D);
for x=1:filas
    FLEXURALES2D(x,3)=(0.02925)/x; %OBTENEMOS LANDA CON LA OPERACION ANEXADA TENIENDO EN CUENTA QUE LANDA=L/P P=1,2,3...
end
%-----
[filas,columna]=size(TORSIONALES2D);
for x=1:filas
    WDT(x,1)=(2*pi)*(TORSIONALES2D(x,2));
    KDT(x,1)=(2*pi)/(TORSIONALES2D(x,3));
end
[filas,columna]=size(LONGITUDINALES2D);
for x=1:filas
    WDL(x,1)=(2*pi)*(LONGITUDINALES2D(x,2));
    KDL(x,1)=(2*pi)/(LONGITUDINALES2D(x,3));
end
[filas,columna]=size(FLEXURALES2D);
for x=1:filas
    WDF(x,1)=(2*pi)*(FLEXURALES2D(x,2));
    KDF(x,1)=(2*pi)/(FLEXURALES2D(x,3));
end
%-----
%-----
%-----
%-----
%OBTENEMOS LAS VELOCIDADES DE GRUPO (VG).
[filas,columna]=size(TORSIONALES);
for x=1:filas
    VGT(x,1)= abs(WAT(x,1)-WDT(x,1))/abs(KAT(x,1)-KDT(x,1));
end
[filas,columna]=size(LONGITUDINALES);
for x=1:filas
    VGL(x,1)= abs(WAL(x,1)-WDL(x,1))/abs(KAL(x,1)-KDL(x,1));
end
[filas,columna]=size(FLEXURALES);
for x=1:filas
    VGF(x,1)= abs(WAF(x,1)-WDF(x,1))/abs(KAF(x,1)-KDF(x,1));
end

```

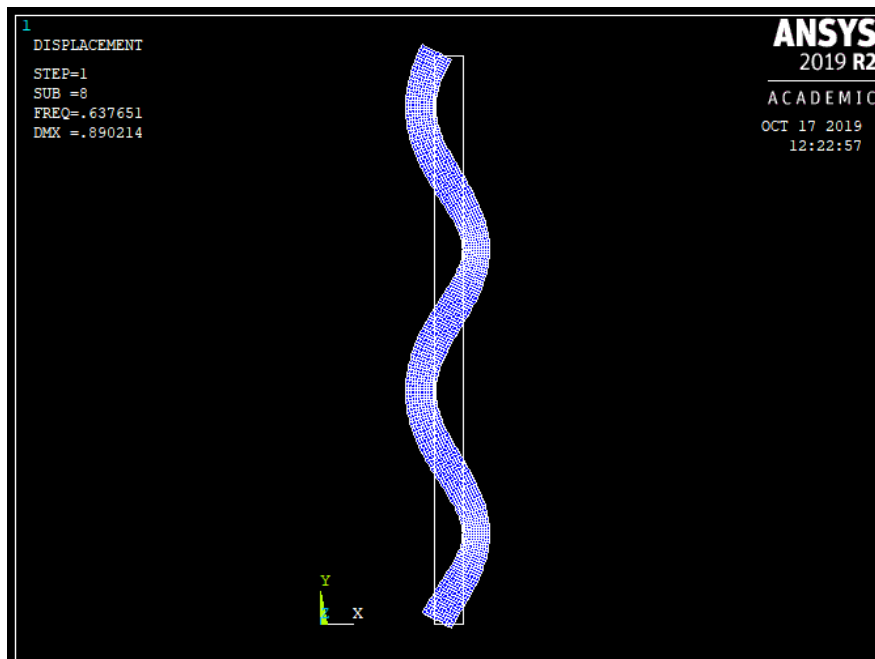
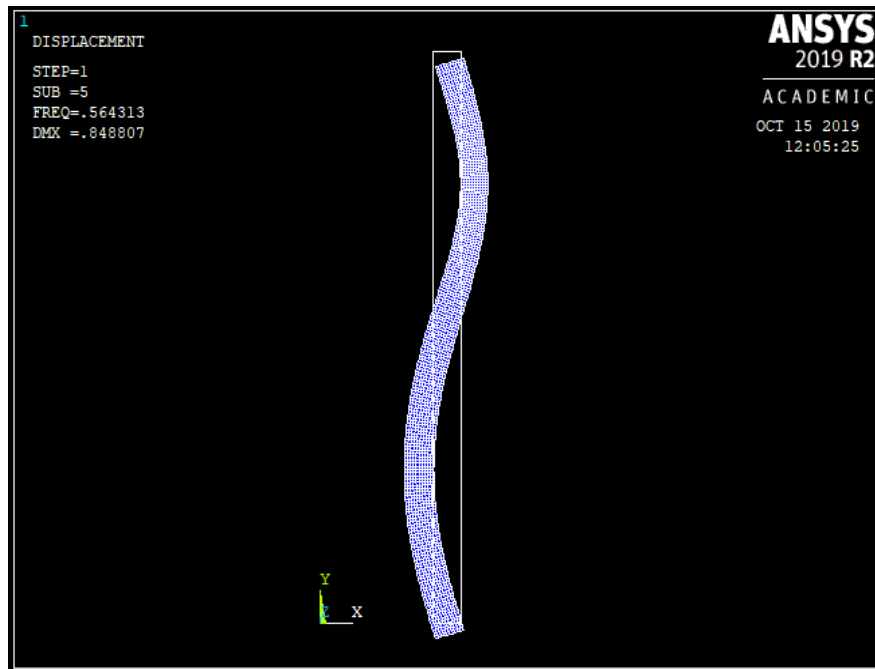
```

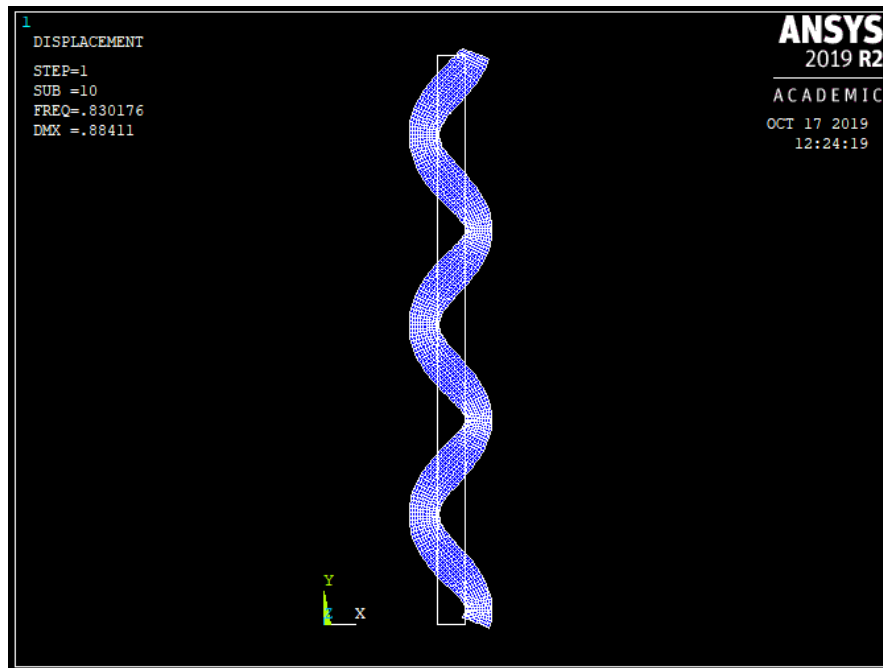
%-----
%-----
%-----
%-----
%-----
%DISPONEMOS EL CODIGO PARA GRAFICAR LAS CURVAS.
%LONGITUD DE ONDA
subplot(2,2,1);
plot(TORSIONALES(:,2),TORSIONALES(:,3),'-r','linewidth',1,'markersize',3,'markeredgecolor','g');
title('LONGITUD DE ONDA');
xlabel('Frecuencia [Hz]');
ylabel('Longitud de Onda (mm)');
hold on
plot(FLEXURALES(:,2),FLEXURALES(:,3),'-b','linewidth',1,'markersize',3,'markeredgecolor','b');
plot(LONGITUDINALES(:,2),LONGITUDINALES(:,3),'-g','linewidth',1,'markersize',3,'markeredgecolor','r');
legend('Flexural','Longitudinal','Torsional','LAMBDA1','LAMBDA2','LAMBDA3');
hold off
%-----
%NUMERO DE ONDA (1/m)
subplot(2,2,2);
plot(TORSIONALES(:,2),KT(:,1),'-r','linewidth',1,'markersize',3,'markeredgecolor','g');
title('NUMERO DE ONDA');
xlabel('FRECUENCIA [Hz]');
ylabel('NUMERO DE ONDA (1/m)');
hold on
plot(FLEXURALES(:,2),KF(:,1),'-b','linewidth',1,'markersize',3,'markeredgecolor','b');
plot(LONGITUDINALES(:,2),KL(:,1),'-g','linewidth',1,'markersize',3,'markeredgecolor','r');
legend('Flexural','Longitudinal','Torsional','KT1','KT2','KT3');
hold off

%-----
%VELOCIDAD DE FASE
subplot(2,2,3);
plot(TORSIONALES(:,2),VFT(:,1),'-r','linewidth',1,'markersize',3,'markeredgecolor','g');
title('VELOCIDAD DE FASE');
xlabel('FRECUENCIA [Hz]');
ylabel('VELOCIDAD DE FASE (m/s)');
hold on
plot(FLEXURALES(:,2),VFF(:,1),'-b','linewidth',1,'markersize',3,'markeredgecolor','b');
plot(LONGITUDINALES(:,2),VFL(:,1),'-g','linewidth',1,'markersize',3,'markeredgecolor','r');
legend('Flexural','Longitudinal','Torsional','VFT','VFF','VFL');
hold off
%-----
%VELOCIDAD DE GRUPO
subplot(2,2,4);
plot(TORSIONALES(:,2),VGT(:,1),'-r','linewidth',1,'markersize',3,'markeredgecolor','g');
title('VELOCIDAD DE GRUPO');
xlabel('FRECUENCIA [Hz]');
ylabel('VELOCIDAD DE GRUPO (m/s)');
hold on
plot(FLEXURALES(:,2),VGF(:,1),'-b','linewidth',1,'markersize',3,'markeredgecolor','b');
plot(LONGITUDINALES(:,2),VGL(:,1),'-g','linewidth',1,'markersize',3,'markeredgecolor','r');
legend('Flexural','Longitudinal','Torsional','VGT','VGF','VGL');
hold off
%-----

```

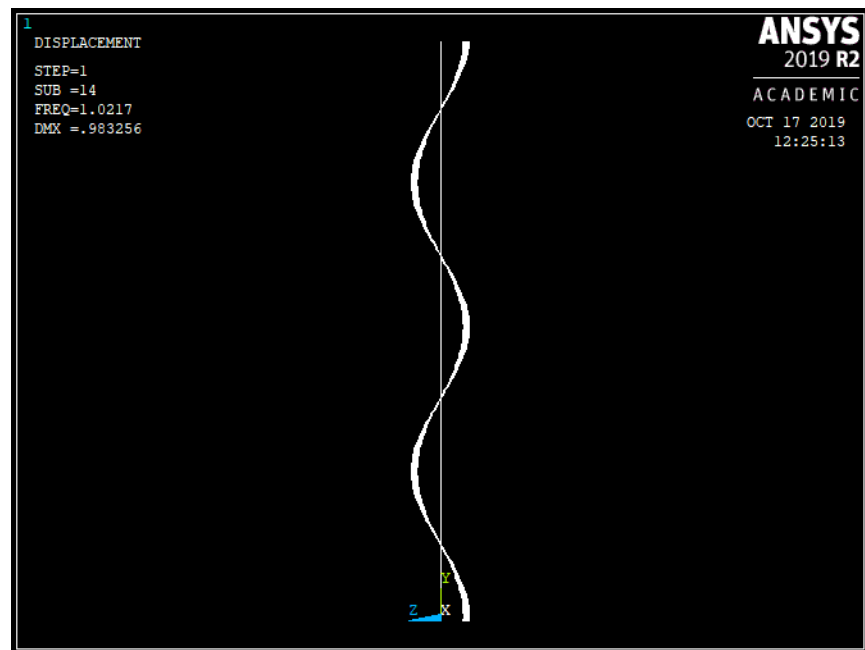
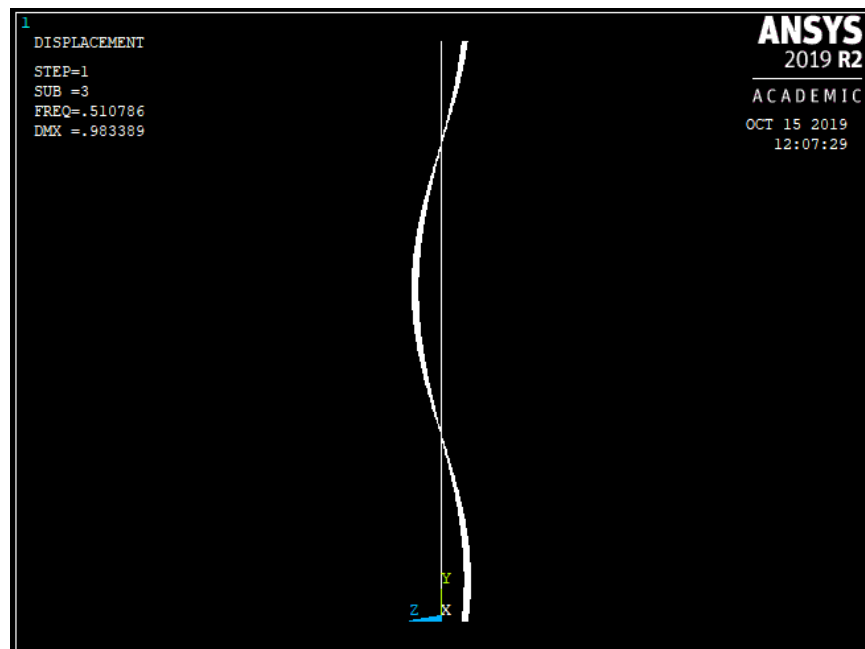

Apéndice E. Graficación del Tipo de modo Longitudinal





Los modos presentados anteriormente pueden ser: L(0,1)-F(1,1), al realizar el proceso de validación con el criterio de aseguramiento modal (MAC), se obtendrá cuál de esos es Longitudinal y cuál es Flexionante.

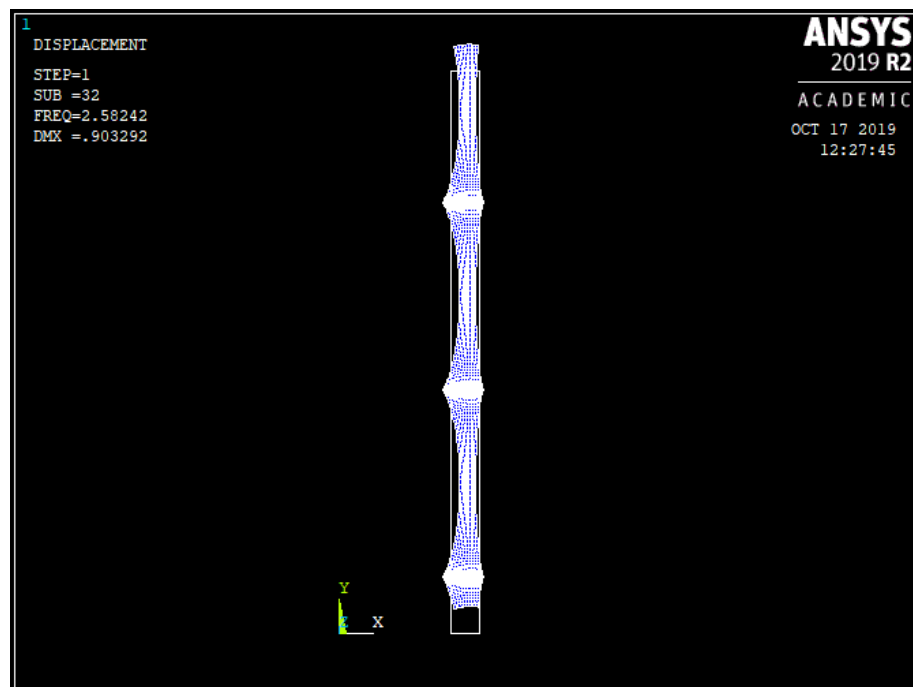
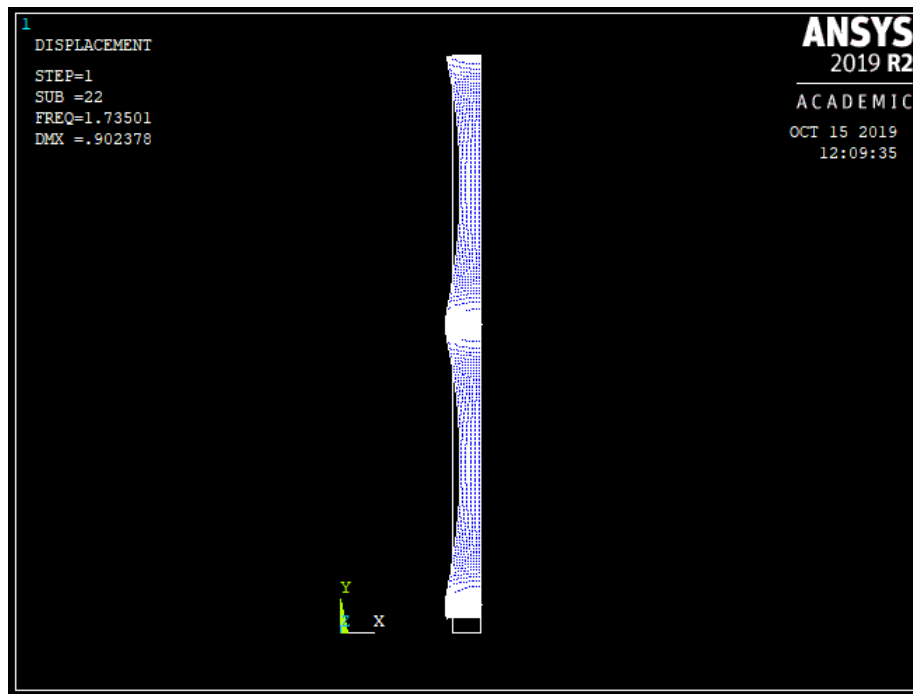
Apéndice F. Graficación del Tipo de modo Torsional

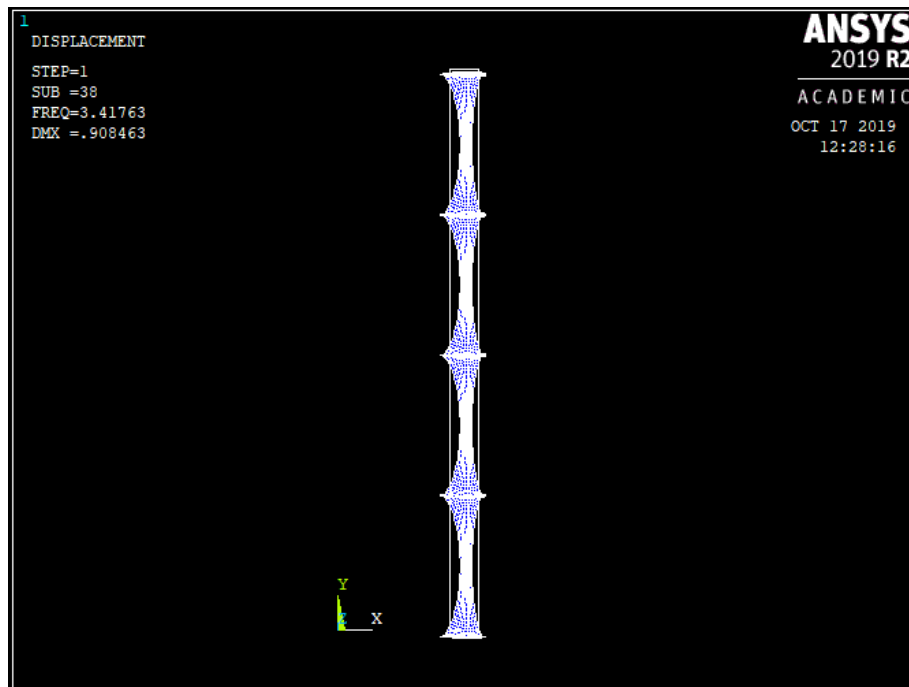




Los modos presentados anteriormente son: $T(0,1)$; no es necesario realizar el proceso de validación con el criterio de aseguramiento modal (MAC), debido a que estos modos no presentan desplazamiento en Z, lo que deduce que son modos Torsionales.

Apéndice G. Graficación del tipo de modo Flexionante





Los modos presentados anteriormente pueden ser: L(0,3)-F(1,3), al realizar el proceso de validación con el criterio de aseguramiento modal (MAC), se obtendrá cuál de esos es Longitudinal y cuál es Flexionante.