



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Análisis de vibraciones de sistemas flexibles para  
alineación de un láser de medida en verificación  
simultánea de máquina-herramienta

Vibration analysis of flexible systems for alignment of  
a measurement laser in simultaneous verification of  
machine tools

Autor

Juan Miguel Urieta Sarasa

Director

Juan José Aguilar Martín

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2022



## Análisis de vibraciones de sistemas flexibles para alineación de un láser de medida en verificación simultánea de máquina-herramienta

### Resumen

El Trabajo de Fin de Grado descrito a continuación detalla el procedimiento para el desarrollo de un sistema flexible de alineación de un láser de medida de alta precisión para la verificación volumétrica de máquina herramienta. Dirigido por Juan José Aguilar Martín, se realiza en el Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

Se plantea como objetivo final de este TFG, el diseño, análisis de vibraciones y desarrollo de un prototipo de sistema flexible para la alineación y posicionamiento de un láser de medida para ser integrado en un brazo telescópico de alta precisión utilizado en la verificación volumétrica de Máquina Herramienta.

Se parte de las bases de un TFG anterior [1].

Lo primero es el re-diseño de una pequeña parte del sistema flexible (adyacente al laser) para integrarle un motor de vibración con el que ampliar el retorno del láser.

Posteriormente se aborda un análisis de las frecuencias y modos de vibración en función del diseño de las láminas del sistema flexible.

Tras el diseño y simulación de estos componentes, se procederá a su fabricación en PLA con fabricación aditiva FDM.

Para poder fabricar los prototipos de las piezas se debe tener en cuenta primero el método de fabricación y el rango adecuado para el posicionamiento y alineación del láser, además de la frecuencia de vibración del motor excéntrico. El diseño de las piezas y su simulación con elementos finitos de las frecuencias y modos de vibración se realiza mediante el programa de diseño 3D Solid Edge. Posteriormente se procederá a su fabricación por fabricación aditiva FDM. Una vez fabricadas las piezas se comprobará su correcto funcionamiento.

La principal necesidad del sistema flexible es que sea un sistema miniaturizado que permita ajustar los grados de libertad requeridos para que el láser mida de forma adecuada en las condiciones de trabajo del brazo telescópico.

El equipo completo en el que se integra esta solución está formado por tres brazos que, de forma simultánea, miden los desplazamientos del cabezal de la máquina respecto de la mesa, lo que permite medir los errores de forma óptima, reducir el error volumétrico global y, finalmente, mejorar la precisión obtenida en los mecanizados.

Respecto al cronograma del trabajo, las fases en las que se ha dividido son, en primer lugar, se realizó el diseño de los diferentes prototipos basados en los principios de los sistemas flexibles con láminas, mediante sistema CAD 3D, con el programa Solid Edge.

En el diseño, se ha buscado regular todos los grados de libertad mediante una única pieza flexible, con suficiente rango para la aplicación, y se ha prestado especial hincapié a las dimensiones geométricas para conseguir un posicionado y alineado del láser preciso.

En primer lugar, se analizaron las frecuencias y modos de vibración en función del diseño de las láminas. También se ha estudiado el efecto de las dimensiones de las láminas en el rango de giro y desplazamiento mediante simulaciones de elementos finitos con el software Solid Edge, con el objetivo de seleccionar justificadamente la opción óptima.

Después, gracias a la fabricación aditiva FDM, se imprimieron (con plástico PLA) los prototipos con mejores resultados en el análisis.

Para conseguir el prototipo óptimo, que tenga el giro y las frecuencias de vibración deseadas, se modificaron de distintas maneras los prototipos anteriores.

Por último, tras volver a imprimir el prototipo final, se realizó una caracterización experimental y análisis de los resultados para verificar el correcto funcionamiento de los prototipos.

## Contenido

Resumen .....	iii
Índice de figuras .....	vi
Índice de tablas .....	viii
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. OBJETIVO .....	1
1.2. ESTRUCTURA.....	2
1.3. CONTENIDO DE LA MEMORIA.....	2
2. ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1. VERIFICACION DE MÁQUINA HERRAMIENTA .....	3
2.2. VERIFICACION VOLUMETRICA .....	4
2.3. SISTEMAS FLEXIBLES .....	5
2.4. BRAZO TELESCOPICO .....	5
2.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
3. ANTECEDENTES .....	8
3.1. ESTUDIO PREVIO MOTORES SELECCIONADOS.....	11
4. DISEÑO BASADO EN LÁMINAS.....	13
4.1. ESTUDIO PREVIO CON PROTOTIPO DE LAMINAS SIMPLE Y UN GRADO DE LIBERTAD .....	14
4.1.1. Objetivo.....	14
4.1.2. Geometría .....	15
4.1.3. Simulación, Resultados, y Conclusiones .....	17
4.2. PROTOTIPO DE LAMINAS Y DOS GRADOS DE LIBERTAD.....	25
4.2.1. Objetivo.....	25
4.2.2. Geometría .....	25
4.2.3. Simulación, Resultados, y Conclusiones .....	26
4.2.4. Fabricación y experimentación del prototipo con 2 grados de libertad .....	29
4.3. MODIFICACIONES PROTOTIPO DE LAMINAS Y DOS GRADOS DE LIBERTAD PARA CONSEGUIR EL GIRO DESEADO.....	30
4.3.1. Disminución de la anchura de la lámina para conseguir el giro deseado.....	34
4.3.2. Disminución de la longitud de la lámina, añadiendo material, para conseguir el giro deseado .....	39
4.3.3. Simulación prototipo “flexural con abrazadera integrada parte superior derecha”.....	45
5. CONCLUSIONES DEL TRABAJO .....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	51
Anexo 1. INFORME DE SIMULACIÓN Y EXPLICACIÓN MODOS DE VIBRACIÓN .....	53
Anexo 2. Simulación por elementos finitos de las alternativas de diseño estudiadas.....	61
Anexo 3. Componentes comerciales.....	86

## Índice de figuras

Figura 1. Ball Bar. Fuente <a href="http://www.renishaw.es">www.renishaw.es</a> .....	3
Figura 2. Interferómetro láser Renishaw para verificación de Máquina Herramienta. ....	4
Figura 3. Verificación volumétrica con Laser Tracker Api. Fuente y Tres Laser Tracker Leica midiendo por multilateración un mismo punto .....	4
Figura 4. Sistema flexible de traslación (a) y de rotación (b). Fuente <a href="http://www.pinterest.es">www.pinterest.es</a> .....	5
Figura 5. Sistema telescópico simultáneo con tridente.....	6
Figura 6. Elementos de medición del sistema telescópico .....	6
Figura 7. Deformación máxima $\Delta x$ del sistema Etalon por su propio peso .....	7
Figura 8. Alineación del láser .....	7
Figura 9. Dimensiones máximas del sistema flexible .....	7
Figura 10. Prototipo (4.6) Solo laminas aluminio (2) .....	8
Figura 11. Prototipo (4.6) Solo laminas aluminio (6) .....	8
Figura 12. Prototipo (4.6) Solo laminas aluminio (5) 2mm (2) .....	9
Figura 13. Prototipo Vibración 2 motores (1) .....	9
Figura 14. Excel “Cardan”. .....	10
Figura 15. Motor seleccionado. ....	12
Figura 16. Prototipo para prueba del radio del enganche del motor.....	13
Figura 17. Geometría del prototipo Vibración 2 motores (1).....	16
Figura 18. Vinculación y parametrización de variables en diseño paramétrico. ....	16
Figura 19. Resultado de una simulación en Solid Edge .....	17
Figura 20. Variación de la frecuencia de vibración con la longitud y el espesor de la lámina, para una anchura de 10 mm.....	18
Figura 21. Variación de la frecuencia de vibración con la longitud y el espesor de la lámina, para una anchura de 15 mm.....	18
Figura 22. Variación de la frecuencia de vibración con la longitud y el espesor de la lámina, para una anchura de 20 mm.....	19
Figura 23. Variación de la frecuencia de vibración con la longitud y el espesor de la lámina, para una anchura de 25 mm.....	19
Figura 24. Variación de la frecuencia de vibración con la longitud y el espesor de la lámina, para una anchura de 30 mm.....	20
Figura 25. Variación de la frecuencia de vibración con la anchura de la lámina.....	21
Figura 26. Ventana e información del mallado.....	21
Figura 27. Variación de la frecuencia de vibración con la longitud y el espesor de la lámina, para una anchura de 10 mm.....	22
Figura 28. Comparación de la frecuencia de vibración entre el PLA y el Aluminio 7075, para espesor de lámina 1mm. ....	23
Figura 29. Comparación de la frecuencia de vibración entre el PLA y el Aluminio 7075, para espesor de lámina 2mm. ....	24
Figura 30. Comparación de la frecuencia de vibración entre el PLA y el Aluminio 7075, para espesor de lámina 3mm. ....	24
Figura 31. Geometría del nuevo prototipo de láminas y dos grados de libertad (c)), y su evolución. .....	26
Figura 32. Simulación del prototipo para anchura de lámina 12mm, 731 Hz .....	27
Figura 33. Simulación del prototipo para anchura de lámina 10mm, 620 Hz .....	27
Figura 34. Simulación del prototipo para anchura de lámina 15mm, 633 Hz .....	27
Figura 35. Simulación del prototipo para anchura de lámina 20mm, 655 Hz .....	28

---

Figura 36. Simulación del prototipo 2 para anchura de lámina 12mm, 357 Hz, habiendo reducido la anchura de sus laminas.....	28
Figura 37. Prototipos fabricados con fabricación aditiva FDM en PLA.....	29
Figura 38. Amplitud del láser en el laboratorio.....	29
Figura 39. Resultados de amplitud de giro en el laboratorio .....	30
Figura 40. Fuerzas aplicadas al prototipo.....	30
Figura 41. Geometría del prototipo con los conos.....	31
Figura 42. Fuerzas y empotramiento de prototipo .....	31
Figura 43. Puntos para el cálculo del giro de prototipo.....	31
Figura 44. Desplazamientos del prototipo.....	32
Figura 45 Ventana de Solid Edge con las coordenadas de los puntos.....	32
Figura 46. Simulaciones y cálculos de las fuerzas y sus respectivos giros obtenidos.....	33
Figura 47. Geometría del prototipo.....	34
Figura 48. Video imprimiendo una pieza.....	37
Figura 49. Simulación en el laboratorio de Pieza 1.....	38
Figura 50. Simulación en el laboratorio de Pieza 2.....	38
Figura 51. Geometría del prototipo al añadirme material por el interior, recortando 1mm de la longitud de las láminas.....	39
Figura 52. Geometría del prototipo al añadirme material por el interior, recortando 2mm de la longitud de las láminas.....	40
Figura 53. Geometría del prototipo al añadirme material por el interior, recortando 4mm de la longitud de las láminas.....	40
Figura 54. Gráficas comparativas de los resultados sin añadir material y recortando 1mm de la longitud añadiendo material.....	42
Figura 55. Gráficas comparativas de los resultados sin añadir material y recortando 4mm de la longitud añadiendo material.....	43
Figura 56. Geometría del prototipo flexural con abrazadera integrada parte superior derecha ....	45
Figura 57. Puntos seleccionados del prototipo flexural con abrazadera integrada parte superior derecha.....	46
Figura 58. Simulación de prototipo flexural con abrazadera integrada parte superior derecha.....	46

## Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros de los materiales utilizados en los prototipos.....	15
Tabla 2. Dimensiones iniciales de las láminas.....	25
Tabla 3. Resultados de la simulación inicial del prototipo con 2 grados de libertad.....	35
Tabla 4. Resultados de las simulaciones del prototipo con 2 grados de libertad.....	35
Tabla 5. Cálculo del giro y frecuencias del prototipo con 2 grados de libertad.....	37
Tabla 6. Cálculo del giro y frecuencias del prototipo con 2 grados de libertad, variando espesores, anchura y longitud de láminas.....	41
Tabla 7. Cálculo del giro y frecuencias del prototipo flexural con abrazadera integrada parte superior derecha.....	47

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo de Fin de Grado “Análisis de vibraciones de sistemas flexibles para alineación de un láser de medida en verificación simultánea de máquina-herramienta” ha sido realizado en el Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación y la parte experimental en el Taller de Mecánica de Precisión y en el Laboratorio de Metrología de Fabricación del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

### 1.1. OBJETIVO

El objetivo fundamental de este trabajo es el análisis de vibraciones, diseño y fabricación de un sistema flexible que permita la alineación y posicionamiento de un láser de medida para garantizar el correcto funcionamiento de un brazo con guiado telescópico de alta precisión que facilita la toma de medidas para la verificación volumétrica de la máquina mediante multilateración simultánea.

Partimos de un diseño anterior del sistema (del TFG antecesor) donde se le integra un motor de vibración con el que hacer el estudio de vibraciones y poder ampliar el retorno del láser.

Y posteriormente se realiza un análisis de las frecuencias y modos de vibración en función del diseño de las láminas del sistema flexible. Tras el diseño y simulación de estos componentes, se procederá a su fabricación con PLA y fabricación aditiva FDM.

En la fase de diseño y análisis del sistema flexible contaremos con los siguientes requisitos:

- Sistema flexible con rango adecuado para el posicionamiento y alineación del láser en la aplicación del brazo telescópico, es decir, al menos  $\pm 1$  mrad en giro y  $\pm 2$  mm en posición.
- Grados de libertad de giro y posición simultáneos.
- Precisión, estabilidad y facilidad de regulación.
- Dimensiones geométricas miniaturizadas de cómo máximo 44 mm de diámetro y 30 mm de longitud y tolerancias adecuadas para ser integrado en el brazo telescópico para verificación volumétrica.
- Diseño basado en sistemas flexibles monolíticos para reducir rozamiento e histéresis.
- Diseño para fabricación y montaje sencillos.
- Prototipos de materiales plásticos como PLA y el sistema flexible definitivo en aluminio.
- Bajo coste.

## 1.2. ESTRUCTURA

Las fases en las que se han dividido las actividades realizadas para la elaboración de la opción óptima del prototipo son:

En primer lugar, se realizó un estudio previo con un prototipo de un solo grado de libertad. El objetivo de este estudio previo era el análisis de los modos de vibración y como variaban las frecuencias con las dimensiones de las láminas.

La segunda fase consistió en diseñar un prototipo con 2 grados de libertad también basado en láminas, a este prototipo también se realizó un análisis modal de sus frecuencias de vibración para buscar una compensación en los giros azimut y elevación.

A este prototipo inicial, se le fueron haciendo una serie de modificaciones, mediante la herramienta CAD Solid Edge, para conseguir los requerimientos técnicos de frecuencias y giros deseados.

Posteriormente, fabricar los prototipos con mejores resultados en el análisis, mediante fabricación aditiva FDM para la realización de ensayos experimentales preliminares y más adelante, realizar un diseño definitivo para ser fabricado mediante fabricación aditiva FDM. Terminando con un análisis de los resultados para verificar el correcto funcionamiento.

## 1.3. CONTENIDO DE LA MEMORIA

La memoria de este proyecto se organiza de la siguiente manera:

- En el **capítulo 2**, se lleva a cabo el planteamiento del problema y el análisis del estado del arte relacionado con la verificación volumétrica y los sistemas flexibles.
- En el **capítulo 3**, antecedentes de este trabajo y un estudio previo del tipo de motores que han sido seleccionados.
- En el **capítulo 4**, se realiza el análisis de diseño basadas en láminas, se empieza con un estudio previo de 1 grado de libertad, luego se pasa a 2 grados de libertad y por último se le realizan distintas modificaciones al prototipo que buscan conseguir los requerimientos de giro y frecuencias de vibración.
- Por último, en el **capítulo 5** se exponen las conclusiones que se extraen del desarrollo de este proyecto.

En los anexos se incluye la siguiente información adicional:

- En el **anexo 1**, se encuentra el informe de simulación y la explicación de los modos de vibración.
- En el **anexo 2** se encuentran los análisis adicionales de los casos de simulación por elementos finitos.
- En el **anexo 3**, se muestra la información de los componentes comerciales utilizados en el prototipo final.

## 2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo del trabajo se va a analizar el estado del arte relacionado con la verificación de las máquinas herramienta. También se realiza un breve análisis del uso de los sistemas flexibles. Posteriormente se describen los nuevos enfoques que se están empezando a utilizar con sistemas basados en brazos telescópicos, concluyendo con la necesidad de desarrollar este nuevo sistema que pretende mejorar la alineación del láser de medida.

### 2.1. VERIFICACION DE MÁQUINA HERRAMIENTA

La verificación en general se define como los diferentes procesos que se realizan en la justificación de un determinado requisito previsto. Dentro del campo de la ingeniería de fabricación, la verificación de Máquina Herramienta permite extraer información metrológica y característica de cada máquina; a partir de la cual mejorar su comportamiento permitiendo garantizar la precisión de las piezas fabricadas [2].

Los errores más importantes son los errores **geométricos** y **cinemáticos** (EGC) sin carga, debidos a imperfecciones en la geometría y dimensiones de los componentes de la máquina, movimientos relativos, juegos, desalineaciones de ejes y errores de los sistemas de medición.

También hay que tener en cuenta el comportamiento de estos errores EGC con **carga**, los errores **térmicos** y los errores por fuerzas **dinámicas** de conformado.

Mejorar la precisión de las MHCN ha sido un problema recurrente en el campo de la fabricación mecánica y de la ingeniería de precisión.

La **compensación** de errores se ha convertido en la estrategia seguida para mejorar la precisión de fabricación de las Máquinas Herramienta de Control Numérico (MHCN). La medición rápida y precisa de los errores geométricos de las MHCN es una necesidad cada vez más importante para fabricantes y usuarios de estas máquinas [3].

Sin embargo, existen dos retos clave en la compensación de errores de las MHCN: medir todos los EHC con precisión y establecer un modelo de compensación de errores preciso.

Para medir los EGC de ejes lineales de MHCN, se pueden llevar a cabo métodos de medición: **directos** e **indirectos** [4].

Los métodos de medición **indirecta** requieren un movimiento de varios ejes de la máquina [5], como por ejemplo la medición con barra de bolas (Figura 1).

Estos métodos tienen una alta eficiencia de medición y configuración de medición simple. Pero requieren un modelo complejo de desacoplamiento de errores, lo que dificulta la medición de errores concretos en tiempo real [7].



Figura 1. Ball Bar. Fuente [www.renishaw.es](http://www.renishaw.es)

Por otro lado, los métodos de **medición directa** tienen una alta precisión de medición en la medición física de errores individuales. Un método clásico es la interferometría láser (Figura ). Sin embargo, la eficiencia es baja ya que lleva varias horas medir todos los errores, el entorno de medición puede cambiar debido a variaciones térmicas. Por lo tanto, es difícil garantizar la estabilidad y la repetibilidad de los resultados de la medición, y la precisión general se reduce.

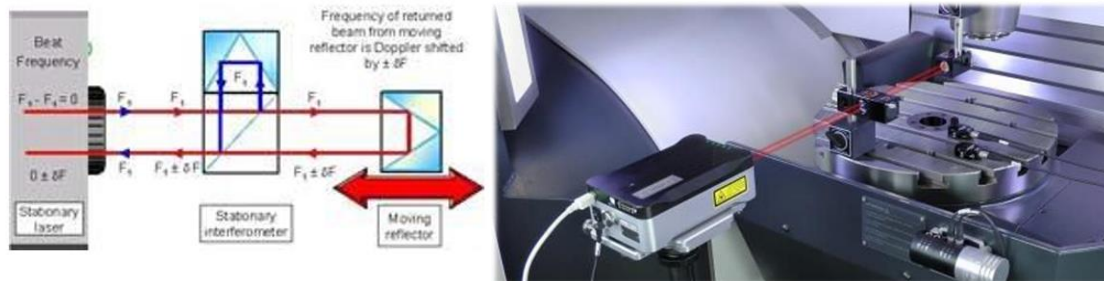


Figura 2. Interferómetro láser Renishaw para verificación de Máquina Herramienta.

Fuente [www.renishaw.es](http://www.renishaw.es)

## 2.2. VERIFICACION VOLUMETRICA

La tendencia a disminuir los errores de fabricación hace que la precisión volumétrica alcanzable sea cada vez más sensible a los tipos errores anteriores, haciendo necesario el desarrollo de nuevas soluciones que permitan incrementar la precisión alcanzable bajo tiempos de verificación industrialmente viables [6].

La verificación volumétrica realiza la **identificación** global de errores para un modelo concreto de máquina a partir solo de datos de errores de posicionamiento distribuidos en el volumen de trabajo. Los errores de posicionamiento se obtienen al comparar las posiciones programadas con las medidas por el instrumento de medida (Figura ).

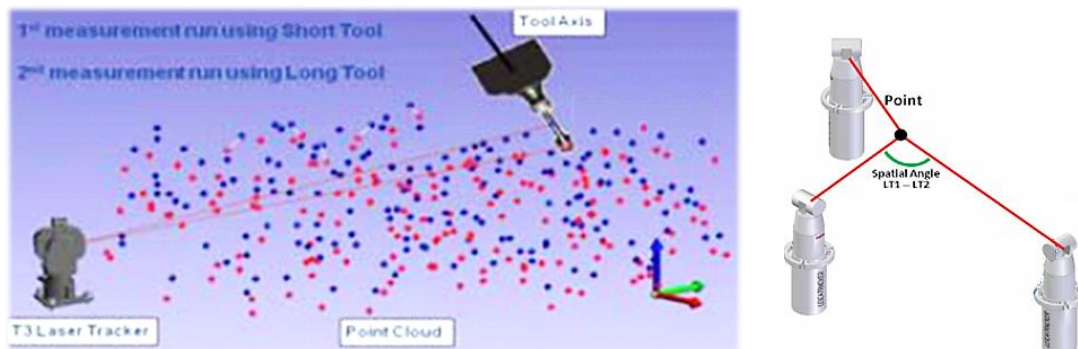


Figura 3. Verificación volumétrica con Laser Tracker Api. Fuente [www.apimetrolgy.de/](http://www.apimetrolgy.de/) y Tres Laser Tracker Leica midiendo por multilateración un mismo punto [6].

La reducción de la influencia de los errores aleatorios del instrumento de medida se realiza mediante la aplicación de la técnica de **multilateración**, que utiliza la información radial que proporciona la medición de un punto desde tres posiciones diferentes con las que determinar las coordenadas, sin información de la componente angular de los Laser Trackers (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

### 2.3. SISTEMAS FLEXIBLES

La mayoría de los mecanismos empleados en fabricación utilizan conexiones mecánicas rígidas, las cuales permiten diferentes **grados de libertad**.

Las uniones flexibles ofrecen una alternativa a las juntas mecánicas convencionales, eliminando fricción, holguras y desgaste. Además, la construcción monolítica de las mismas permite una precisión submicrométrica y simplifica su fabricación [8].

En los últimos años, se han investigado y desarrollado muchas uniones flexibles, que pueden ser uniones con **ejes** y uniones con **láminas**, con y sin **entalla**.

La mayor parte de sistemas de posicionamiento basados en torsión y/o flexión, están constituidos por uniones flexibles. A modo de ejemplo se muestra en la Figura un caso de sistema flexible con un solo grado de libertad de **traslación** y otro de **rotación**.

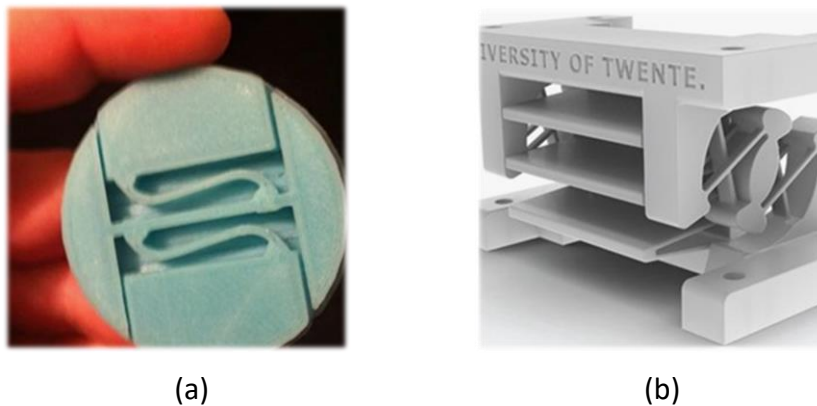


Figura 4. Sistema flexible de traslación (a) y de rotación (b). Fuente [www.pinterest.es](http://www.pinterest.es)

Las uniones flexibles tienen ciertos inconvenientes a tener en cuenta en el diseño:

- El **Rango de movimiento** de una articulación flexible está limitado por la geometría y las tensiones admisibles del material.
- Movimientos **parásitos**: la mayor parte de las uniones flexibles también experimentan un movimiento impreciso.
- **Concentración de tensiones**: Dependiendo de la forma de sus secciones, las uniones flexibles pueden ser propensas a altas concentraciones de tensiones.

Se puede conseguir un rango de movimiento mayor con láminas más largas y delgadas. Sin embargo, la longitud de estos elementos flexibles está limitada por el requisito de **miniaturización**, y el espesor mínimo está restringido por el **proceso de fabricación** utilizado. Por lo tanto, resulta complicado diseñar sistemas flexibles con un amplio rango de movimiento y un tamaño compacto al mismo tiempo [8].

### 2.4. BRAZO TELESCOPICO

En el caso de MHCN pequeñas o medianas, en vez de utilizar un sistema láser con seguimiento automático (Laser Tracker), se han comenzado a desarrollar sistemas telescópicos que realizan el seguimiento de forma mecánica, arrastrados por la propia máquina. Uno de los extremos del sistema se conecta al cabezal de la máquina mediante una **bola** ferromagnética y un **acoplamiento cinemático** imantado [9].

En la Universidad de Zaragoza (UZ) se viene trabajando en un sistema telescópico para verificación volumétrica de MHCN basado en multilateración láser, pero usando un acoplamiento cinemático especial (**tridente**) que permite la medición **simultánea** de tres brazos telescópicos (Figura ).

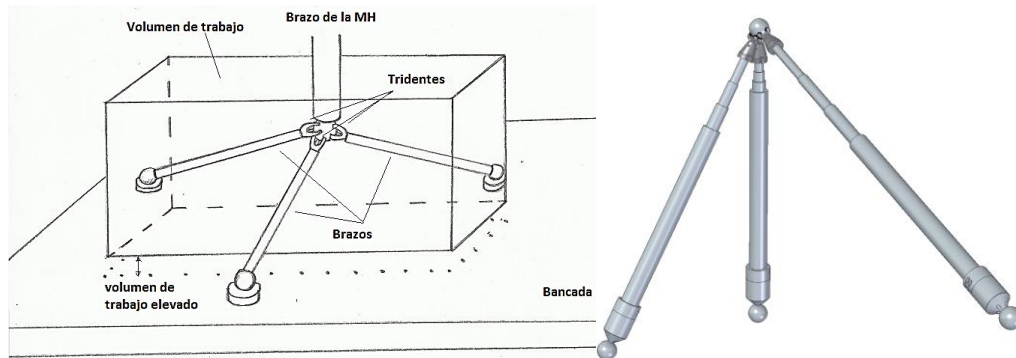


Figura 5. Sistema telescópico simultáneo con tridente

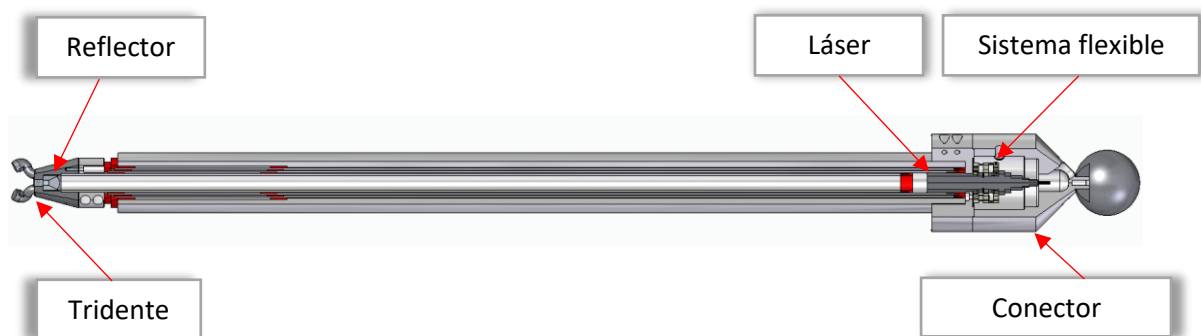


Figura 6. Elementos de medición del sistema telescópico

De esta forma las mediciones se pueden realizar en **un solo ciclo**, lo que reduce el **tiempo** de la verificación y aumenta la precisión al capturar toda la información en el mismo.

En la configuración mostrada en la Figura , en el extremo izquierdo del brazo y dentro del tridente, se coloca un **reflector** formado por tres espejos perpendiculares para que devuelva la señal del láser. En el extremo derecho, y dentro del **conector**, se coloca el sistema de alineación y el **láser** de medida. En el prototipo inicial se ha utilizado un **sistema flexible** (flexural) comercial basado en dos láminas flexibles con las que se puede regular solo los dos ángulos de alineamiento de azimut y elevación. Todos estos componentes comerciales se encuentran en el Anexo 3.

## 2.5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema que presenta la configuración descrita anteriormente es que el sistema telescópico se **deforma** debido a su propio **peso** por flexión de los tubos y debido al **juego** existente entre ellos (Figura ). La deformación máxima ocurre cuando el brazo trabaja en posiciones horizontales ( $\alpha=0$ ) y se encuentra totalmente extendido. El parámetro  $\Delta x$  es la máxima distancia entre el centro del reflector y el eje del conector.

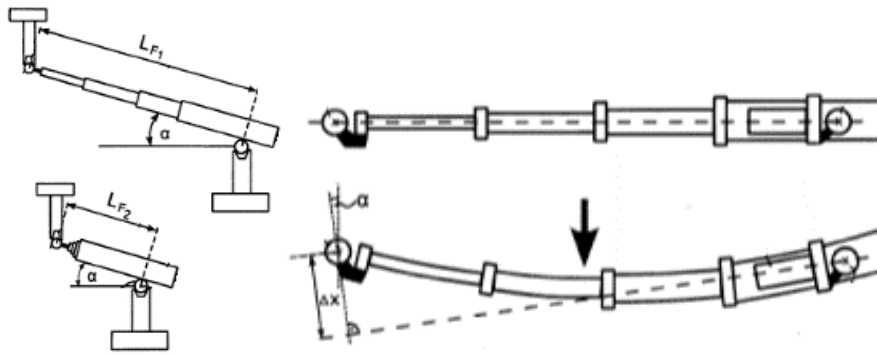


Figura 7. Deformación máxima  $\Delta x$  del sistema Etalon por su propio peso

Se ha comprobado experimentalmente que la señal de retorno del láser disminuye cuando el valor de  $\Delta x$  aumenta, llegando a un punto en torno a **2 mm** en el que la señal no es suficiente. Como la medida del láser es relativa, esto implica la imposibilidad de seguir midiendo.

Otro efecto observado experimentalmente es que, por **errores de fabricación y montaje** de los componentes del brazo telescópico, es necesario alinear el láser (para conseguir una señal de retorno máxima) en un punto cercano a la **mitad** del rango, para que en el punto de longitud mínima y en el de longitud máxima  $\Delta x$  tenga un valor lo menor posible (línea roja en Figura ).

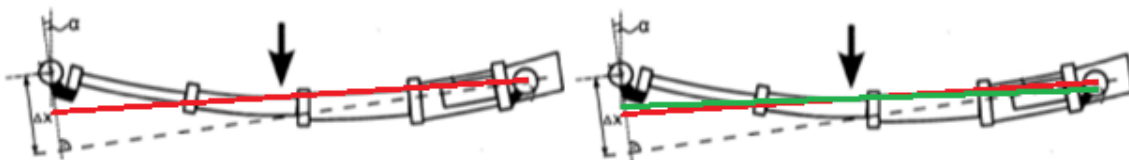


Figura 8. Alineación del láser

La función del prototipo del **sistema flexible** desarrollado en este TFG es posicionar, alinear y hacer vibrar el láser que mide la distancia entre los extremos del brazo telescópico. De esta forma se podrá ajustar adecuadamente el láser y realizar la verificación volumétrica simultánea de MHCN con tres brazos a la vez y sin que se corte la señal.

Debido a las dimensiones reducidas del prototipo, no se conoce ninguna solución comercial que pueda utilizarse para esta función de ajuste. En la siguiente imagen se observa el lugar en el que se ha de incorporar el nuevo sistema flexible.

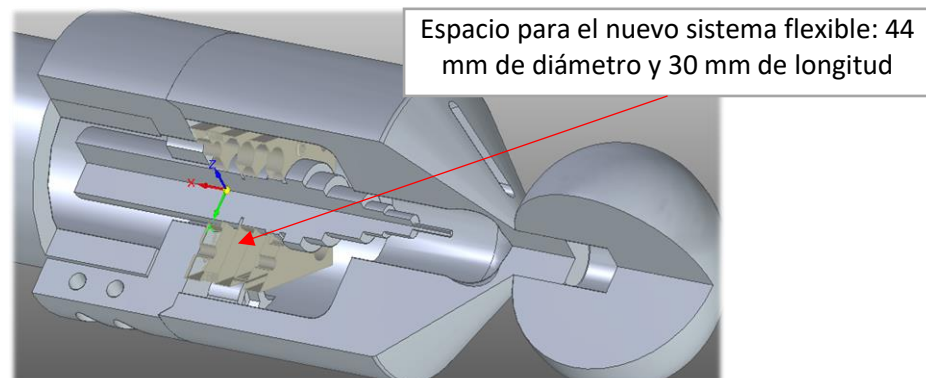


Figura 9. Dimensiones máximas del sistema flexible

### 3. ANTECEDENTES

Tras comentar el planteamiento del problema y el análisis del estado del arte relacionado con la verificación volumétrica y los sistemas flexibles, y antes de comenzar con las simulaciones.

Se ve oportuno, comentar que este TFG, es la continuación de uno anterior en el que ya se realizaron simulaciones de varios prototipos basados en ejes y láminas, pero sin entrar a evaluar las frecuencias de vibración, ya que esa es la característica de este TFG, analizar las frecuencias de vibración de algunos de los prototipos del TFG anterior (que fueron aportados por el director del TFG) rediseñándolos para conseguir una compensación de frecuencias en los giros azimut y elevación. [1]

La información, prototipos e ideas de partida de este trabajo que se relaciona con el TFG anterior [1], sirven de base para conocer el contexto y los pasos que ya se han dado en este campo.

Estos conocimientos aportados consistieron en varios archivos con prototipos del programa Solid Edge, entre los que se encuentran:

- (4.6) Solo laminas aluminio (2): Este prototipo no se ha utilizado para ninguna simulación, aunque sí que ha servido de inspiración para los siguientes prototipos diseñados.

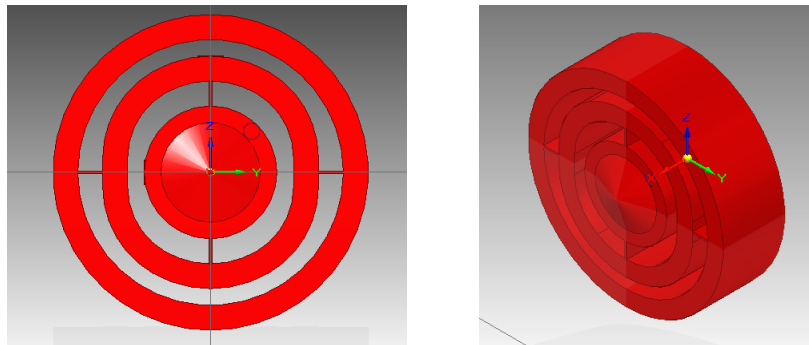


Figura 2. Prototipo (4.6) Solo laminas aluminio (2)

- (4.6) Solo laminas aluminio (6) 2mm: Este prototipo no se ha utilizado para ninguna simulación, aunque sí que ha servido de inspiración para los siguientes prototipos diseñados.

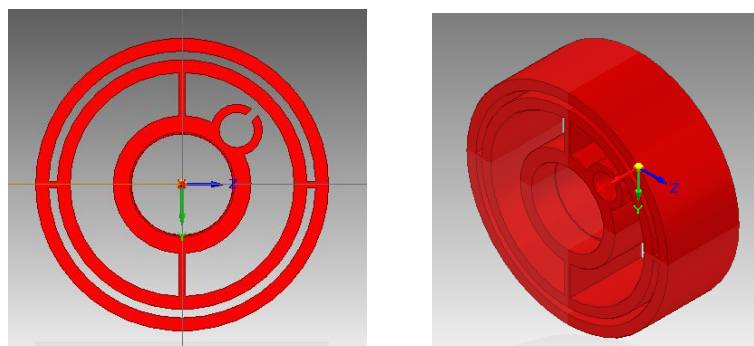


Figura 11. Prototipo (4.6) Solo laminas aluminio (6)



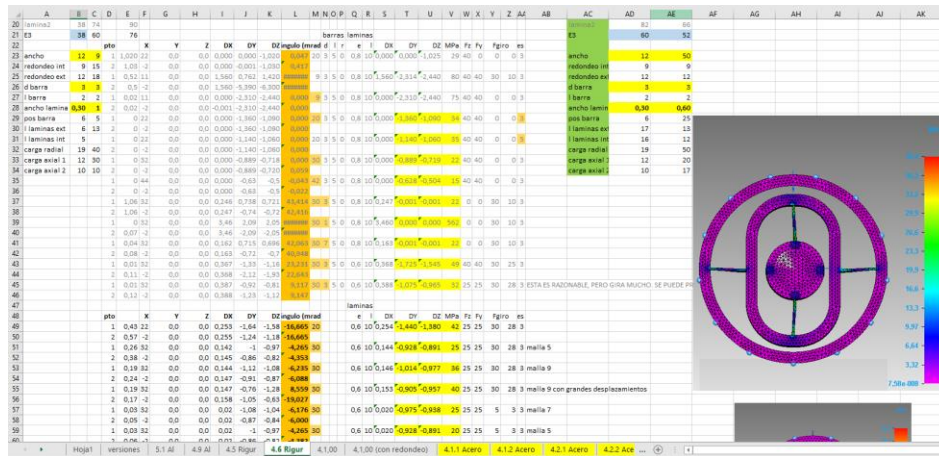


Figura 14. Excel “Cardan”.

A modo de resumen y para conocer en qué consistía el Trabajo de Fin de Grado que precede y en el que se asientan este trabajo, se ve oportuno destacar algunas de sus conclusiones.

Se desarrolló un sistema flexible para la alineación y posicionamiento de un láser de medida de alta precisión para la verificación volumétrica de máquina herramienta. Cuya principal innovación fue que se trataba de un sistema monolítico miniaturizado que permitía reducir rozamiento e histéresis y ajustar los cuatro grados de libertad requeridos para que el láser midiera de forma adecuada en las condiciones de trabajo de un brazo telescópico.

Se diseñaron y simularon diferentes soluciones de sistemas flexibles basados en ejes y/o láminas, buscando regular todos los grados de libertad mediante una única pieza flexible y que los procesos de fabricación y montaje fueran lo más sencillos posible, resultando en su conjunto un sistema de bajo coste.

Se estudio el efecto de la geometría en la rigidez y en el rango de giro y desplazamiento con simulaciones de elementos finitos, para seleccionar justificadamente la opción óptima.

El diseño se planteó para que el láser estuviese inicialmente desplazado y también preorientado, para que la regulación se pudiera hacer con un solo tornillo por grado de libertad y se consiguiera una pre-carga que estabilizara el sistema.

Por último, se fabricó un prototipo final en aluminio mediante mecanizado (torneado, fresado y electroerosión por hilo).

### 3.1. ESTUDIO PREVIO MOTORES SELECCIONADOS

Antes de comenzar con el contenido del trabajo y tras ya haber comentado el TFG en el que se basa este proyecto, también se ve necesario hacer un pequeño estudio previo sobre el tipo de motor que vamos a utilizar para la parte experimental y que se va a implementar en el prototipo final.

Los motores seleccionados son micromotores de vibración excéntricos, electro-magnéticos, de corriente continua sin núcleo.

Los micro motores de vibración son pequeños, livianos y fáciles de usar. Requieren un bajo consumo de energía. Estas cualidades hacen que puedan usarse en sitios compactos sin conexión a la corriente eléctrica. Pueden funcionar con baterías o pilas.

También hay que comentar que además de electro-magnético, el motor es excéntrico, lo que implica que es un elemento mecánico circular que gira en torno a un eje que no pasa por su centro geométrico.

Como se puede apreciar en la Figura 26, vemos que el eje del motor no tiene acoplado un cilindro perfecto, sino que más o menos, se aproxima más a un cilindro partido por la mitad, lo que provoca que el centro de masas de esa geometría esté desplazado y no coincida con el del eje del motor, y este al girar por causa de ese desfase entre el eje del motor y el centro de masa, vibre.

Más concretamente, el motor que ya ha sido seleccionado y que vamos a utilizar tiene como especificaciones:

- ✓ Marca: Yanmis.
- ✓ Caballos de potencia: 0,6 vatios
- ✓ Velocidad nominal: 44000 rpm = 733,3 Hz
- ✓ Voltaje: 3 voltios
- ✓ Dimensiones del motor seleccionado: 11,2 mm / 0,44 pulgadas x 3,2 mm / 0,13 pulgadas.
- ✓ [Fácil de usar] - Estructura simple, tamaño pequeño, fácil de instalar.
- ✓ [Buen rendimiento] - Vibración fuerte, bajo nivel de ruido, bajo consumo de energía.
- ✓ [Estable]: alta confiabilidad, rendimiento estable, respuesta rápida.
- ✓ [Reacción rápida]: pequeña inercia, arranque sensible.

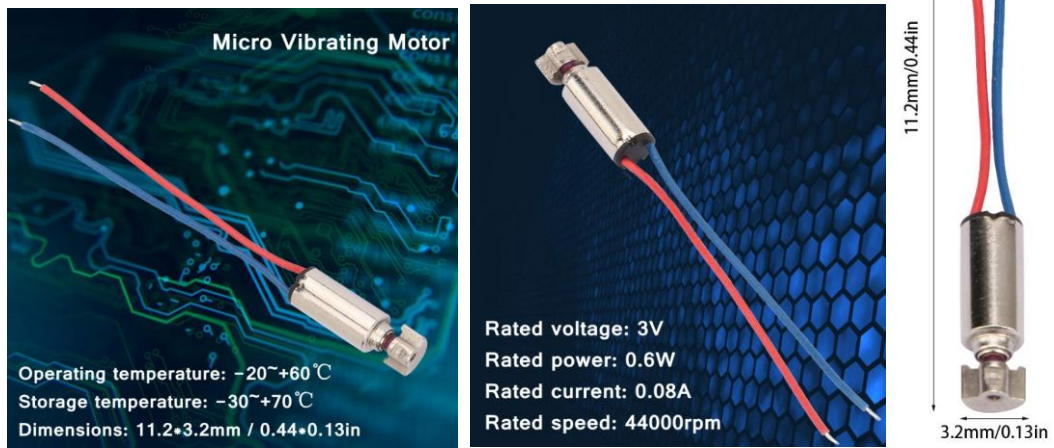


Figura 15. Motor seleccionado.

Fuente: [https://www.amazon.es/Vibraci%C3%B3n-El%C3%A9ctrico-Peque%C3%B1o-Potente-Consumo/dp/B07YWTBYCL/ref=pd\\_sbs\\_10/258-8643908-4822600?pd\\_rd\\_w=aSyaz&pf\\_rd\\_p=bead054f-de1a-4d92-98b9-04253f60cdcd&pf\\_rd\\_r=GWPZJF7J4HPCJDN2DZY4&pd\\_rd\\_r=7968a568-2e1d-41a8-ad8f-6102b71e57c9&pd\\_rd\\_wg=M8R4g&pd\\_rd\\_i=B07YWTBYCL&psc=1](https://www.amazon.es/Vibraci%C3%B3n-El%C3%A9ctrico-Peque%C3%B1o-Potente-Consumo/dp/B07YWTBYCL/ref=pd_sbs_10/258-8643908-4822600?pd_rd_w=aSyaz&pf_rd_p=bead054f-de1a-4d92-98b9-04253f60cdcd&pf_rd_r=GWPZJF7J4HPCJDN2DZY4&pd_rd_r=7968a568-2e1d-41a8-ad8f-6102b71e57c9&pd_rd_wg=M8R4g&pd_rd_i=B07YWTBYCL&psc=1)

## 4. DISEÑO BASADO EN LÁMINAS

En resumen, y recordando los objetivos del prototipo, se ha de obtener una rotación, como mínimo, de  $\pm 1$  mrad alrededor del eje Z y del eje Y. Cabe destacar que si hay rotación en el eje X esta no afecta en nada ya que es el eje del láser de medida.

Además, por otro lado, también se desea, como mínimo, una traslación de  $\pm 1$  mm en el eje Z y en el eje Y lo ideal es que se pueda ampliar a  $\pm 2$  mm. También cabe destacar que en el eje X no es necesario que haya traslación. Si se da ese caso, no habría problema, debido a que la distancia que mide el láser es relativa. Concretamente, se usa un patrón de referencia que sirve para ajustar el equipo en un punto medio de su campo de medida después de inicializar el sistema.

También sería un punto a favor, para el ahorro de material que la anchura del prototipo, no fuera de los 30mm que limitan el espacio, y para eso se busca que la extrusión del prototipo sea igual a la longitud del motor, ósea de 12 mm.

Esto es lo que se va a abordar en este capítulo mediante la introducción de elementos flexibles nuevos basados en láminas.

Antes de realizar el estudio previo del prototipo basado en laminas, se realizó un pequeño rediseño, para calcular cual era el radio óptimo para la fijación/enganche del motor, este que se encontrará en la parte superior derecha adyacente al laser, al vibrar por ser excéntrico, le transmitirá esas vibraciones al laser.

Se diseñó un prototipo en Solid Edge (Figura 16), con el objetivo de probar con 3 radios distintos para el alojamiento del motor.

Según las indicaciones técnicas del proveedor del motor, este mide 3,2 mm de diámetro. Por lo que se probaron radios un poco inferiores para que fuera justo, sin holgura, para que al vibrar todas las vibraciones se transmitirán bien.

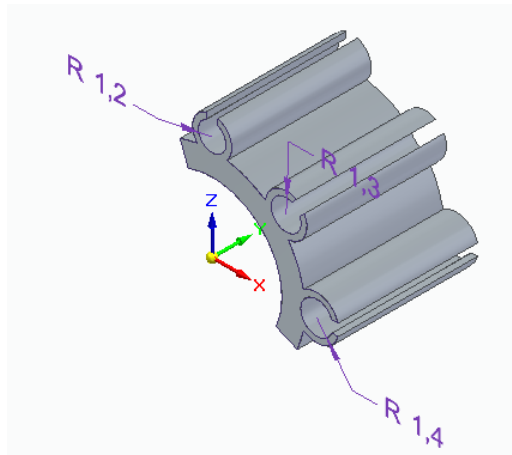


Figura 16. Prototipo para prueba del radio del enganche del motor.

Tras imprimirlo y probar a introducir el motor se vio que todos estos radios eran inferiores al óptimo, por lo que al final se optó, por un radio de 2,05mm; debido al proceso de fabricación con fabricación aditiva FDM.

## 4.1. ESTUDIO PREVIO CON PROTOTIPO DE LÁMINAS Y 1 GRADO DE LIBERTAD.

Tras el re-diseño para el alojamiento del motor se continuó, con la simulación del prototipo “Vibración 2 motores”, a este prototipo de un solo grado de libertad se le realizó un estudio modal variando las dimensiones de las láminas y viendo que frecuencias de vibración se obtienen, para ver cómo varía la frecuencia de vibración en función de las dimensiones de las láminas.

En este capítulo se realiza un análisis preliminar de los diseños basados en láminas. **Este primer prototipo está compuesto por tan solo dos láminas en el eje Z**, que permiten tener una rotación con un solo grado de libertad de giro en azimut.

Esta pieza no es la versión final para ser fabricada, sino la utilizada en las simulaciones.

Los prototipos se van a presentar siguiendo el mismo esquema: objetivo, geometría, simulación y resultados.

### 4.1.1. Objetivo

Se ha realizado un estudio inicial de un prototipo con un solo grado de libertad para hacer una introducción y validación de la herramienta de diseño y simulación utilizada en este TFG: **Solid Edge versión 2020**.

En este primer prototipo también se busca simplificarlo al máximo, ya que su objetivo es simularlo para calcular sus frecuencias de vibración y ver su dependencia al variar las dimensiones de las láminas.

Se pretende con este prototipo hacer un análisis preliminar de la introducción de las láminas.

El objetivo de este estudio previo es simular y analizar los efectos que tiene la variación de las dimensiones de las láminas en las frecuencias y modos de vibración.

Para este prototipo en concreto, nos interesaba el giro azimutal, ya que solo tenemos laminas en el eje Z.

Las dimensiones a variar son el ancho, la longitud y la profundidad de la lámina.

Para ello, empotramos/fijamos el exterior del cilindro del prototipo con el objetivo de simular la sujeción de la pieza y la zona del motor y el láser se encuentran maciza para simular que el motor y el láser ya están encajados en sus posiciones finales.

Estas dos características también se repiten en todos los prototipos de aquí en adelante.

Respecto a las frecuencias de vibración deseadas, nuestro objetivo es llegar a 44.000 rpm = 733 Hz, esta frecuencia coincide con la frecuencia máxima del motor seleccionado.

Por otro lado, en este TFG se trabajará con diferentes materiales. Este primer prototipo con láminas se ha simulado en PLA y ALUMINIO 7075.

Otro aspecto analizado en este caso preliminar ha sido el cambio de material, se han realizado las mismas simulaciones en estos dos materiales para ver cuáles son sus diferencias respecto a los modos de vibración.

En la siguiente tabla se muestran las propiedades mecánicas más importantes relacionadas con las simulaciones por elementos finitos y se observa que el aluminio 7075 presenta la mejor relación  $\sigma_y/E$ , lo que implica que es la opción que presentará más flexibilidad en relación con la tensión elástica que es capaz de soportar.

Tabla 1. Parámetros de los materiales utilizados en los prototipos

Material	Módulo elástico MPa	Límite elasticidad MPa	Poisson	$\sigma_y/E$
Al 7075	71.705	503	0,33	0,007
Al 6061	68.948	276	0,33	0,004
Acero inoxidable	193.053	310	0,29	0,002
Rigur	1.900	40	0,35	0,021
PLA	2.770	60	0,3	0,022

#### 4.1.2. Geometría

El diseño realizado en este caso preliminar es un prototipo simple de un solo grado de libertad.

El prototipo “Vibración 2 motores (1)” está basado en laminas y es de un solo grado de libertad, se ha utilizado para realizar el estudio previo, aunque la posición del motor no es la definitiva, nos sirve para el estudio previo, ya que, en este, solo nos interesaba saber cuál era la relación entre las dimensiones de las láminas y la frecuencia de vibración en Azimut.

En la Figura 17, se muestra el caso de Espesor = 1 mm, Longitud = 5 mm y Anchura = 15 mm, pero se ha realizado un diseño paramétrico para que estas tres dimensiones se puedan variar fácilmente mediante un vínculo a una hoja Excel (ver Figura ). De esta forma, se puede cambiar el diseño de la pieza y realizar simulaciones más rápidamente. Esto se realizará en todos los diseños posteriores, aunque no se especifique caso a caso.

Las dimensiones fundamentales de este diseño son el espesor, la longitud y la anchura de las láminas. Estas variables son las que se tienen en cuenta con el objetivo de realizar las simulaciones.

El diseño de este caso preliminar consiste en un cilindro en la parte central (que representa al laser) que se une a través de un par de láminas situadas en el eje Z. Por tanto, estas láminas permiten un grado de libertad de rotación alrededor del eje Z.

Además, en este prototipo encontramos una corona circular de espesor 2 mm, que está conectada con la parte central a través de las láminas y un cilindro, pegado al cilindro central (que representa el motor).

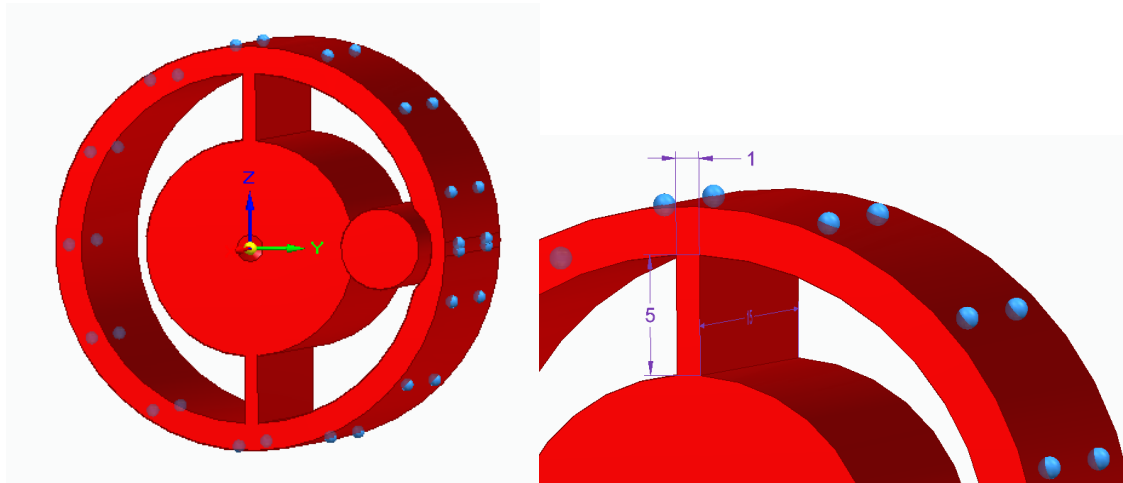


Figura 17. Geometría del prototipo Vibración 2 motores (1).

Vibracion 2 motores (1).par:Tabla de variables

Tipo	Nombre	Valor	Unidades	Regla	Fórmula
D..	Radio_interior_laser	8,00	mm		
D..	Radio_motor	2,05	mm		
D..	Radio_exterior_enganche_motor	3,00	mm		
D..	Radio_exterior	13,00	mm	Fórmula	= Radio_interior_laser + Longitud_Lamina
D..	Espesor_Lamina	1,00	mm	Pegar vín...	@'F:\TFG\2º Reunion\Datos TFG PLA.xlxs\!15 mm\F2C4'
D..	Espesor_lamina_2	1,00	mm	Fórmula	= Espesor_Lamina
D..	Longitud_Lamina	5,00	mm	Pegar vín...	@'F:\TFG\2º Reunion\Datos TFG PLA.xlxs\!15 mm\F11C2'
D..	Radio_exterior_2	15,00	mm	Fórmula	= Radio_exterior + 2
D..	Anchura_Lamina	15,00	mm	Pegar vín...	@'F:\TFG\2º Reunion\Datos TFG PLA.xlxs\!15 mm\F2C3'
D..	V3017	0,00	mm		
D..	Altura_como_1	1,00	mm		
D..	Altura_como_2	1,00	mm		
Va.	PropiedadesFísicas_Densidad	1024,000	kg/m^3	Límite	
Va.	PropiedadesFísicas_Precisión	0,990		Límite	

Figura 18. Vinculación y parametrización de variables en diseño paramétrico.

### 4.1.3. Simulación, Resultados, y Conclusiones

El resultado de una de las simulaciones se muestra en la Figura 19, en donde se puede ver representado el modo 1 de vibración, el programa ordena los modos de menor a mayor según su frecuencia.

En el anexo 1 se presenta un informe de simulación que nos ofrece el programa, además de un comentario de cada uno de los modos de vibración y el giro que representan.

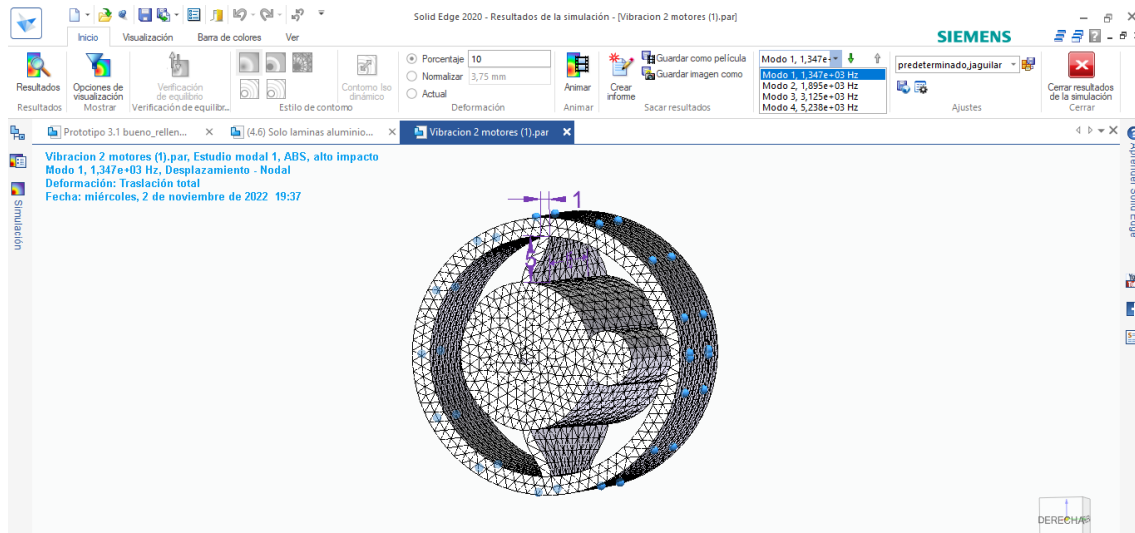


Figura 19. Resultado de una simulación en Solid Edge

Se han realizado varias simulaciones para estudiar la dependencia de los parámetros característicos de las láminas con sus frecuencias de vibración. Para conocer mejor cómo se comportan las láminas, se ha estudiado la influencia de la longitud y espesor de la lámina, para una anchura de la lámina determinada.

En primer lugar, este prototipo ha sido simulado con el material PLA, y posteriormente se presentarán también los resultados en Aluminio, para así poder ver sus diferencias.

En el anexo 2, se puede observar los resultados recogidos de todas las simulaciones, tanto de PLA como del Aluminio que se comentara más tarde.

A continuación, se mostrarán una serie de gráficas en las que se recogen todos los datos, para así poder hacer una interpretación de estas y poder deducir como varían las frecuencias de vibración en función de las dimensiones del prototipo.

En la primera gráfica (Figura 20) se observa cómo, al aumentar la longitud de las láminas, el sistema disminuye su frecuencia de vibración. Pero si aumentamos el espesor, la frecuencia aumenta. Además, se aprecia que la relación frecuencia-longitud no es lineal, se aproxima más a una curva exponencial decreciente.

Estas características que acabamos de comentar se pueden apreciar igual para el resto de gráficas que representan las simulaciones para distintas anchuras de lámina.

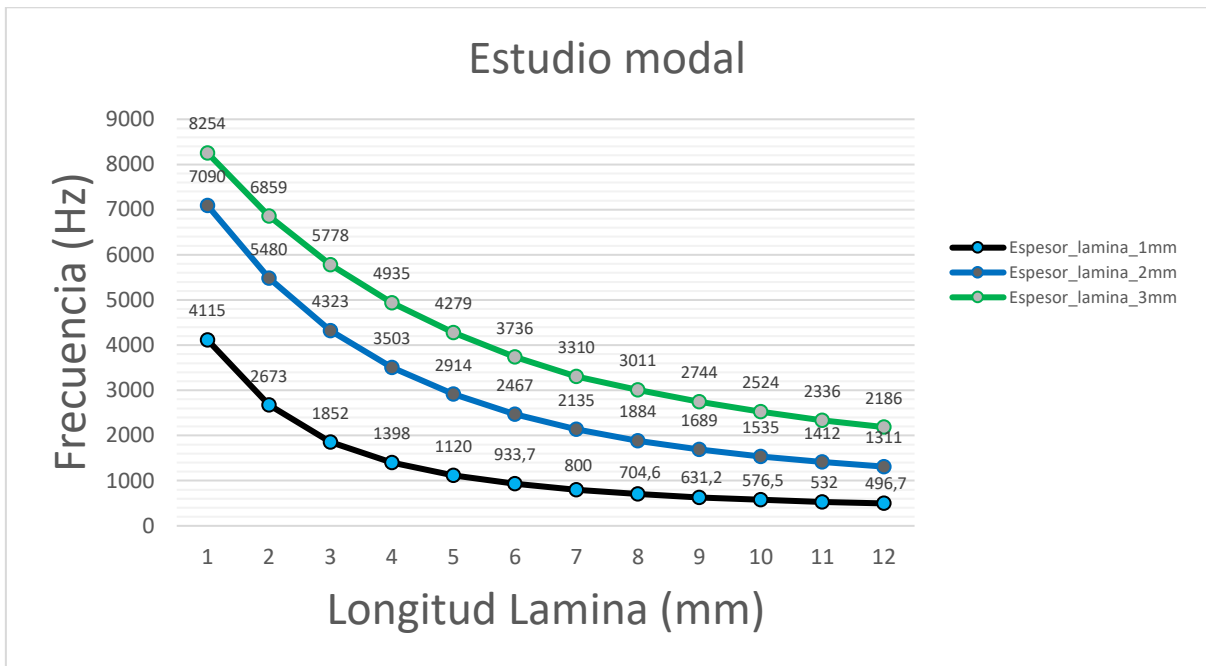


Figura 20. Variación de la frecuencia de vibración con la longitud y el espesor de la lámina, para una anchura de 10 mm.

También se ha realizado las mismas simulaciones, pero para una anchura de lámina de 15mm, como puede observarse (Figura 21), los resultados son de mayor frecuencia en todos los puntos, aunque se mantiene la forma de la dependencia exponencial decreciente.

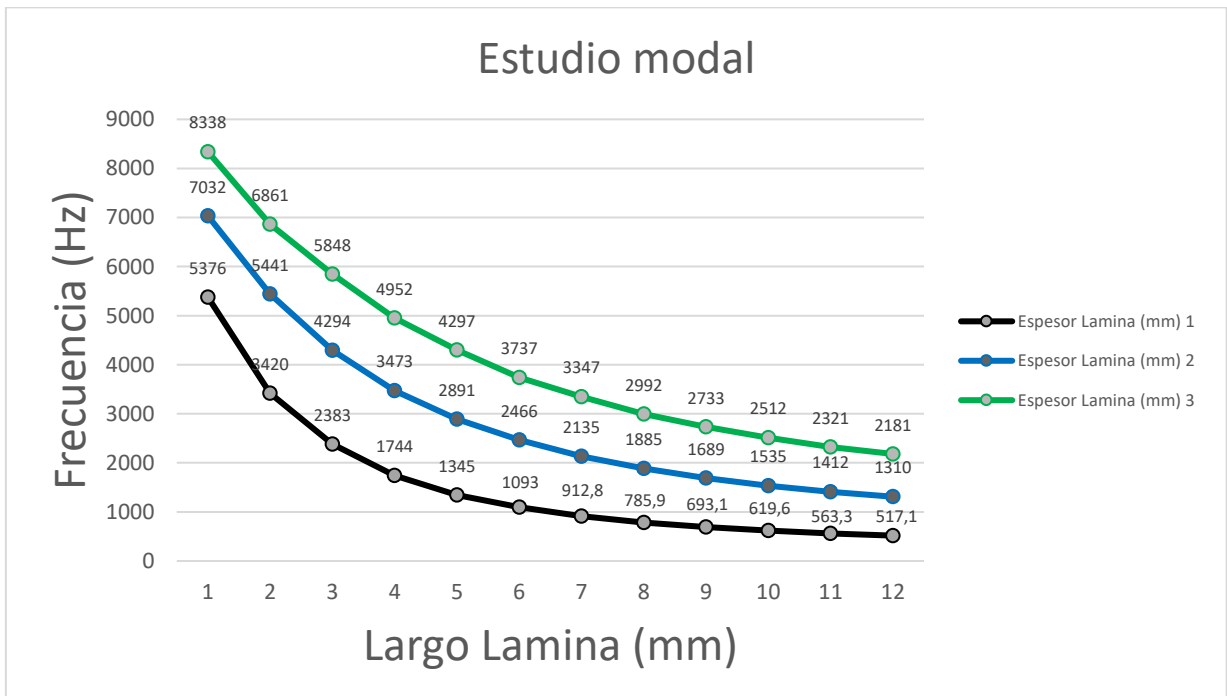


Figura 21. Variación de la frecuencia de vibración con la longitud y el espesor de la lámina, para una anchura de 15 mm.

A continuación, se presentan el resto de gráficas, para las siguientes anchuras: 20, 25 y 30 mm.

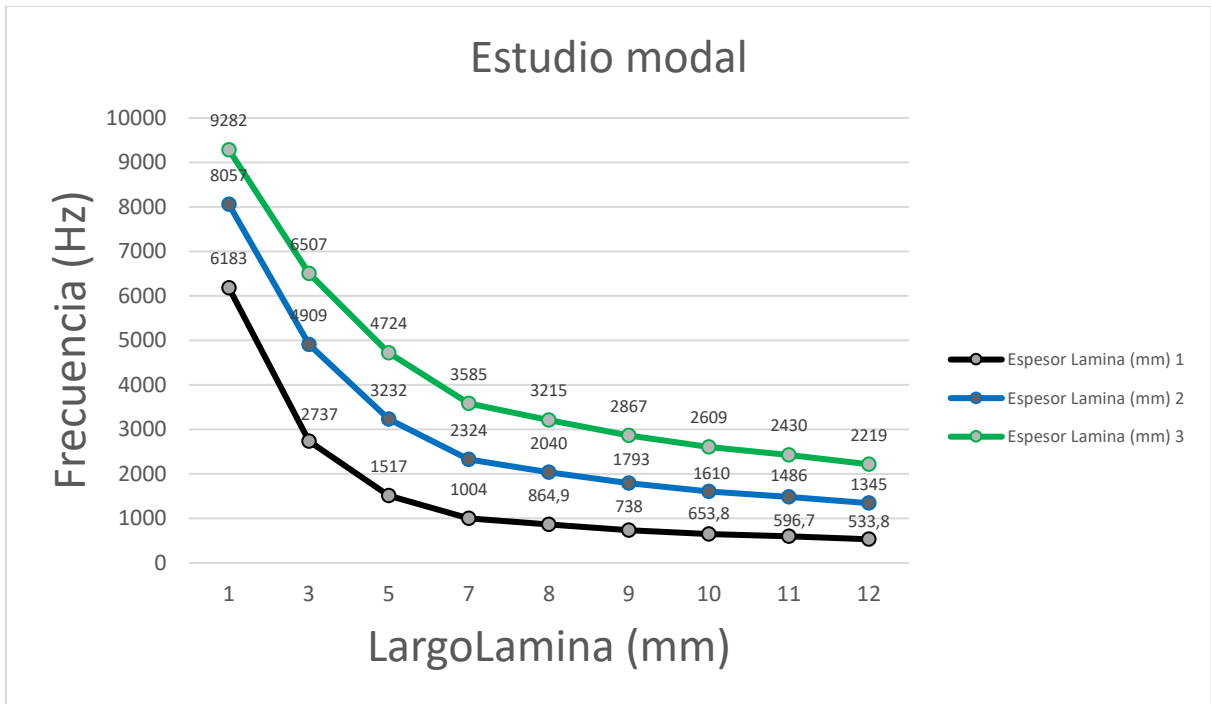


Figura 22. Variación de la frecuencia de vibración con la longitud y el espesor de la lámina, para una anchura de 20 mm.

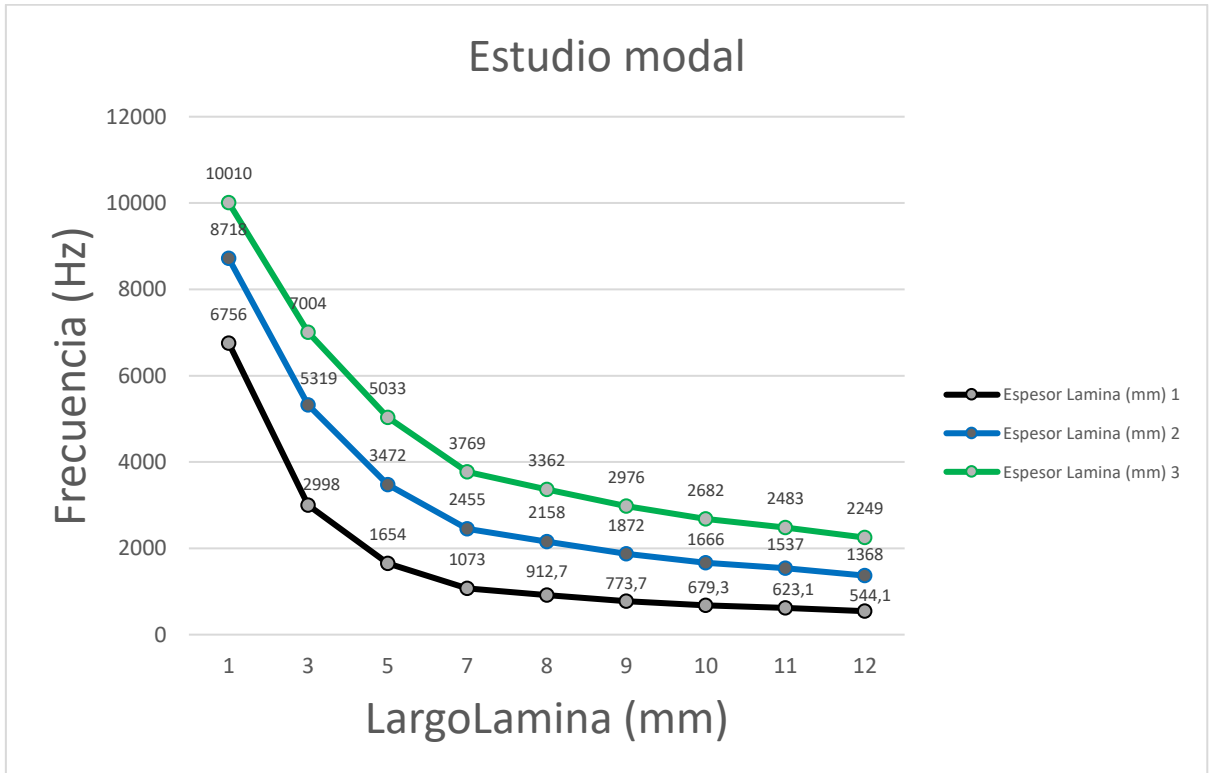


Figura 23. Variación de la frecuencia de vibración con la longitud y el espesor de la lámina, para una anchura de 25 mm.

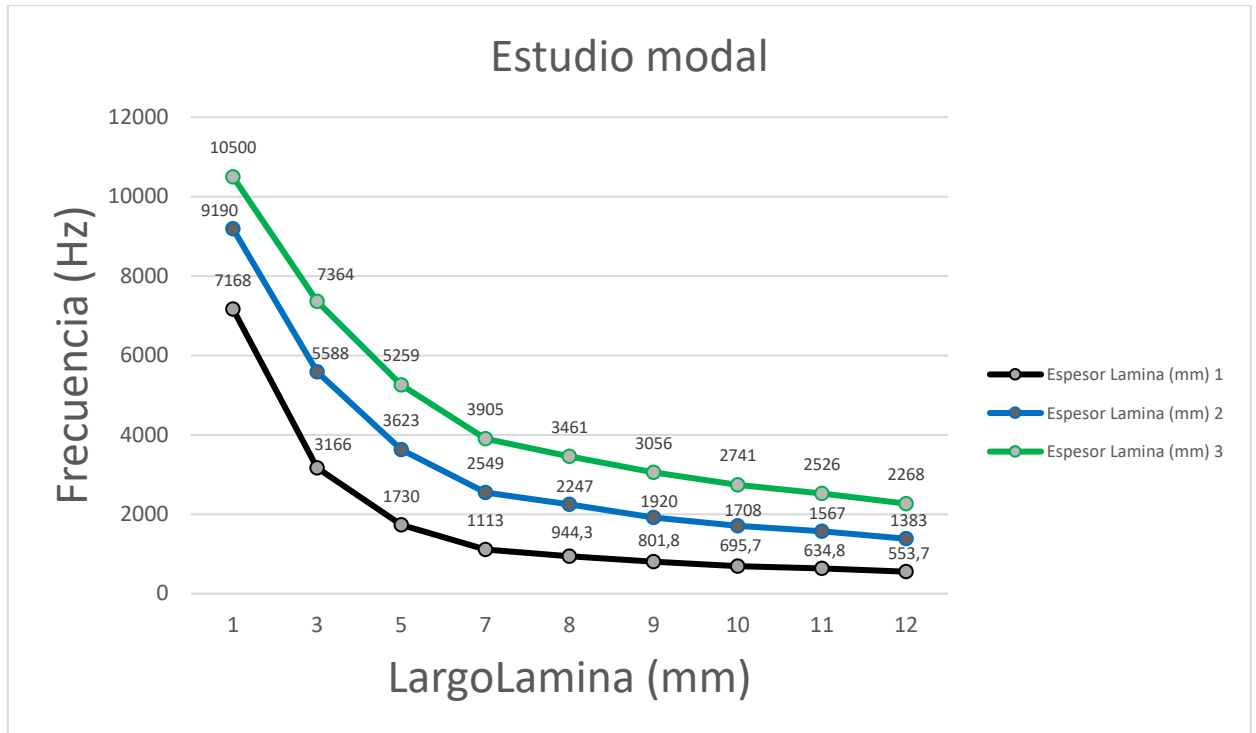


Figura 24. Variación de la frecuencia de vibración con la longitud y el espesor de la lámina, para una anchura de 30 mm.

Se concluye que en esta parte de este estudio previo para ver cómo se comporta el modelo con un solo grado de libertad, al variar las dimensiones de las láminas, hemos apreciado que:

Tras variar el espesor de las láminas, para 1, 2 y 3 mm. Podemos apreciar con las gráficas anteriores, que, a **mayor espesor** de lámina, **mayor frecuencia**.

Tras variar la longitud de las láminas, de 1 hasta 12 mm. Podemos apreciar con las gráficas de las paginas anteriores, que, a **mayor longitud** de lámina, **menor frecuencia**.

También, tras variar la distancia extruida total, es decir la anchura de la lámina para 10, 15, 20, 25 y 30 mm. Podemos apreciar con las gráficas anteriores, que, a **mayor anchura** de lámina, **mayor frecuencia**.

Vamos a ver este fenómeno más en concreto, vamos a estudiar el comportamiento del modelo de un solo grado de libertad, al variar la anchura de la lámina, la extrusión, pero sin modificar la extrusión del modelo entero, solo de la lámina.

Podemos apreciar que esta grafica siguiente (Figura 25) es distinta al resto, muestra la anchura que se ha recortado respecto de la anchura inicial de 12 mm y las frecuencias que se han obtenido para cada caso. Para este caso, los parámetros de longitud y espesor se fijaron en 12,86 mm y 1 mm respectivamente.

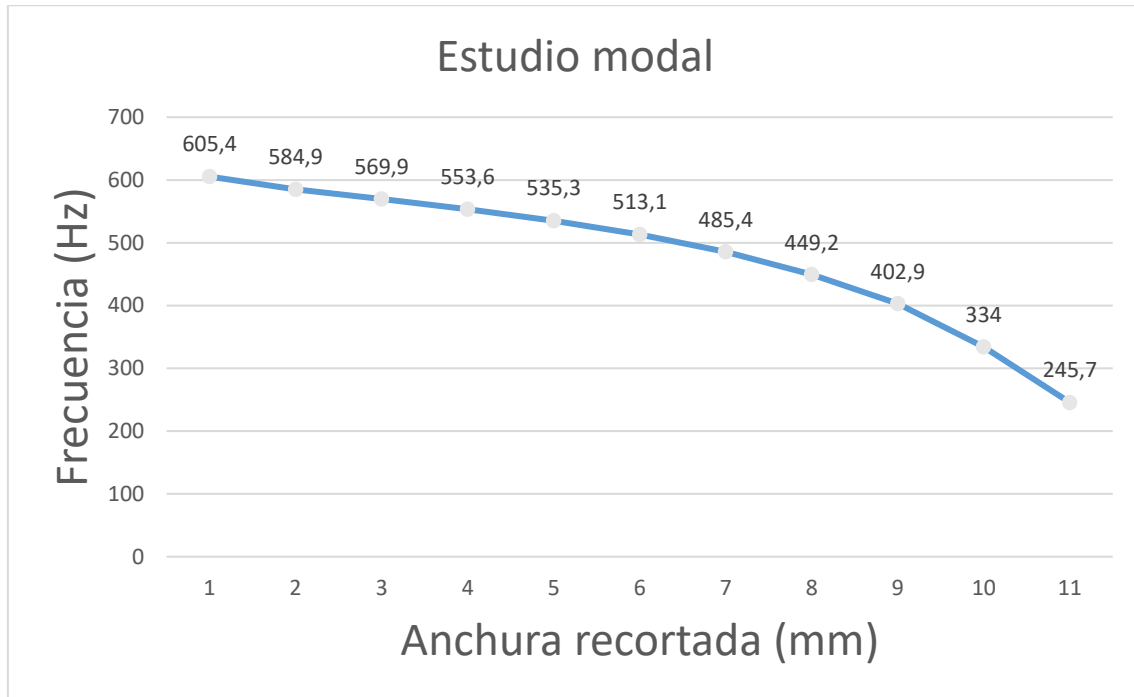
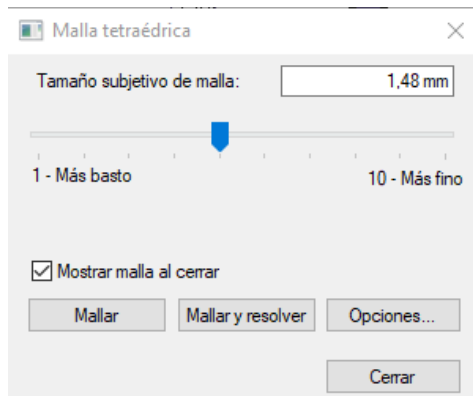


Figura 25. Variación de la frecuencia de vibración con la anchura de la lámina.

Con la gráfica podemos apreciar que, a mayor anchura de lámina recortada, menor frecuencia, por lo tanto, a **mayor anchura** de lámina, **mayor frecuencia**.

Respecto del tamaño del **mallado** utilizado para las simulaciones, el programa nos ofrece desde el mallado más sencillo (mallado 1), con un tamaño de malla promedio de 10,45 mm, hasta el mallado más denso (mallado 10), con un tamaño promedio de malla de 1,05 mm.



Tipo de mallado	Tetraédrico
Número total de cuerpos mallados	1
Número total de elementos	13.144
Número total de nodos	22.184
Tamaño subjetivo de malla (1-10)	7

Figura 26. Ventana e información del mallado.

El resultado mejora cuando el mallado es más denso. Como al aumentar la densidad del mallado el tiempo necesario para la simulación aumenta, en todas las simulaciones de este estudio previo y de las simulaciones de los siguientes puntos y prototipos se realizarán con un mallado intermedio (normalmente mallado 5 o 7) y posteriormente se realizará una simulación final con la opción definitiva con mallado 10 para tener más precisión en los resultados.

Otro aspecto analizado en este caso preliminar ha sido el **cambio de material**, de hacer todas las simulaciones anteriores en PLA, se pasó a realizar las mismas simulaciones, pero en Aluminio 7075.

Para el caso de las simulaciones con Aluminio 7075, se han obtenido los siguientes resultados:

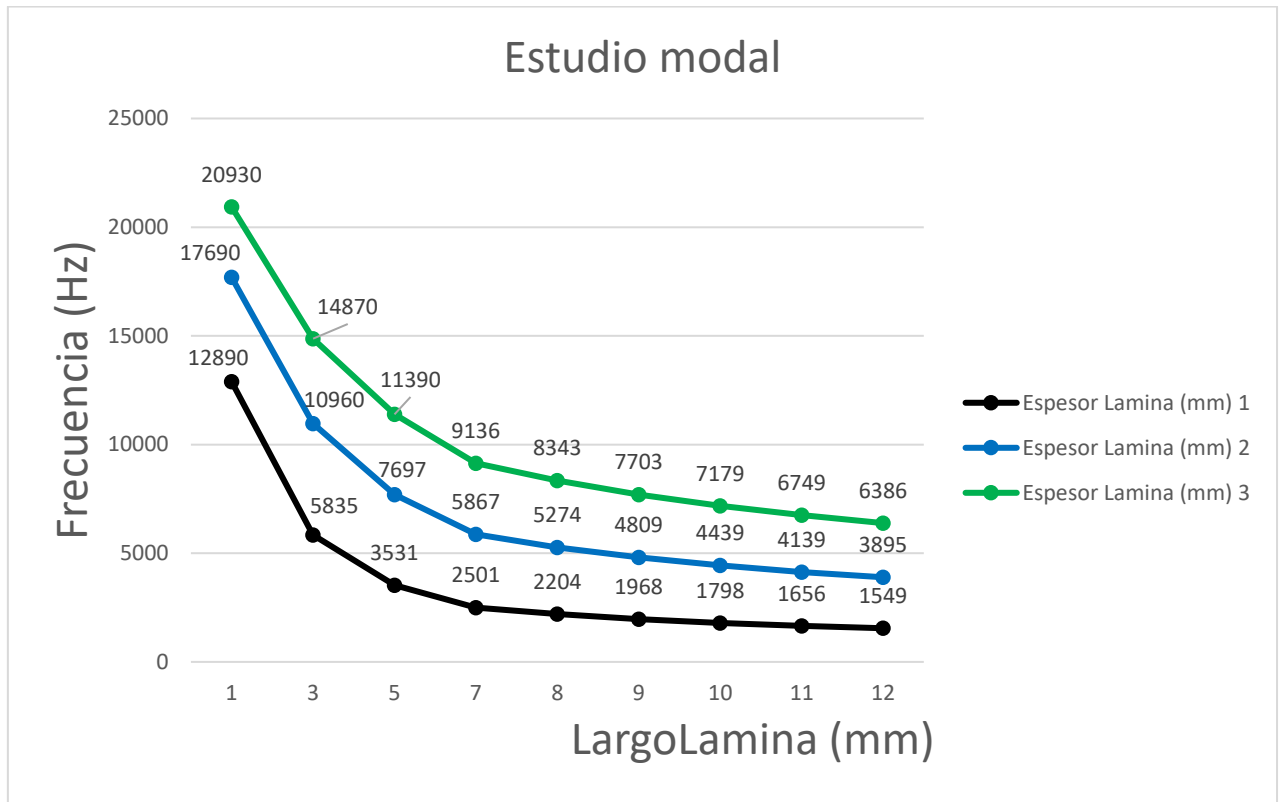


Figura 27. Variación de la frecuencia de vibración con la longitud y el espesor de la lámina, para una anchura de 10 mm.

La grafica que vemos arriba (Figura 27) representa los resultados de las simulaciones para una anchura de lámina y del prototipo de 10mm. Podemos apreciar que tiene la misma forma descendente-exponencial que se apreciaba en PLA, aspecto que se repite en las demás graficas al aumentar la anchura, como también pasaba en PLA, y se obtienen las mismas conclusiones al variar los espesores y las longitudes de las láminas.

Por lo cual, no se ve necesario adjuntar a continuación las demás graficas del resto de simulaciones que se han realizado, para las anchuras de 15, 20, 25 y 30 (aunque en el caso anterior del PLA sí que se han añadido, pero debido a que eran las primeras simulaciones y graficas en ser mostradas).

Todos los resultados y el resto de graficas del Aluminio están en el Anexo 2.

Tras realizarse las mismas simulaciones que para el caso del PLA, sí que se ve más oportuna hacer una comparación entre los resultados obtenidos en PLA y en Aluminio 7075.

Porque, aunque se comporten igual al variar las dimensiones de las láminas, las frecuencias no son las mismas y eso es debido a las distintas propiedades de cada material.

A continuación, se muestran 3 gráficas (Figura 28, 29 y 30), que corresponden a la comparación de datos entre el PLA y Aluminio 7075, cada una de ellas para un espesor de lámina distinto y variando la longitud igual que en las simulaciones anteriores, manteniendo fija la anchura de lámina que este caso es de 10mm.

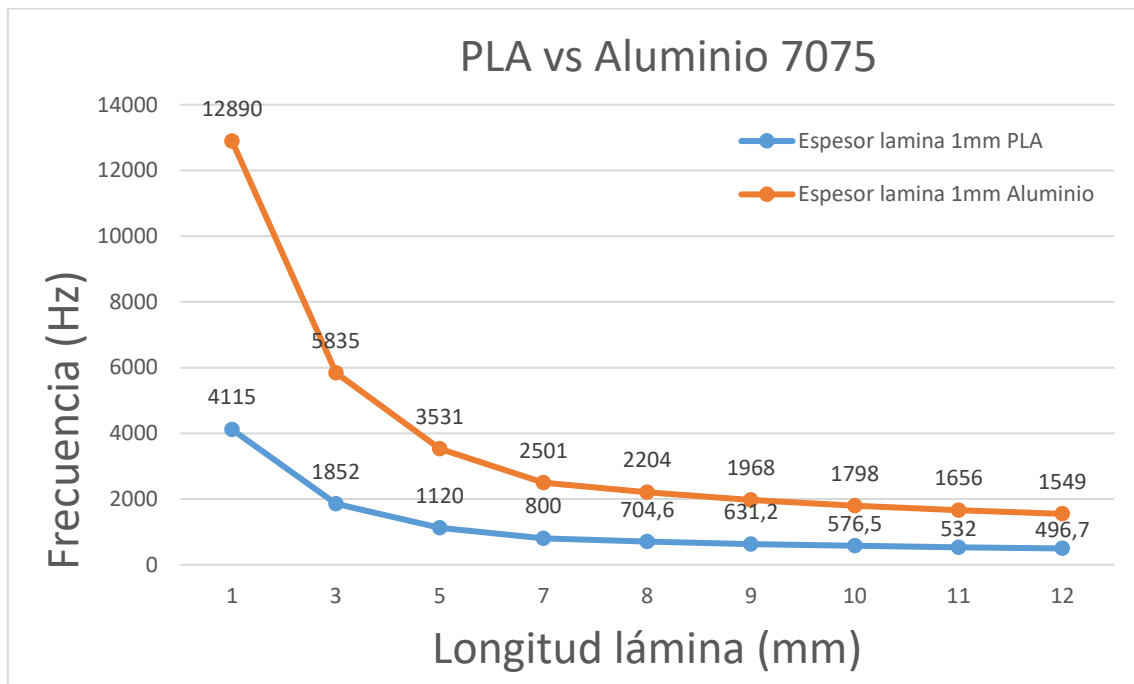


Figura 28. Comparación de la frecuencia de vibración entre el PLA y el Aluminio 7075, para espesor de lámina 1mm.

Solo se van a comentar las conclusiones de la Figura 39, ya que se pueden extrapolar a las siguientes dos gráficas, ya que el comportamiento es el mismo.

Se aprecia que las simulaciones en Aluminio han obtenido frecuencias bastante mayores que para las simulaciones en PLA, pero el comportamiento es el mismo ambos de una curva descendente exponencialmente con la longitud de la lámina.

Respecto a este compartimento puede ser debido a que la relación  $\sigma_y/E$  del Aluminio es menor que la del PLA. Esta relación  $\sigma_y/E$  representará la flexibilidad en relación con la tensión elástica que es capaz de soportar.

Por lo que la frecuencia de vibración sería inversamente proporcional a esta relación.

A menor relación  $\sigma_y/E$ , mayor frecuencia de vibración.

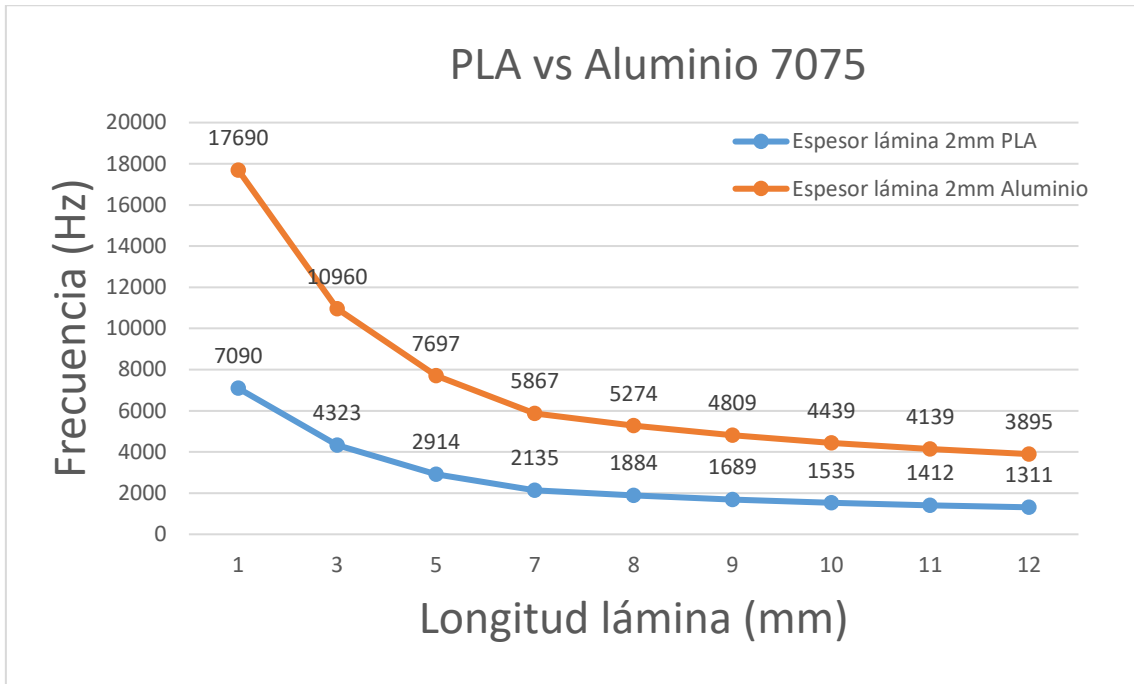


Figura 29. Comparación de la frecuencia de vibración entre el PLA y el Aluminio 7075, para espesor de lámina 2mm.

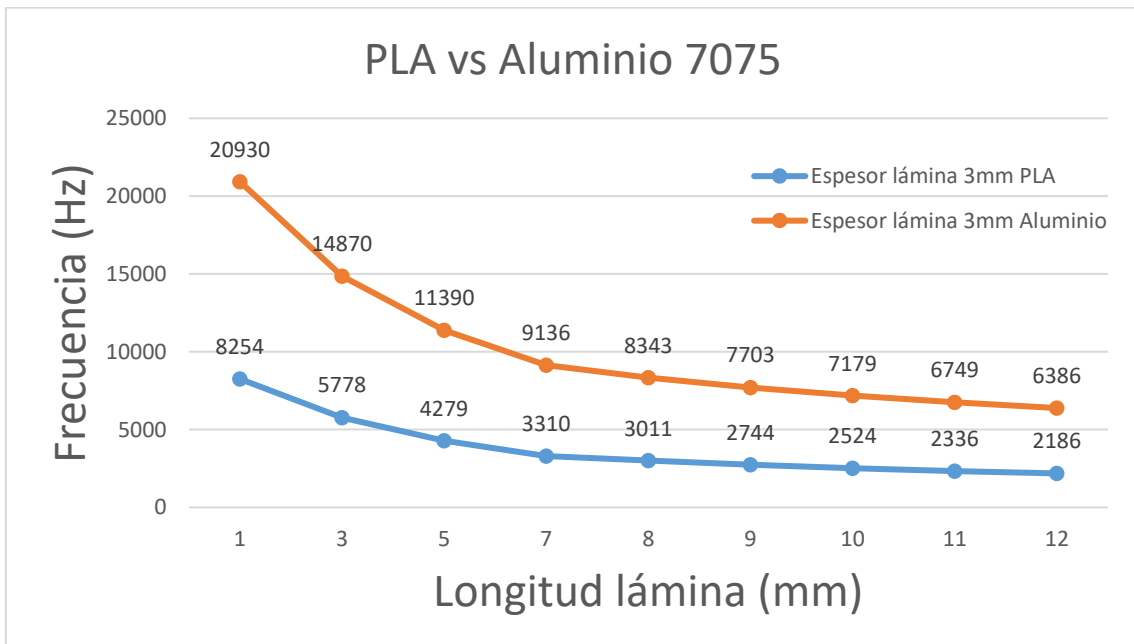


Figura 30. Comparación de la frecuencia de vibración entre el PLA y el Aluminio 7075, para espesor de lámina 3mm.

## 4.2. PROTOTIPO DE LAMINAS Y DOS GRADOS DE LIBERTAD

### 4.2.1. Objetivo

Una vez que se ha estudiado el diseño preliminar del estudio previo con un grado de libertad, se añade otro par de láminas para conseguir otro grado de libertad más.

Este prototipo, tal y como se profundizará en mayor medida más adelante, tiene el objetivo de añadir un grado de libertad más. Es decir, se añaden un par de láminas más con la misión de que no solo pueda rotar la parte central alrededor del eje Z (azimut), sino que también pueda rotar alrededor del eje Y (elevación).

**Buscamos dimensionar las 4 láminas del prototipo para poder conseguir frecuencias de vibración compensadas en azimut y elevación lo más próximas a la frecuencia máxima del motor 733,3 Hz.**

Al igual que en los anteriores apartados y en los que están por venir, se concreta la geometría del prototipo, se simula y se analizan los resultados de éste.

### 4.2.2. Geometría

El siguiente paso, después de realizar el estudio previo con un solo grado de libertad, fue diseñar un prototipo con 2 grados de libertad y realizarle también su respectivo análisis de los modos de vibración.

Para diseñar este nuevo prototipo (Figura 31, c)), nos inspiramos en los diseños del TFG predecesor (Figura 31, a) y b)), que ya había realizado un prototipo de láminas con 2 grados de libertad.

En el primer prototipo de la izquierda existen algunos espacios que no son útiles. Éstos se señalan en la imagen a continuación. Por ello, la parte intermedia pasa a tener esa forma ovalada, y así se puede reducir el tamaño del prototipo manteniendo una determinada longitud de las láminas respecto al prototipo anterior.

Nótese que las partes exterior, central e interior de estos prototipos son mucho más gruesas que las láminas, por lo que no se deforman.

En cuanto a la geometría de este prototipo, se puede observar una parte central, donde iría alojado el láser y el motor en el enganche diseñado para ello, conectada a una parte intermedia, con el mismo par de láminas en eje Z del anterior prototipo con un solo grado de libertad, y ésta, a su vez conectada a la parte exterior a través del segundo par de láminas en el eje Y, que nos permite tener el segundo grado de libertad de rotación en el eje Y y de traslación en el eje Z.

Espesor_lamina_exterior	1
L_lamina_exterior	7
Espesor_ovalo_intermedio	2
Espesor_lamina_interior	1
L_lamina_interior	8

Tabla 2. Dimensiones iniciales de las láminas.

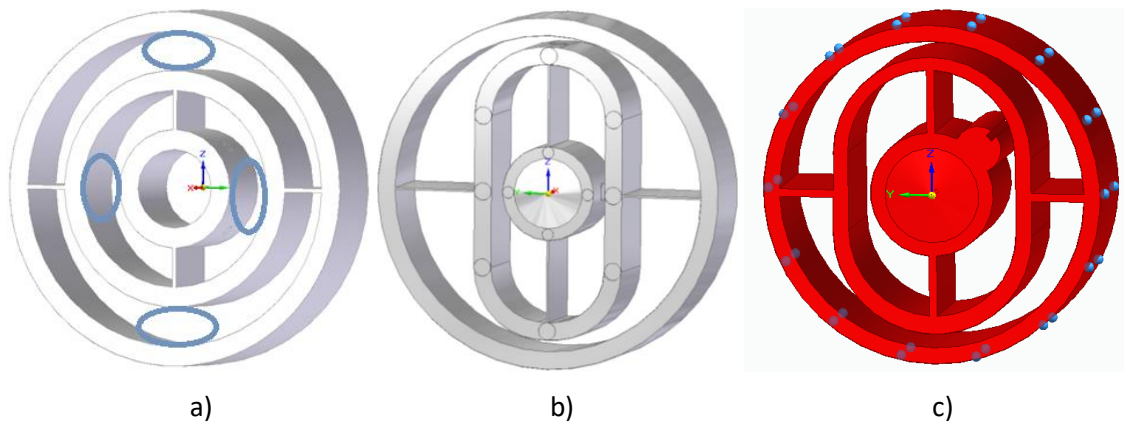


Figura 31. Geometría del nuevo prototipo de láminas y dos grados de libertad (c)), y su evolución.

a) Diseño del TFG anterior sin optimizar, b) Diseño optimizando espacios también del TFG anterior, c) Diseño realizado en base a los anteriores, con el motor añadido y listo para simular.

#### 4.2.3. Simulación, Resultados, y Conclusiones

Para comenzar con las simulaciones del prototipo con 2 grados de libertad cabe destacar que NO lo hemos simulado con Aluminio 7075, solo con PLA, ya que como hemos podido apreciar en el estudio previo con 1 grado de libertad, todas las frecuencias obtenidas para todas las simulaciones y todas las combinaciones de dimensiones de las láminas del prototipo; eran mayores de la frecuencia máxima del motor, 733 Hz.

A la hora de simular el prototipo para conseguir las frecuencias deseadas, vamos a empezar solo variando el espesor de las láminas, para una anchura de lámina fija, que va a ser la longitud del motor, 12mm. Aunque también se han simulado para otras anchuras (10, 15 y 20mm) para ver si también se podría conseguir la compensación deseada cercana a 733 Hz.

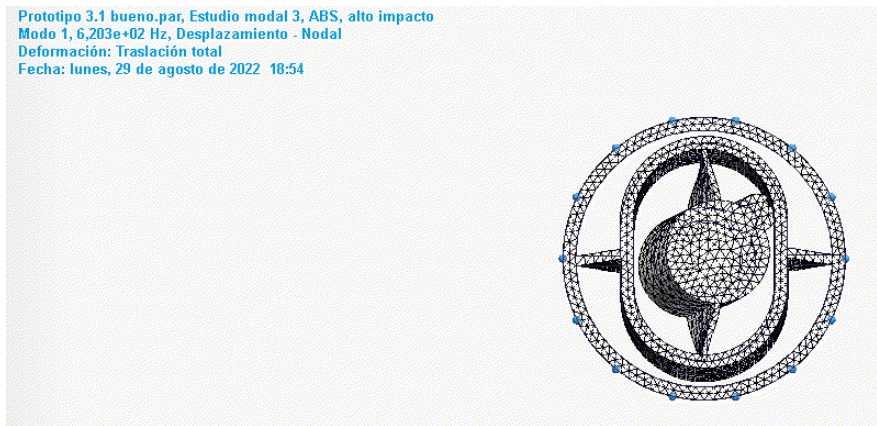
Al igual que se realizó en el estudio previo, se parametrizaron los espesores tanto de las láminas del eje Z (láminas interiores), como de las láminas del eje Y (láminas interiores), para que mediante un archivo de Excel en que se ha recogido todas las simulaciones que se encuentran en el Anexo 2, se pudiera variar los espesores de forma más rápida.

Se muestra en las siguientes figuras los resultados de las simulaciones del prototipo con 2 grados de libertad, también se adjunta una tabla con los espesores de las láminas y las frecuencias de cada prototipo representado. El primer número de cada tabla representa el número de simulación, luego siguen los espesores de las láminas de esa simulación en concreto, y después vienen las frecuencias, primero la de Azimut, luego Elevación y al final la diferencia entre ellas, ya que buscamos que esa diferencia sea la mínima posible, para conseguir esa compensación



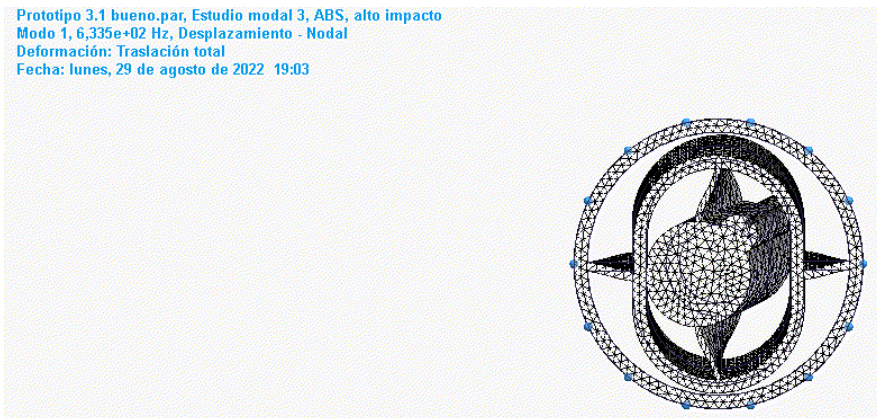
12	<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,63</b>	759,7	<b>731,3</b>	28,4
	<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,92</b>			

Figura 32. Simulación del prototipo para anchura de lámina 12mm, 731 Hz



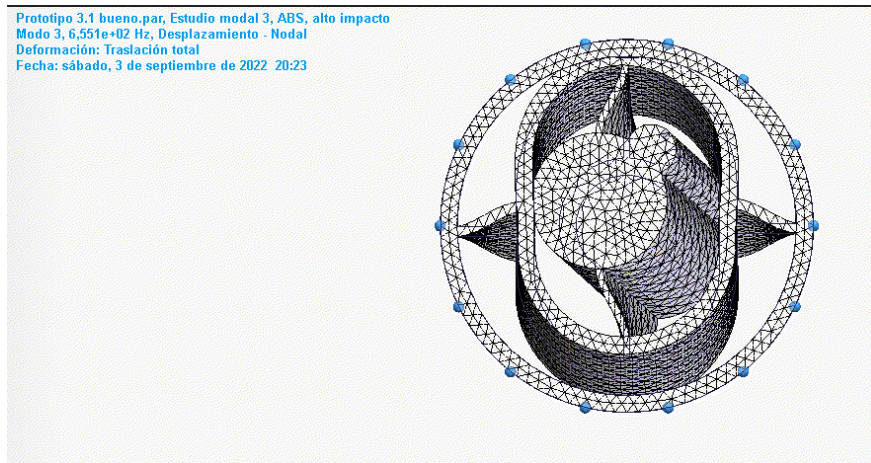
12	<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,52</b>	652,9	620,7	32,2
	<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,83</b>			

Figura 33. Simulación del prototipo para anchura de lámina 10mm, 620 Hz



22	<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,32</b>	658,6	633,5	25,1
	<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,8</b>			

Figura 34. Simulación del prototipo para anchura de lámina 15mm, 633 Hz



9	<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,18</b>	<b>634,9</b>	<b>655,1</b>	<b>20,2</b>
	<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,77</b>			

Figura 35. Simulación del prototipo para anchura de lámina 20mm, 655 Hz



8	<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>2,5</b>	<b>344,2</b>	<b>357,3</b>	<b>13,1</b>
	<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,22</b>			

Figura 36. Simulación del prototipo 2 para anchura de lámina 12mm, 357 Hz, habiendo reducido la anchura de sus laminas.

Como conclusión tras realizar las simulaciones, podemos apreciar que sí que es posible la compensación de las frecuencias de Azimut y Elevación.

Si nos fijamos en la Figura 32, hemos obtenido una frecuencia en Azimut de 759,7 Hz y en Elevación de 731,3 Hz; por lo que solo tiene una diferencia entre ellas de 28,4 Hz.

Aunque la frecuencia de Azimut supere la frecuencia máxima del motor, no nos importa ya que en este caso la frecuencia que nos interesaría sería la frecuencia de Elevación, ya que cuando las frecuencias en Azimut y Elevación están próximas como en este caso, los giros se combinan, y por tanto para la frecuencia de 731,3 Hz (Aproximadamente la frecuencia máxima del motor), tendríamos los 2 tipos de giros tanto en el eje Z como en el Y.

Y con esa combinación de giros, conseguimos que el láser no vaya recto y se refleje por las paredes del brazo telescópico, de esta manera cuando tengamos el problema de la flexión al tener una mayor cantidad de difracción del láser hay más posibilidades de que se refleje en el reflector y pueda realizar bien la medida.

#### 4.2.4. Fabricación y experimentación del prototipo con 2 grados de libertad

Tras haber conseguido la compensación de frecuencias, en Azimut y Elevación, cercanas a la frecuencia máxima del motor, se pasó a su fabricación mediante la fabricación aditiva FDM en el material PLA, para que fueran probados en el laboratorio.



Figura 37. Prototipos fabricados con fabricación aditiva FDM en PLA.

Como podemos observar en la imagen (Figura 37), fabricamos 2 prototipos, uno dimensionado para compensar la frecuencia máxima del motor y otro para la mitad de esa frecuencia, así, teniendo 2 prototipos, podemos contrastar los resultados obtenidos de ambos y ver si se asemejan a los resultados de las simulaciones.

El primer prototipo (Figura 32), que corresponde al de la izquierda en la Figura 48, está compensado a la frecuencia máxima del motor (733 Hz) como ya hemos comentado antes, este prototipo se obtuvo modificando únicamente los espesores de las láminas.

Y el segundo prototipo (Figura 36), que corresponde al de la derecha en la Figura 48, está compensado a la mitad de la frecuencia máxima (357 Hz exactamente), para este prototipo ya fue necesario de modificar la extrusión/anchura de las láminas, pero manteniendo la extrusión de 12mm para el resto del prototipo.

El proceso de impresión (del que hablaremos en puntos posteriores) impone unos requisitos, como por ejemplo que el espesor mínimo para las láminas del prototipo sea de al menos 0,8mm. Este espesor mínimo nos condiciona mucho a la hora de hacer simulaciones.

Tras probar los prototipos, como se muestra en las siguientes imágenes (Figura 38), al introducir el láser y el motor, viendo como vibraban en azimut y elevación, se ha visto que son más rígidos de lo deseado.

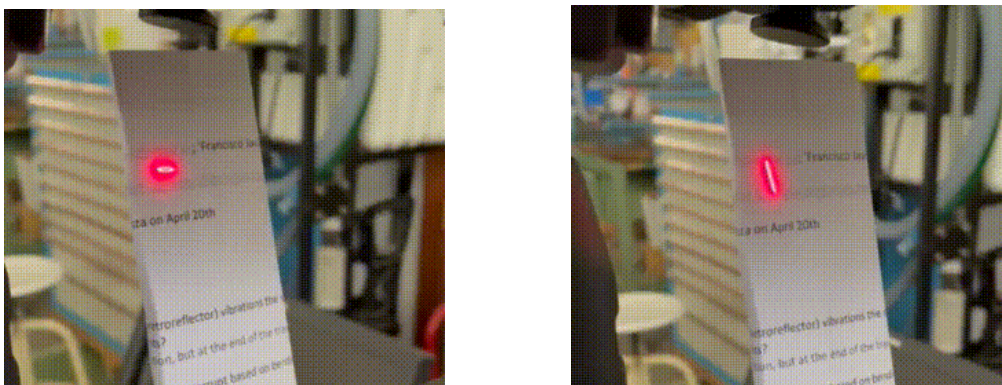


Figura 38. Amplitud del láser en el laboratorio.

### 4.3. MODIFICACIONES AL PROTOTIPO DE LAMINAS Y DOS GRADOS DE LIBERTAD PARA CONSEGUIR EL GIRO DESEADO.

Conforme se realiza un prototipo, van surgiendo nuevas ideas y requisitos para mejorar el siguiente.

Tras observar en el laboratorio que los prototipos son más rígidos de lo esperado.

El siguiente paso fue, re-diseñar el prototipo para conseguir el giro deseado y mantener la compensación de las frecuencias ya conseguidas.

Por lo que primero hay que saber cuál es el giro deseado. Para ello lo calculamos a partir de los datos recogidos del laboratorio, donde pudimos observar que el láser, a una distancia de 700mm, tenía una amplitud de giro de 3mm, porque relacionando ambos datos con la arco-tangente, obtenemos un giro de 4,28 mrad. (Figura 39)

En el laboratorio obtuvimos:				Angulo (mrad)	
Amplitud del giro (mm)	3	Distancia (mm)	700	4,285688047	Azimut
	1		1000	0,999999667	Elevación

Figura 39. Resultados de amplitud de giro en el laboratorio.

A partir de este giro deseado, calculamos que fuerza hay que aplicar al prototipo en el análisis estático de Solid Edge, gracias al prototipo del TFG anterior ((4.6) Solo laminas aluminio (5) 2mm (2)), al cual se le irán aplicando fuerzas hasta conseguir el giro deseado de 4,28 mrad.

Se ha elegido este prototipo ya que se desea que el prototipo final tenga la misma rigidez que este.

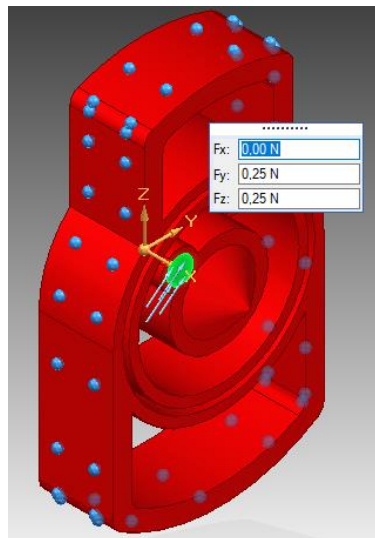


Figura 40. Fuerzas aplicadas al prototipo.

Para ello realizaremos un estudio estático, para calcular los desplazamientos al aplicarle una fuerza (Figura 40) que simulara la acción del motor excéntrico, y con una serie de fórmulas y esos desplazamientos calcularemos el giro de nuestro prototipo.

Para calcular el giro del prototipo, se necesitan los desplazamientos que sufre el centro del láser, para ello, se le realiza una pequeña modificación al prototipo, en el que se le añaden dos conos al cilindro macizo que representa el láser en el centro de todo el prototipo (Figura 41), así se podrá seleccionar el desplazamiento de la punta del cono. Los vértices de estos conos serán usados para calcular el giro. La pieza final a fabricar no tendrá estos conos.

Estos conos también se han añadido a todos los siguientes prototipos, por lo que ya no se comentara esta modificación para cada uno.

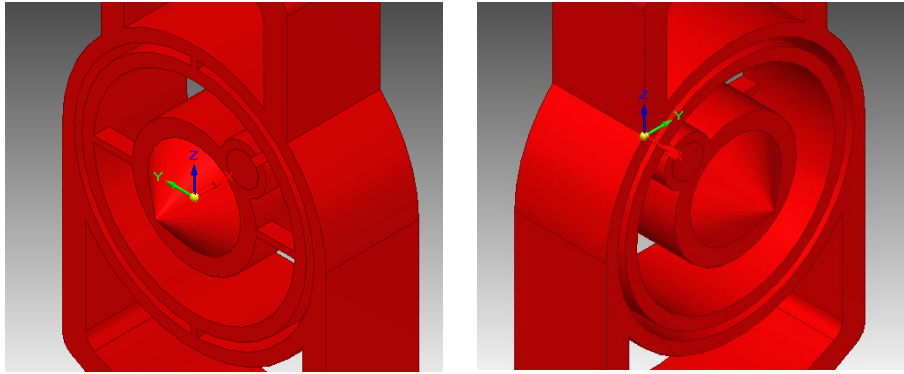


Figura 41. Geometría del prototipo con los conos.

A la hora de la simulación, se han de tener en cuenta dos condiciones de contorno (Figura 42).

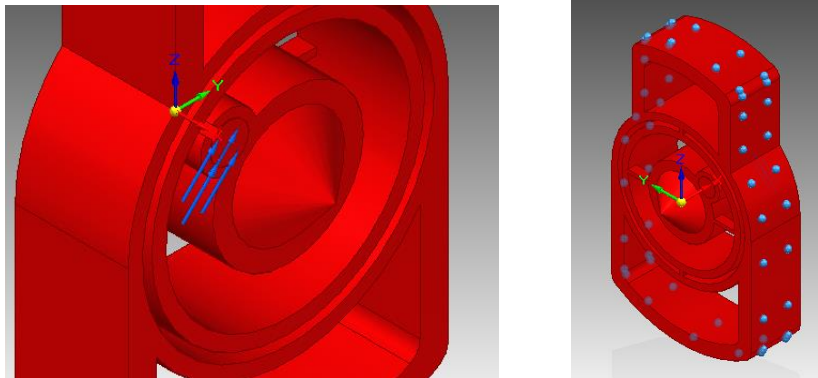


Figura 42. Fuerzas y empotramiento de prototipo

Una vez se han tenido en cuenta estos dos aspectos, se puede proceder a la simulación. El resultado del giro se calcula a partir de los datos de la posición y desplazamiento de los vértices de los conos nombrados anteriormente.

A la hora de la simulación estática, será fundamental tener seleccionado la opción de grandes desplazamientos.

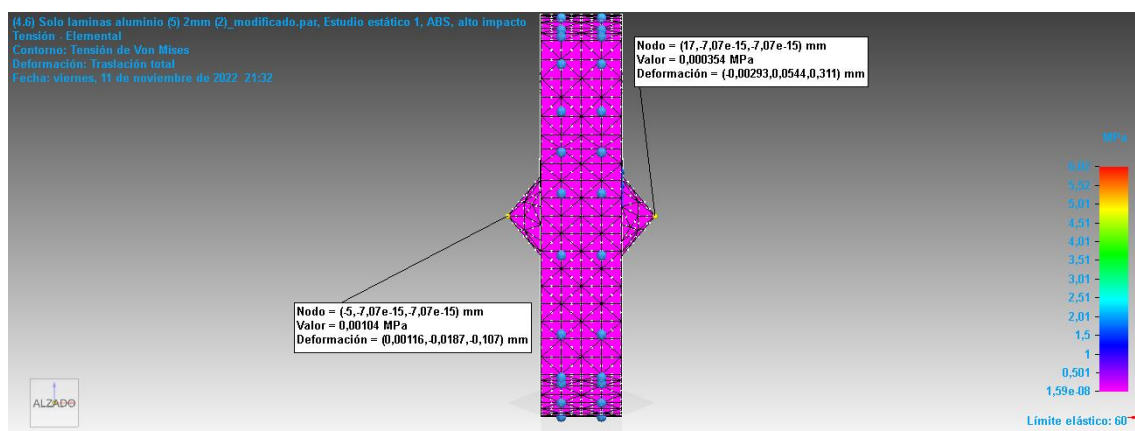


Figura 43. Puntos para el cálculo del giro de prototipo

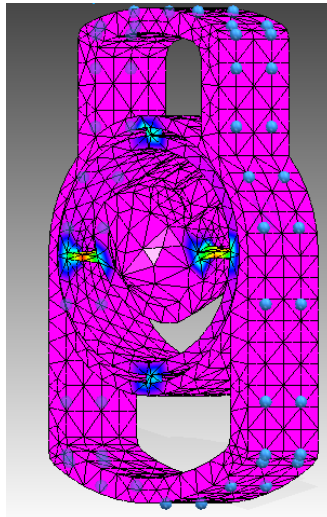


Figura 44. Desplazamientos del prototipo

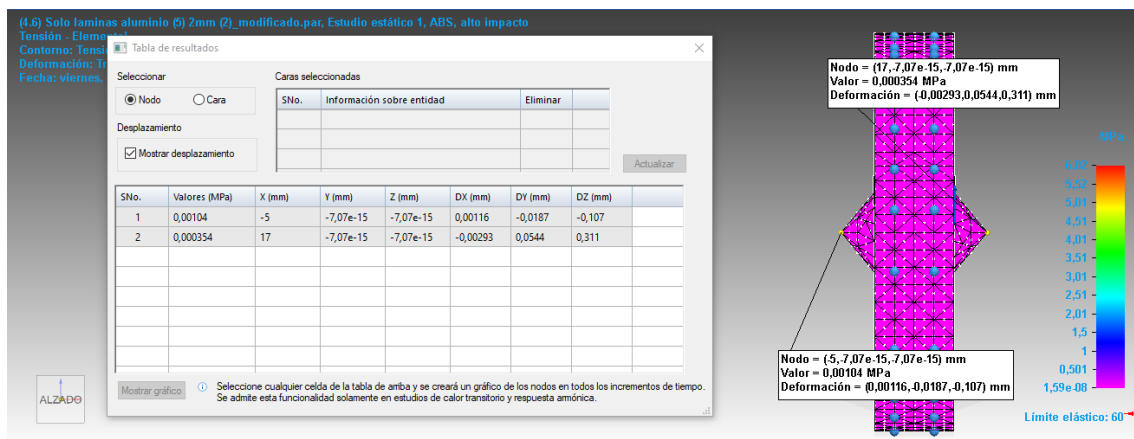


Figura 45. Ventana de Solid Edge con las coordenadas de los puntos.

Con la posición de los vértices de los conos nombrados anteriormente y sus desplazamientos en las tres coordenadas, se calcula la rotación obtenida en mrad con las siguientes fórmulas:

$$\text{azimut} = \text{atan} \left( \frac{DY_1 - DY_2}{X_1 - X_2} \right) * 1000$$

$$\text{elevación} = \text{atan} \left( \frac{DZ_2 - DZ_1}{X_1 - X_2} \right) * 1000$$

Empezamos por 1N de fuerza descompuesta en los ejes Y y Z, pero tuvimos que reducir la fuerza hasta verse que para 0,25 N era la necesaria (aplicada en la parte posterior del motor), para conseguir el giro deseado de 4,28 mrad, en el prototipo del TFG anterior. (Figura 46)

Los datos obtenidos son los siguientes:

Resultados , tras cambiar la fuerza, a una fuerza compuesta de 2 fuerzas de 1 N en eje Y y Z, y tambien aplicando la fuerza en la parte trasera del motor.												
Punto	Mpa	Desplazamiento (mm)			X	Y	Z	Dx	Dy	Dz	Angulo (mrad)	Angulo (grados)
1	0,000355	17	0	0,00E+00	-0,0472	0,194	1,23	11,84944538	0,67892321	Azimut		
2	0,000803	-5	0	0	0,0165	-0,0667	-0,419	74,81464726	4,286563534	Elevación		
Reduciendo las fuerzas aplicadas a 0,5 N, obtenemos:												
1	0,000407	-5	0	0	0,00431	-0,0337	-0,216	6,009018583	0,344291404	Azimut		
2	0,000184	17	0	0	-0,0125	0,0985	0,634	38,61715579	2,212600043	Elevación		
Aumentando la resolución de la malla, osea, disminuyendo el tamaño de malla												
1	0,000425	-5	-7,06E-15	-1,41E-14	0,00554	-0,0463	-0,241	8,104368016	0,464346083	Azimut		
2	0,000197	17	-7,06E-15	-1,41E-14	-0,0155	0,132	0,704	42,92815629	2,459602177	Elevación		
Reduciendo las fuerzas aplicadas a 0,3 N, obtenemos:												
1	0,000243	-5	0	0	0,00156	-0,0203	-0,131	3,618166029	0,207305643	Azimut		
2	0,000112	17	0	0	-0,00464	0,0593	0,385	23,45024597	1,343600123	Elevación		
Aumentando la resolución de la malla, osea, disminuyendo el tamaño de malla												
1	0,000252	-5	-7,06E-15	-1,41E-14	0,00203	-0,0279	-0,146	4,899960784	0,280747073	Azimut		
2	0,000117	17	-7,06E-15	-1,41E-14	-0,00571	0,0799	0,427	26,03956749	1,491957318	Elevación		
Vamos a intentar aproximarnos lo maximo a esos 4,28 radianes, reduciendo la fuerza a 0,27 N y aumentando la precisión de la malla, osea, reduciendo su tamaño												
1	0,000245	-5	7,06E-15	0	0,00169	-0,0253	-0,131	4,436334532	0,254183245	Azimut		
2	0,000106	17	7,06E-15	0	-0,00457	0,0723	0,384	23,40481637	1,340997198	Elevación		
Vamos a intentar aproximarnos lo maximo a esos 4,28 radianes, reduciendo la fuerza a 0,25 N y aumentando la precisión de la malla, osea, reduciendo su tamaño												
1	0,00023	-5	7,06E-15	0	0,00145	-0,0234	-0,122	4,109067783	0,235432242	Azimut		
2	0,000101	17	7,06E-15	0	-0,00393	0,067	0,356	21,72385473	1,244685191	Elevación		
Aunque esté por debajo de los 4,28 radianes buscados, se podrian alcanzar cuando se reduzca el tamaño de la malla, el alcatal es de 1,11 mm. Pero simular tamaños de malla mas pequeños da tiempos de simulación tan largos que nunca he terminado una simulación.												

Figura 46. Simulaciones y cálculos de las fuerzas y sus respectivos giros obtenidos.

Siendo “azimut” el ángulo de rotación alrededor del eje Z. Su valor es 4,11; aunque este valor este por debajo de los 4,28 mrad buscados, se llegara a él cuando se reduzca el tamaño de malla. Pero simular tamaños de malla muy pequeños requiere tiempos de simulación muy grandes.

Recuérdese que el eje X es la dirección del láser.

Después de calcular esta fuerza de 0,25 N, ya la podremos aplicar en los estudios estáticos que le vamos a aplicar a nuestro prototipo para dimensionar las láminas hasta conseguir el giro deseado.

#### 4.3.1. Disminución de la anchura de las láminas para conseguir el giro deseado

##### Objetivo:

Una vez que ya hemos calculado la fuerza necesaria para conseguir el giro deseado, podemos pasar a usarla para el estudio estático de nuestro prototipo.

Nuestro objetivo es conseguir el giro deseado de 4,28 mrad y la compensación de frecuencias cercana a la máxima del motor, en nuestro prototipo de 2 grados de libertad.

Para ello se modificarán los espesores y anchura de las láminas.

##### Geometría:

Como en los casos anteriores, las dimensiones a tener en cuenta son los espesores de las láminas, y en este caso en particular también la anchura; ya que esta va a ser modificada para probar si combinando distintos valores de estos parámetros es posible conseguir nuestro objetivo.

En el caso que es mostrado en la Figura , solo para ver como son las láminas con anchura menor que la del resto del prototipo, se toma para espesores de 1mm y anchura de 4mm.

Ambas dimensiones han sido variadas con la misión de visualizar cuál es la evolución y cuáles son los resultados cambiando dichas variables.

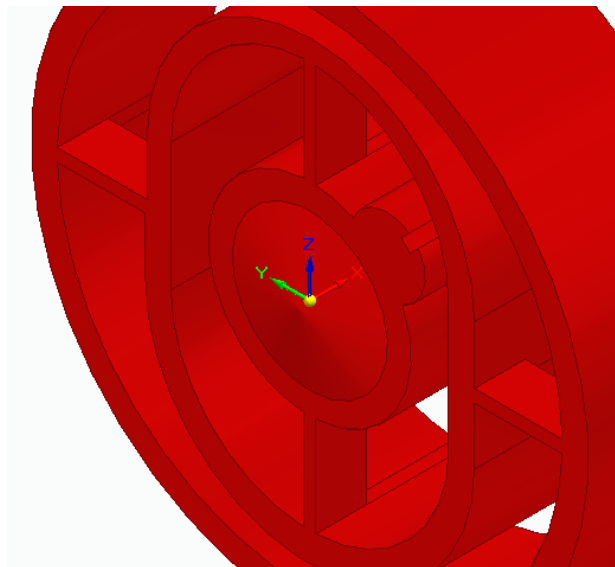


Figura 47. Geometría del prototipo

Este prototipo que vemos en la Figura 47, que se va a simular en PLA modificando sus parámetros de espesores y anchura de láminas, también tiene al igual que el prototipo ((4.6) Solo laminas aluminio (5) 2mm (2)) de la Figura 40, 2 conos para poder tomar datos de las coordenadas del láser, aunque estos conos son de menor altura y por eso no se aprecian tanto en la Figura 47; y las mismas condiciones de contorno, es decir, un empotramiento exterior y la fuerza (descompuesta en Y y Z) y aplicada en la parte posterior del motor.

**Simulación, Resultados, y Conclusiones:**

A la hora de la simulación estática en Solid Edge para calcular desplazamientos, será fundamental tener seleccionado la opción de grandes desplazamientos, ya que, sino los resultados serían muy malos y no se realizaría un cálculo real de la simulación.

Respecto al mallado utilizado en todas las simulaciones de este punto: se ha utilizado un mallado número 7 en la escala de Solid Edge; que equivale a un tamaño de malla de 1,48mm.

La primera simulación que se realizó fue para el prototipo que fue fabricado anteriormente, el cual cumplía la condición de la compensación de frecuencias cercanas a la máxima del motor, con la intención de ver que giro obteníamos.

El prototipo con una anchura de 12mm y los espesores que se expresan en la Tabla 3, además de los resultados obtenidos tanto de la simulación del estudio estático y del estudio modal, y con esos resultados también se muestra el giro calculado.

**Tabla 3. Resultados de la simulación inicial del prototipo con 2 grados de libertad.**

		Punto	X	Y	Z	Dx	Dy	Dz	Angulo (mrad)	Angulo (grados)		Frecuencia Azimut (Hz)	Frecuencia Elevación (Hz)
Espesor_lamina_exterior	1,63	1	-5	0	-5,18E-15	-4,08E-05	-0,0049	-0,00105	0,81	0,05	Azimut	758,6	730,3
Espesor_lamina_interior	0,92	2	17	0	0,0726	-5,98E-05	0,0129	0,00244	0,16	0,01	Elevación		

Como se puede apreciar, el prototipo con esas dimensiones de lámina no cumple con los objetivos requeridos (su giro es de 0,81 mrad en vez de los 4,28 que buscamos), por lo que el siguiente paso fue realizar un gran abanico de simulaciones, combinando distintos espesores y distintas anchuras de lámina, para intentar conseguir el giro deseado y ver que frecuencias obteníamos.

A continuación, solo se muestran en la Tabla 4 los resultados más prometedores de las simulaciones (aquellos con los que sí que se ha obtenido el giro deseado) y los resultados de los prototipos que se van a fabricar.

El resto de todos los resultados de las simulaciones realizadas para este punto se encuentran también en el Anexo 2.

**Tabla 4. Resultados de las simulaciones del prototipo con 2 grados de libertad.**

		Punto	X	Y	Z	Dx	Dy	Dz	Angulo (mrad)	Angulo (grados)		Frecuencia Azimut (Hz)	Frecuencia Elevación (Hz)
Espesor_lamina_exterior	1,3	1	-1	0	5,18E-15	0,000124	-0,012	-0,00312	4,59	0,26	Azimut	317,6	330,7
Espesor_lamina_interior	0,8	2	13	0	0,105	-0,00014	0,0522	0,0115	1,04	0,06	Elevación		
Anchura de las laminas	7,00												

Espesor_lamina_exterior	1,42	1	-1	-5,18E-15	0	0,00012	-0,0103	-0,00278	4,22	0,24	Azimut	329	342,4
Espesor_lamina_interior	0,87	2	13	-5,18E-15	0,105	-0,000115	0,0488	0,0111	0,99	0,06	Elevación		
Anchura de las laminas	6,50												

Espesor_lamina_exterior	1,52	1	-1	0	5,18E-15	0,000112	-0,00973	-0,00261	4,23	0,24	Azimut	327,7	343,7
Espesor_lamina_interior	0,92	2	13	0	0,104	-0,000125	0,0495	0,0113	0,99	0,06	Elevación		
Anchura de las laminas	6,00												

Espesor_lamina_exterior	3	1	-1	0	0	1,95E-05	-0,000926	-0,000388	0,78	0,04	Azimut	734,4	712,4
Espesor_lamina_interior	1,8	2	13	0	0,0604	1,25E-06	0,00997	0,00277	0,23	0,01	Elevación		
Anchura de las laminas	6,00												

Espesor_lamina_exterior	3	1	-1	0	0	3,56E-05	-0,00213	-0,000838	1,66	0,10	Azimut	505,3	486,3
Espesor_lamina_interior	1,8	2	13	0	0,0604	-1,77E-05	0,0211	0,00659	0,53	0,03	Elevación		
Anchura de las laminas	4,00												

Espesor_lamina_exterior	2	1	-1	0	-5,18E-15	7,79E-05	-7,41E-03	-2,29E-03	4,39	0,25	Azimut	313,4	325,7
Espesor_lamina_interior	1,2	2	13	0	0,104	-0,00019	0,054	0,0143	1,18	0,07	Elevación		
Anchura de las laminas	4,00												
Espesor_lamina_exterior	3,5	1	-1	0	0	8,51E-05	-4,42E-03	-2,39E-03	4,09	0,23	Azimut	315	268,2
Espesor_lamina_interior	2,2	2	13	0	0,059	-0,000165	5,28E-02	0,0235	1,85	0,11	Elevación		
Anchura de las laminas	2,00												

Espesor_lamina_exterior	3,5	1	-1	-5,18E-15	0	0,000101	-0,00497	-0,0024	4,47	0,26	Azimut	302,5	268,2
Espesor_lamina_interior	2	2	13	-5,18E-15	0,0592	-0,000173	0,0576	0,0236	1,86	0,11	Elevación		
Anchura de las laminas	2,00												

Espesor_lamina_exterior	8,5	1	-1	0	-5,18E-15	-6,67E-05	-4,18E-03	-0,00278	4,22	0,24	Azimut	296	235,5
Espesor_lamina_interior	6,5	2	13	0	8,16E-02	-0,000446	0,0549	0,0331	2,56	0,15	Elevación		
Anchura de las laminas	1,00												

Las conclusiones para esta modificación del prototipo, variando la anchura de las láminas, además de los espesores, para intentar conseguir los objetivos, son:

Como se puede apreciar tras observar las tablas de los resultados y todas las demás simulaciones que se encuentran en el Anexo 2.

Al variar la anchura de las láminas, por ejemplo, disminuyéndola (en el caso que pasamos de 6 a 4mm), pero manteniendo los mismos espesores (de 3 y 1,8mm) para que se note el efecto, **el giro del prototipo aumenta** (de 0,78 a 1,66 mrad), **pero las frecuencias de vibración disminuyen** (de 734 a 505 Hz).

Para conseguir mantener el giro deseado al disminuir la anchura, hace falta aumentar los espesores, pero en cambio disminuyen las frecuencias, esta última conclusión es la que va en contra de los que queríamos, ya que buscábamos que aumentaran las frecuencias para llegar hasta los 733 Hz, la máxima del motor.

Tras realizar muchas simulaciones, haciendo combinaciones de distintas dimensiones para la anchura y el espesor de las láminas, fue imposible obtener el giro deseado, con las frecuencias máximas compensadas en azimuth y elevación.

Es posible obtener el giro deseado, pero el objetivo de mantener la compensación de frecuencias para la frecuencia máxima del motor no se ha podido conseguir, la compensación de frecuencias sí que es un requisito factible pero no a esa frecuencia, a frecuencias menores si es viable.

**Fabricación y experimentación en el laboratorio:**

Aunque esta modificación del prototipo no es una solución para conseguir nuestros objetivos, se ha decidido fabricar dos prototipos significativos de la variación de la anchura de lámina para probarlos en el laboratorio.

Los prototipos fabricados tienen las dimensiones que a continuación se muestran en la Tabla 5:

**Tabla 5. Cálculo del giro y frecuencias del prototipo con 2 grados de libertad.**

Espesor_lamina_exterior	1,42	1	-1	-5,18E-15	0	0,00012	-0,0103	-0,00278	4,22	0,24	Azimut	329	342,4
Espesor_lamina_interior	0,87	2	13	-5,18E-15	0,105	-0,000115	0,0488	0,0111	0,99	0,06	Elevación		
Anchura de las laminas	6,50												

Espesor_lamina_exterior	1	1	-1	-5,18E-15	5,18E-15	1,43E-04	-9,65E-03	-0,00999	4,73	0,27	Azimut	310,8	172,2
Espesor_lamina_interior	1	2	13	-5,18E-15	1,04E-01	-0,000537	0,0566	0,0455	3,96	0,23	Elevación		
Extrusión de las laminas	7,00												

El primer prototipo (pieza 1) con espesores de 1,42mm para las láminas exteriores y 0,87 para las láminas interiores, y una anchura de 6,5mm para las láminas, se obtiene un giro de 4,22 mrad, muy próximo al deseado, y las frecuencias obtenidas, aunque compensadas en Azimut y Elevación no llegan ni a la mitad de la frecuencia máxima. Pero esta combinación de dimensiones es la mejor que se ha conseguido para obtener el giro deseado y la máxima frecuencia.

Respecto al segundo prototipo (pieza 2) a fabricar, se vio oportuna fabricar un prototipo, que teniendo el giro deseado tuviera las frecuencias lo más descompensadas posible para ver la diferencia en el laboratorio. Este prototipo tiene dimensiones de 1mm para todos los espesores de las láminas y 7mm de anchura de estas.

A continuación, se muestran tres imágenes del proceso de fabricación y prueba en el laboratorio de los dos prototipos:



Figura 48. Imprimiendo una pieza.



Figura 49. Simulación en el laboratorio de Pieza 1.

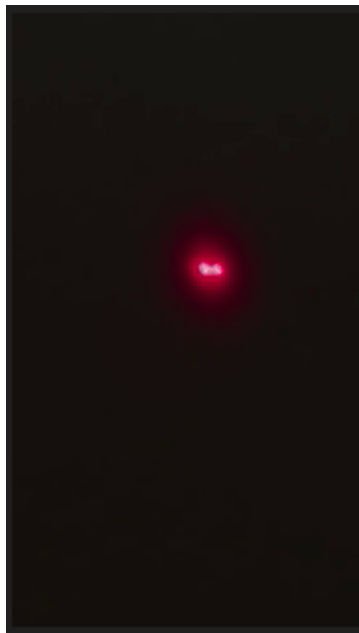


Figura 50. Simulación en el laboratorio de Pieza 2.

En la Figura 48 se puede apreciar el proceso de fabricación aditiva FDM, mientras fabrica una de las piezas probadas.

En la Figura 49, vemos que como la pieza 1 tiene las frecuencias compensadas solo entra en resonancia una de ellas, en este caso la de azimut.

En la Figura 50, al no tener las frecuencias compensadas si entra en resonancia la frecuencia de elevación, con menor amplitud.

### 4.3.2. Disminución de la longitud de las láminas, añadiendo material, para conseguir el giro deseado

#### Objetivo:

Tras probar que la variación de la anchura de las láminas junto con la de los espesores no es una solución para alcanzar nuestros dos objetivos, el giro deseado de 4,28 mrad y la compensación de frecuencias en torno a la frecuencia máxima del motor (733 Hz).

La siguiente idea que se probó para conseguir los objetivos en nuestro prototipo, fue además de variar los espesores y la anchura, variar también la longitud de las láminas, esta variación de la longitud se realizó añadiendo material por el interior del prototipo, este modo de añadir material se apreciara mejor en las figuras del siguiente punto.

#### Geometría:

Partiendo de la geometría del prototipo del punto anterior, al cual además de poder variar los espesores de sus láminas, también era posible variar la anchura de estas, pero sin cambiar la anchura total del prototipo.

La siguiente modificación geométrica que sufrió nuestro prototipo fue la reducción de la longitud de las láminas, esta reducción se realizó añadiendo material en los extremos de las láminas, de tal manera que la circunferencia interior tanto de la corona exterior como de la corona intermedia del prototipo, se vieran modificadas.

A continuación, en las figuras 51, 52 y 53 se puede apreciar más en detalle a lo que nos referimos cuando hablamos de añadir material, también se puede apreciar la progresión que se ha seguido para añadir material simulación a simulación, empezando añadiendo poco material (Figura 59), donde solo se ha recortado 1mm de la longitud de la lámina, hasta añadir bastante material (Figura 61), donde se ha recortado 4mm a las láminas; pasando por la Figura 60 donde se le ha recortado 2mm a las láminas.

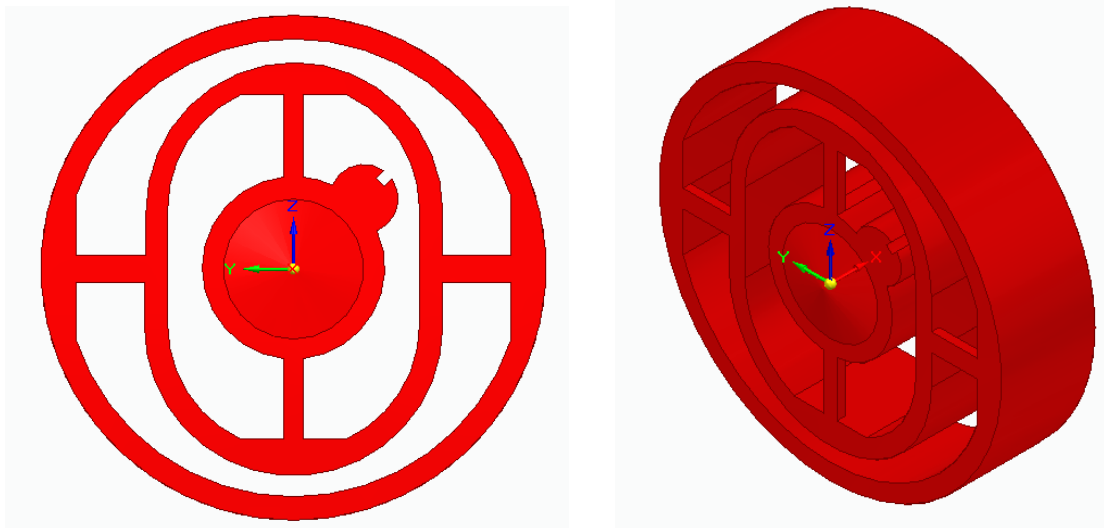


Figura 51. Geometría del prototipo al añadirme material por el interior, recortando 1mm de la longitud de las láminas.

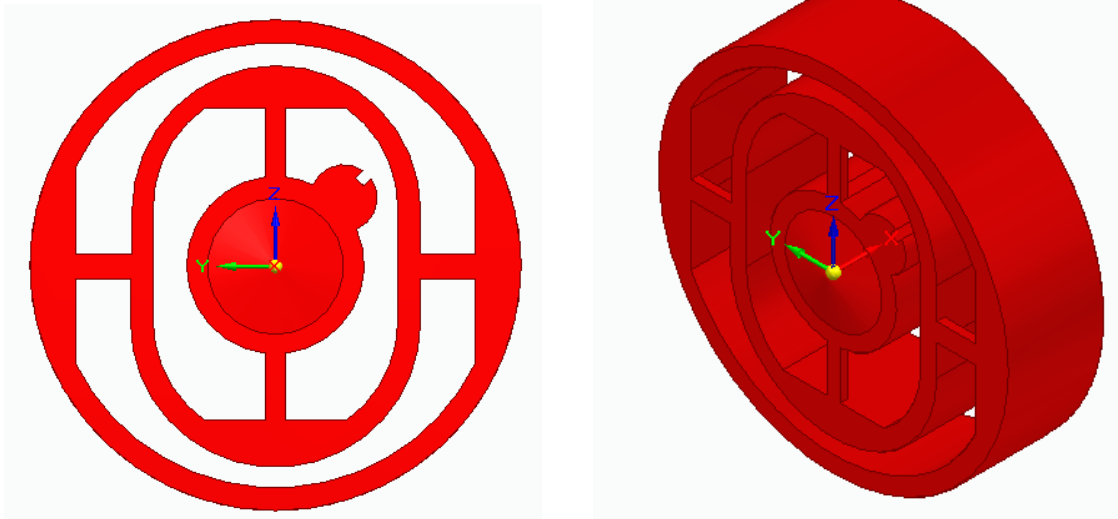


Figura 52. Geometría del prototipo al añadirme material por el interior, recortando 2mm de la longitud de las láminas.

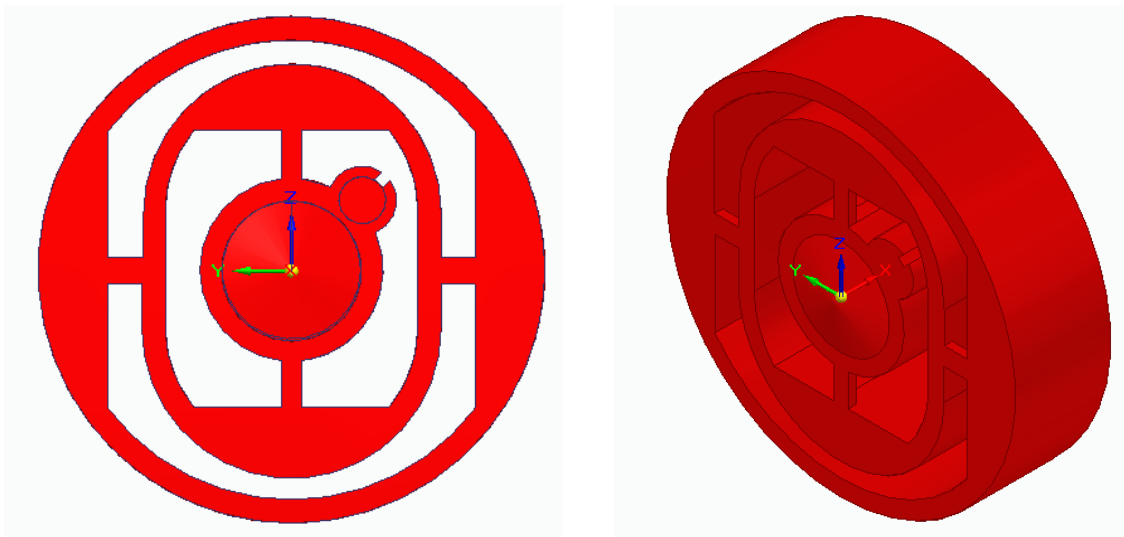


Figura 53. Geometría del prototipo al añadirme material por el interior, recortando 4mm de la longitud de las láminas.

### Simulación, Resultados, y Conclusiones:

Después de presentar la nueva geometría que se va a simular (Figuras 51, 52 y 53) en la que se pueden apreciar la progresión de los 3 prototipos que se han simulado y la transformación que ha sufrido el prototipo en las que se ha visto recortado la longitud de sus láminas.

Lo primero que se quiere dejar claro es que todas las simulaciones se han realizado con mallado número 7 en la escala del programa, que su tamaño es de 1,48mm, de este modo no se especificará para cada simulación su mallado.

Todos los resultados de las simulaciones realizados para este punto del trabajo se encuentran en el Anexo 2. Aunque a continuación, se muestran los resultados más representativos y prometedores:

Estos resultados presentados en la siguiente tabla 6, representan las dimensiones de las láminas (se indican espesores y anchura, además de la longitud recortada respecto de la inicial (Tabla 2)), las coordenadas de los puntos seleccionados para la simulación, los giros cálculos con esas coordenadas y, por último, las frecuencias en Azimut y Elevación obtenidas del estudio de los modos de vibración.

**Tabla 6. Cálculo del giro y frecuencias del prototipo con 2 grados de libertad, variando espesores, anchura y longitud de láminas.**

Recortando 1 mm la altura inicial de las láminas, añadiendo material:

		Punto	Mpa	X	Y	Z	Dx	Dy	Dz	Angulo (mrad)	Angulo (grados)		Frecuencia Azimut (Hz)	Frecuencia Elevación (Hz)
Espesor_lamina_exterior	1,42	1	0,00234	-1	-5,18E-15	0	0,000128	-0,0119	-0,00315	4,842819283	0,27747311	Azimut	314,8	303,5
Espesor_lamina_interior	0,87	2	0,00137	13	-5,18E-15	0,105	-0,000166	0,0559	0,013	1,153570917	0,06609474	Elevación		
Extrusión de las laminas	6,50													

Si seguimos añadimos más material, recortando 2 mm la altura inicial de las láminas.

		Punto	Mpa	X	Y	Z	Dx	Dy	Dz	Angulo (mrad)	Angulo (grados)		Frecuencia Azimut (Hz)	Frecuencia Elevación (Hz)
Espesor_lamina_exterior	1,42	1	0,0022	-1	-5,18E-15	0	0,000125	-0,0117	-0,00308	4,657109188	0,2668327	Azimut	317,9	296,2
Espesor_lamina_interior	0,87	2	0,00145	13	-5,18E-15	0,105	-0,000153	0,0535	0,0126	1,119999532	0,06417125	Elevación		
Extrusión de las laminas	7,00													

		Punto	Mpa	X	Y	Z	Dx	Dy	Dz	Angulo (mrad)	Angulo (grados)		Frecuencia Azimut (Hz)	Frecuencia Elevación (Hz)
Espesor_lamina_exterior	9	1	0,0031	-1	0	-5,18E-15	-9,81E-05	-0,00412	-0,00152	3,815695767	0,21862326	Azimut	317,6	293,9
Espesor_lamina_interior	5,5	2	0,00132	13	0	0,105	-0,000361	0,0493	0,0182	1,408570497	0,08070514	Elevación		
Extrusión de las laminas	11,00													

Recortando 4 mm de la altura inicial de las láminas.

		Punto	Mpa	X	Y	Z	Dx	Dy	Dz	Angulo (mrad)	Angulo (grados)		Frecuencia Azimut (Hz)	Frecuencia Elevación (Hz)
Espesor_lamina_exterior	1,42	1	0,002	-1	0	0	8,79E-06	-0,0102	-0,00254	4,171404376	0,23900387	Azimut	338,6	293
Espesor_lamina_interior	0,87	2	0,00171	13	0	0,105	-0,000221	0,0482	0,0111	0,974285406	0,05582244	Elevación		
Extrusión de las laminas	8,00													

Además de las simulaciones, también se vio oportuno realizar una serie de gráficas comparativas entre la modificación de la variación de la anchura y la modificación de la variación de la longitud de las láminas, para ver si tenía algún efecto añadir la variación de la longitud al prototipo.

En las siguientes Figuras 54 y 55, me muestran las gráficas, una para las simulaciones sin añadir material (solo variando espesores y anchura) y otra para las simulaciones recortando la longitud de las láminas añadiendo material:

Gráficas para resultados sin añadir material y añadiendo material, hasta recortar 1mm de la longitud de las láminas. Para estas tres simulaciones representadas, solo se ha variado solo la anchura de las láminas, los espesores se han mantenido constantes a 1,42 mm y 0,87 mm para las láminas exteriores e interiores respectivamente.

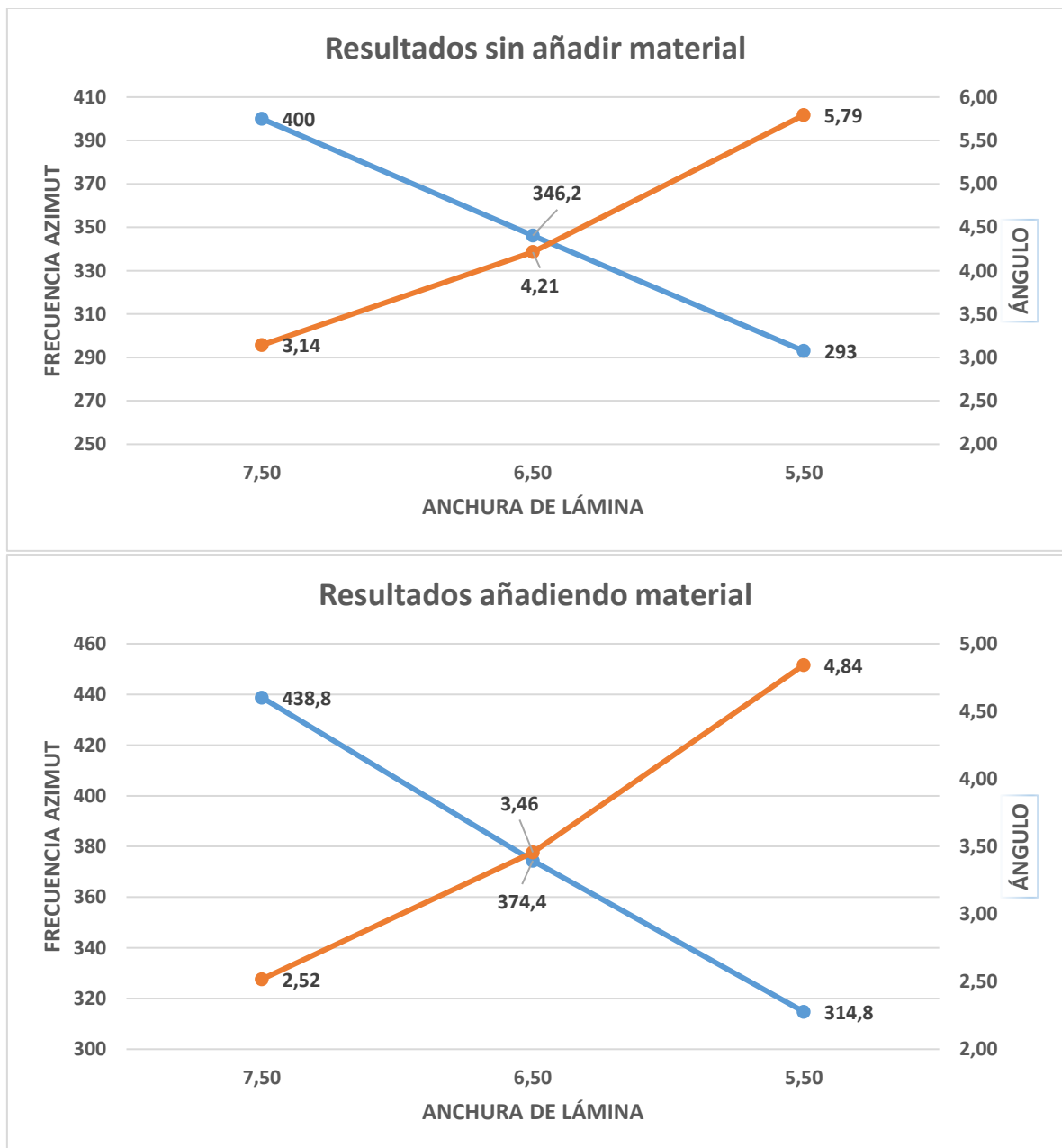


Figura 54. Gráficas comparativas de los resultados sin añadir material y recortando 1mm de la longitud añadiendo material.

Gráficas para resultados sin añadir material y añadiendo material, hasta recortar 4mm de la longitud de las láminas.

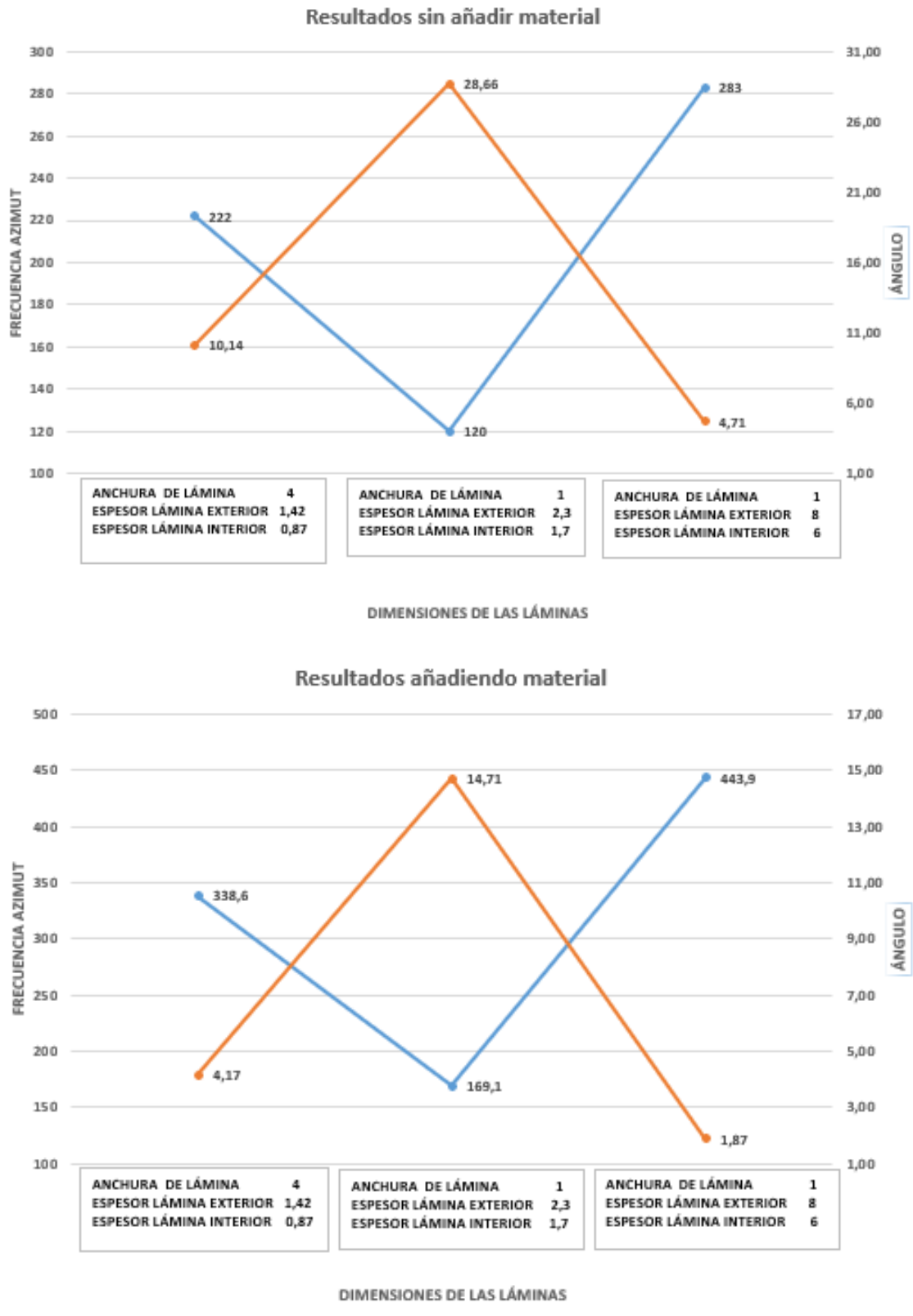


Figura 55. Gráficas comparativas de los resultados sin añadir material y recortando 4mm de la longitud añadiendo material.

Para terminar con los dos apartados anteriores (Tabla 6 y Gráficas comparativas), se van a comentar las conclusiones que se han podido observar de todas las simulaciones realizadas:

Observado la Tabla 6 de resultados y las demás simulaciones que se encuentran en el Anexo 2, podemos sacar las siguientes conclusiones de la variación de la longitud, añadiendo material.

Si queremos mantener un giro determinado en nuestro prototipo al reducir la longitud de las láminas, vemos que en las tres simulaciones que hemos realizado para poder mantener los espesores iguales, la anchura de las láminas tiene que aumentar, aun así, el giro disminuye un poco cada vez que añadimos más material (recortando la longitud de las láminas) y las frecuencias aumentan.

Si nos fijamos en las dos simulaciones que tenemos para la longitud recortada de 2mm, para aumentar el giro (de 3,8 a 4,6 mrad) hace falta disminuir espesores (de 9 y 5,5 a 1,42 y 0,87mm), pero disminuye la frecuencia.

Este comportamiento en el que aumenta el giro y se disminuyen las frecuencias de vibración del prototipo, es el mismo comportamiento que obtenemos con la variación de anchura y espesores. Esto se va a comentar más en detalle a continuación.

Respecto a las gráficas comparativas, podemos observar que, en las dos, los dibujos que realizan las líneas, es decir las tendencias, son prácticamente iguales en las simulaciones sin añadir material (solo variando espesores y anchura) y en las que se añade material para recortar la longitud de las láminas.

Por esto, esta modificación no está aportando nada nuevo. Tras la modificación de variar también la longitud de las láminas, añadiendo material, el prototipo se sigue comportando igual (con la misma tendencia y proporción) que para las simulaciones sin añadir material (solo variando espesores y anchura); al disminuir la anchura, aumentaba el giro, pero disminuirá la frecuencia

### 4.3.3. Simulación prototipo “flexural con abrazadera integrada parte superior derecha”

#### Objetivo:

Después de ver que las modificaciones de variación de los parámetros geométricos de las láminas (espesores, anchura y longitud), no han servido para conseguir los objetivos de giro y frecuencias.

El director del trabajo, me proporcionó un nuevo prototipo (“flexural con abrazadera integrada parte superior derecha”) y el objetivo de este punto es simularlo para ver cómo se comporta este nuevo diseño.

#### Geometría:

Bajo la idea de pasar a prototipos con dobles láminas, este nuevo prototipo lo lleva a un nivel superior.

En la figura 57 se puede apreciar la geometría del nuevo prototipo, se diferencia de nuestro prototipo en que las láminas están compuestas por una lámina de gran longitud que se encuentra recogida en forma de S consecutivamente, además lo que serían las láminas exteriores, se encuentran duplicadas (dos pares), pero en cambio en el interior solo encontramos solo un par de este nuevo modelo de láminas compactadas.

Si nos fijamos en la parte central vemos que tenemos 3 agujeros adicionales, además del alojamiento del motor, y si antes la parte central tenía parte de cilindro, ahora se asemeja más a un cubo rectangular; ya que la última diferencia es que este prototipo tiene una extrusión, es decir una anchura de 30mm, el máximo que permite la geometría del brazo telescópico.

La aplicación de la fuerza se hace en la misma superficie que los casos anteriores, en la parte posterior del motor.

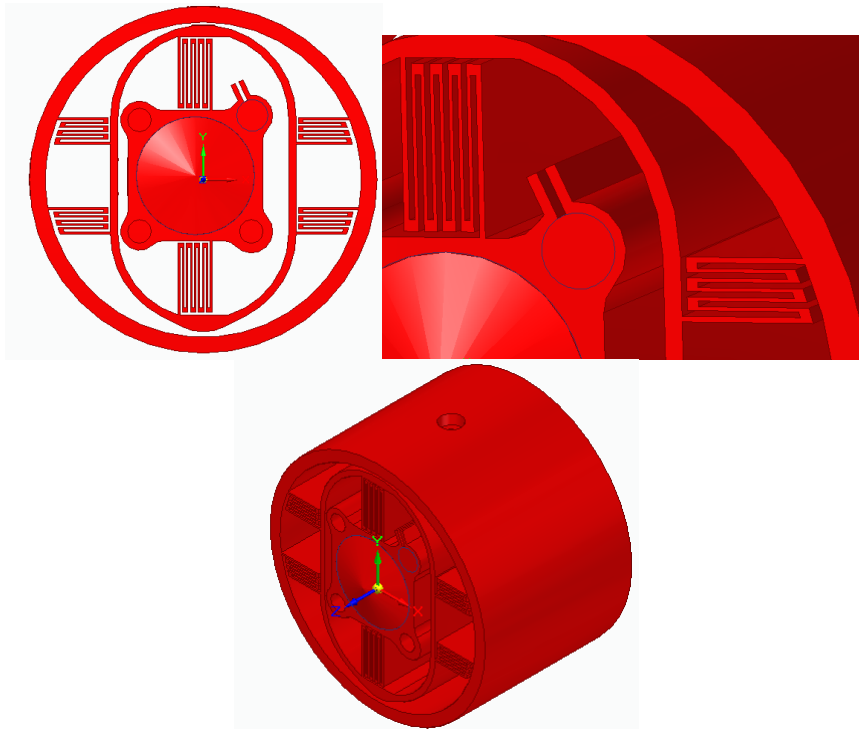


Figura 56 Geometría del prototipo flexural con abrazadera integrada parte superior derecha.

**Simulación, Resultados, y Conclusiones:**

Pasando a la simulación de este nuevo prototipo, el estudio estático se ha realizado con el mallado número 3 de la escala del programa, lo que corresponde a un tamaño de malla de 2,12 mm. Ya que al ser un prototipo muy complejo si reducíamos el tamaño de malla el tiempo de cálculo y simulación era enorme.

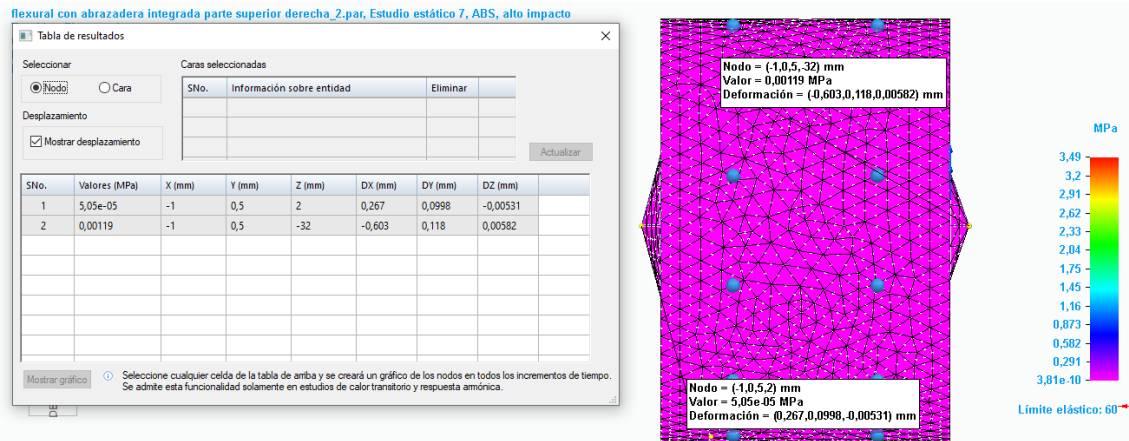


Figura 57. Puntos seleccionados del prototipo flexural con abrazadera integrada parte superior derecha.

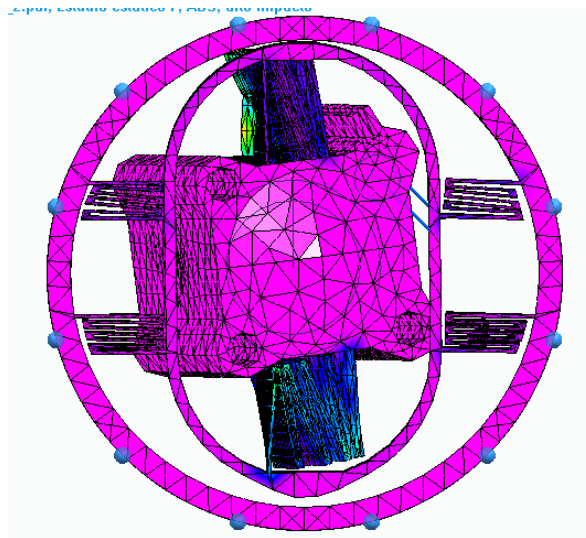


Figura 58. Simulación de prototipo flexural con abrazadera integrada parte superior derecha.

Resultados de la simulación del prototipo, en este caso se ha simulado en los dos materiales, PLA Y Aluminio 7075, se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 7. Cálculo del giro y frecuencias del prototipo flexural con abrazadera integrada parte superior derecha**

**En PLA**

Punto	Mpa	X	Y	Z	Dx	Dy	Dz	Angulo (mrad)	Angulo (grados)		Frecuencia Azimut (Hz)	Frecuencia Elevación (Hz)
1	5,05E-05	-1	0,5	2	0,267	0,0998	-0,00531	25,58265279	1,465778034	Azimut	43,06	212,7
2	0,00119	-1	0,5	-32	-0,603	0,118	0,00582	0,535294067	0,030670091	Elevación		

**En Aluminio 7075**

Punto	Mpa	X	Y	Z	Dx	Dy	Dz	Angulo (mrad)	Angulo (grados)		Frecuencia Azimut (Hz)	Frecuencia Elevación (Hz)
1	0,000245	-1	0,5	2	0,00977	0,0038	-5,46E-05	0,943235014	0,054043385	Azimut	136,7	669,9
2	0,00106	-1	0,5	-32	-0,0223	0,00487	-3,94E-05	0,031470588	0,001803132	Elevación		

Viendo los resultados, podemos apreciar que, respecto al estudio modal de frecuencias de vibración, las frecuencias de Elevación están muy descompensadas con las de Azimut, esto es debido a que tenemos un doble par del conjunto de multiláminas en la parte exterior y solo un par en el interior.

Y como sabemos, las láminas exteriores están relacionadas con la frecuencia de elevación y las láminas interiores con la de Azimut.

Al tener un mayor número de láminas en el exterior, la frecuencia de vibración en Elevación es mucho mayor que en Azimut, que tenemos un menor número de láminas al tener solo un par del conjunto de multiláminas.

Si se le añadiera un segundo par del conjunto de multiláminas en la parte interior, se podrían compensar las frecuencias de vibración.

Respecto a la variación del material, si comparamos las frecuencias de vibración obtenemos la misma conclusión que del estudio previo, que el Aluminio 70785, obtiene frecuencias bastante más grandes que el PLA.

Y en cuanto al giro del prototipo; en el caso del PLA se pasa del giro con 25 mrad y con el Aluminio 7075 conseguimos un giro mínimo de 0,9 mrad; al comparar estos valores, podemos apreciar que, al variar de material, esto también afecta al giro, además de a las frecuencias como ya habíamos visto, viendo que con el Aluminio el giro del prototipo se reduce muchísimo.

## 5. CONCLUSIONES DEL TRABAJO

El objetivo fundamental de este Trabajo de Fin de Grado era el diseño, simulación y análisis de las frecuencias y modos de vibración en función del diseño y dimensiones de las láminas del sistema flexible para la alineación y posicionamiento de un láser de medida de alta precisión para la verificación volumétrica de máquina herramienta, y posteriormente su fabricación y experimentación en PLA con fabricación aditiva FDM.

La principal innovación del diseño es que se trata de un sistema flexible monolítico miniaturizado, permite ajustar los cuatro grados de libertad requeridos para que el láser mida de forma adecuada en las condiciones de trabajo de un brazo telescópico, además reducen el rozamiento e histéresis y tiene un proceso de fabricación sencillo, resultando un sistema de bajo coste.

Inicialmente se ha simulado un prototipo con un solo grado de libertad como estudio previo para ver la relación de las frecuencias de vibración y las dimensiones de las láminas.

Se ha concluido que, a **mayor espesor y mayor anchura** de lámina, **mayor frecuencia**; a **mayor longitud** de lámina, **menor frecuencia**.

Variando el material, se aprecia que las simulaciones en Aluminio han obtenido frecuencias bastante mayores que para las simulaciones en PLA, pero el comportamiento es el mismo al variar las dimensiones de las láminas.

Se ha analizado un diseño también basado en láminas, pero con dos grados de libertad; con el cual se ha llegado a conseguir una compensación de sus frecuencias de vibración en Azimut y Elevación próximas a la frecuencia máxima del motor, solo variando los espesores de las láminas.

Tras ser fabricado con el proceso de fabricación aditiva FDM, se le realizaron pruebas en el laboratorio para ver cómo se comportaba con el motor en la realidad, y obtuvimos que el prototipo era más rígido de lo deseado.

Se ha buscado conseguir la rigidez deseada, que viene definida por el giro del prototipo.

Se ha estudiado el efecto de la variación de los parámetros de las láminas (espesores, anchura y longitud) en la rigidez y en el rango de giro mediante simulaciones de elementos finitos, con el objetivo de conseguir un prototipo con el giro deseado y la compensación de frecuencias en Azimut y Elevación próximas a la frecuencia máxima del motor.

Este objetivo no ha sido posible, no se ha encontrado una combinación de los parámetros de las láminas, que respetando el espesor mínimo del proceso de fabricación y las dimensiones geométricas miniaturizadas máximas obtenga en las simulaciones los dos objetivos a la vez.

Posteriormente, se han materializado algunos de esos prototipos que no ha conseguido los objetivos mediante fabricación aditiva FDM y se han ensayado experimentalmente en el laboratorio.

Por último, se ha simulado un prototipo con una nueva idea de láminas, las multiláminas, y se ha podido analizar sus diferencias de comportamiento en giro, frecuencias y variando el material.

En resumen, las tareas pendientes que podrían plantear algunas posibles líneas de trabajo futuras:

- Realizar simulaciones con otros materiales.
- Continuar las simulaciones, y si fuera necesario realizarle alguna modificación, al último prototipo con el novedoso diseño de las láminas.
- Realizar ensayos de múltiples ciclos de funcionamiento para analizar problemas de plasticidad y/o fatiga a largo plazo.
- Realizar análisis de vibraciones de otros prototipos basados en ejes o con diseños de láminas diferentes.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1 - Ariza Cólera, C. (2020), *Desarrollo y fabricación de sistemas flexibles de alineación de un láser de medida para la verificación simultánea de máquina-herramienta*, Trabajo de fin de grado, Universidad de Zaragoza.
- 2.- Kunzmann H, Pfeifer T, Schmitt R, Schwenke H, Weckenmann A, (2005), Productive Metrology - Adding Value to Manufacture. *Annals of the CIRP* 54(2):691-713.
- 3.- Ramesh R, Mannan MA, Poo AN (2000), Error compensation in machine tools Part I: geometric, cutting-force induced and fixture- dependent errors. *Machine Tools & Manufacture*. Vol 40, Issue 9, Pages 1235-1256.
- 4.- Schwenke H, Knapp W, Haitjema H, Weckenmann A, Schmitt R, Delbressine F (2008), Geometric error measurement and compensation of machines—an update. *CIRP Ann Manuf Technol* 57(2): 660–675.
- 5.- Trapet E, Aguilar JJ, Yagüe JA, Spaan H, Zelený V (2006), Self-centering probes with parallel kinematics to verify machine- tools. *Precis Eng* 30(2):165–179.
- 6.- Aguado S, Samper D, Santolaria J, Aguilar JJ (2014), Volumetric verification of multiaxis machine tool using laser tracker. *Sci World J* 2014:959510.
- 7- Zheng F, Feng Q, Zhang B et al (2020), A high-precision laser method for directly and quickly measuring 21 geometric motion errors of three linear axes of computer numerical control machine tools. *Int J Adv Manuf Technol*. 109, 1285–1296.
- 8.- Howell LL (2001), *Compliant Mechanisms*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.
- 9.- <https://www.etalonproducts.com/en/> (último acceso el 14/11/2022).



## Anexo 1. INFORME DE SIMULACIÓN Y EXPLICACIÓN MODOS DE VIBRACIÓN.

### Informe de simulación Modos de Vibración

#### Software usado

Solid Edge (220.00.00.104 x64)

Femap (12.0.1b)

#### Solucionador usado

NX Nastran (2019.1)

### 3. Propiedades del estudio

Propiedad del estudio	Valor
Nombre del estudio	Estudio modal 3
Tipo de estudio	Modos normales
Tipo de mallado	Tetraédrico
Solucionador iterativo	Activado
Número de modos	4
Rango de frecuencia	Mínimo: %0 Hz Máximo: 0 Hz
Verificación de geometría de NX Nastran	Activado
Línea de comandos de NX Nastran	
Opciones de estudio de NX Nastran	
Opciones generadas de NX Nastran	
Opciones predeterminadas de NX Nastran	
Opción de sólo resultados de superficie	Activado

### 4. Geometría del estudio

#### 4.1 Sólidos

Nombre del sólido	Material	Masa	Volumen	Peso
Vibración 2 motores (1). par	ABS, alto impacto	0,006 kg	6129,970 mm <sup>3</sup>	61,515 mN

## 5. Propiedades del material

### 5.1 ABS, alto impacto

Propiedad	Valor
Densidad	1024,000 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de expansión térmica	0,0001 /C
Conductividad térmica	0,000 kW/m-C
Calor específico	0,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	2770,000 MPa
Coefficiente de Poisson	0,300
Límite elástico	60,000 MPa
Tensión de rotura	0,000 MPa
% de elongación	0,000

## 7. Restricciones

Nombre de restricción	Tipo de restricción	Grados de libertad
Fijo 1	Fijo	GRADOS DE LIBERTAD DISPONIBLES: Ninguno
Fijo 2	Fijo	GRADOS DE LIBERTAD DISPONIBLES: Ninguno

## 8. Información de mallado

Tipo de mallado	Tetraédrico
Número total de cuerpos mallados	1
Número total de elementos	13.144
Número total de nodos	22.184
Tamaño subjetivo de malla (1-10)	7

## 9. Resultados

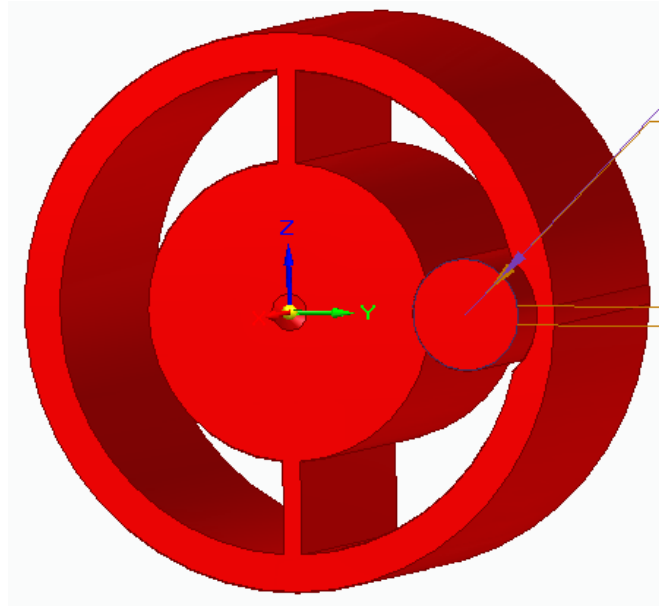
### 9.1 Resultados del desplazamiento

Componente resultante: traslación total				
Extensión	Valor	X	Y	Z
<b>Modo 1, 2,527e+03 Hz</b>				
Mínima	0 mm	-11,667 mm	13,075 mm	-15,134 mm
Máxima	3,92e+04 mm	0,100 mm	13,833 mm	-0,001 mm
<b>Modo 2, 2,866e+03 Hz</b>				
Mínima	0 mm	-11,667 mm	13,075 mm	-15,134 mm
Máxima	1,66e+04 mm	-15,000 mm	0,059 mm	-5,614 mm
<b>Modo 3, 5,260e+03 Hz</b>				
Mínima	0 mm	-11,667 mm	13,075 mm	-15,134 mm
Máxima	4,85e+04 mm	-4,933 mm	13,833 mm	-0,001 mm
<b>Modo 4, 5,577e+03 Hz</b>				
Mínima	0 mm	-11,667 mm	13,075 mm	-15,134 mm
Máxima	2,32e+04 mm	-15,000 mm	-7,955 mm	0,079 mm

## 12. Advertencia

### Información importante

No se debe usar este informe como única medida de la idoneidad de una idea de diseño en unas condiciones ambientales determinadas. Siemens ha realizado todos los esfuerzos posibles para asegurar que sus productos ofrezcan el máximo posible de guía y ayuda. Sin embargo, esto no sustituye al buen criterio de ingeniería, que es siempre responsabilidad del usuario. Un enfoque de ingeniería cualitativa debería asegurar que los resultados de estos cálculos sean evaluados en conjunto con la experiencia práctica de los diseñadores y analistas, y en último caso, con el respaldo de datos de pruebas experimentales. Los resultados contenidos en este informe están considerados fiables, pero no debe considerarse que dan ninguna clase de garantía de validez de propósito.



Captura del Programa Solid Edge del prototipo a simular, donde se puede apreciar los ejes de la simulación.

Un modo de vibración es un patrón o forma característica en el que vibrará un sistema mecánico.

La mayoría de los sistemas tienen muchos modos de vibración y es la tarea del **análisis modal** determinar la forma de esos modos.

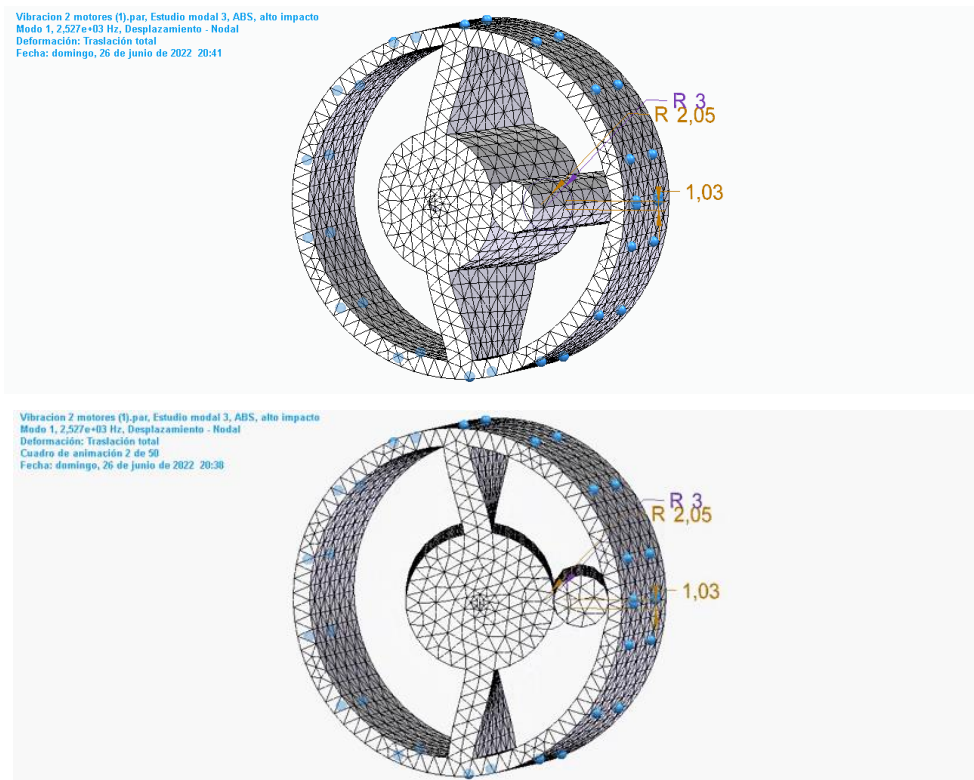
La vibración de una estructura es siempre una combinación o una mezcla de todos los modos de vibración. Pero no todos están excitados al mismo grado.

Por ejemplo, si se toca una campana suavemente, lo primero que se va a oír es el modo fundamental de vibración, pero si se la toca más fuerte, otros modos son excitados y se oyen los parciales superiores del tono.

Tras realizar el análisis modal de este prototipo con el programa Solid Edge, hemos obtenido 4 modos de vibración a diferentes frecuencias.

A continuación, vamos a mostrar imágenes de los 4 modos y se explicarán en qué consiste cada uno de ellos, comentando los giros y desplazamientos que sufre el prototipo.

## Modo 1

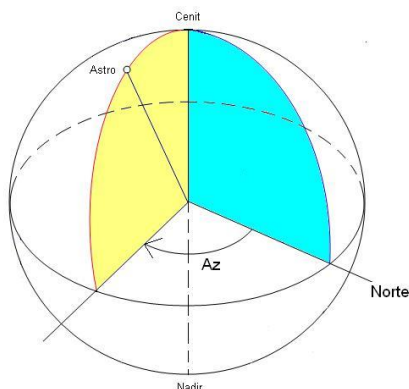


Modo de vibración N°1: Giro en el eje Z ó Giro Azimutal.

El primer modo de vibración que sufre el prototipo es un giro respecto del eje Z, tanto el láser como el motor realizan un giro en el eje Z, con centro en la mitad del prototipo por lo que cuando la parte anterior del prototipo gira a la derecha, la parte posterior, gira a la izquierda, y viceversa.

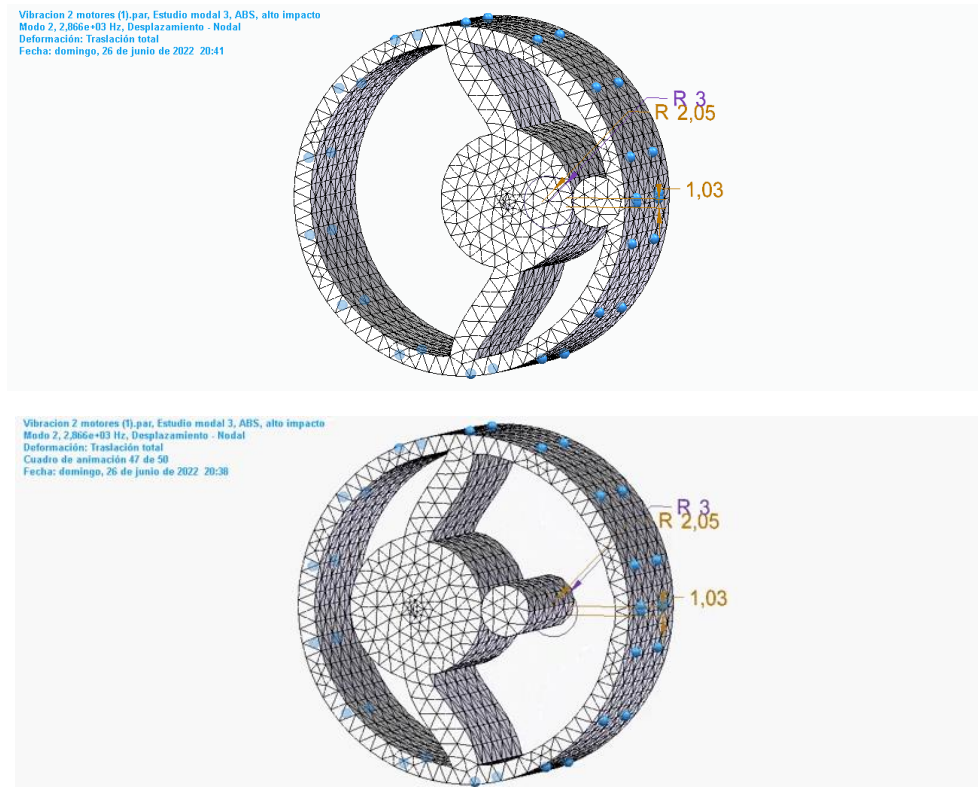
A su vez las láminas superior e inferior, se deforman en su parte próxima al laser de la misma forma comentada anteriormente, y cerca del borde no se deforman ya que el borde del prototipo se encuentra fijo.

Este tipo de giro también es conocido como Giro Azimutal, este tipo de giro es el que realiza el ángulo acimut, también escrito como azimut o más raramente acimud, se refiere a un ángulo de la orientación sobre la superficie de una esfera real o virtual.



El acimut es el ángulo formado entre la dirección de referencia (norte) y una línea entre el observador y un punto de interés previsto en el mismo plano que la dirección de referencia.

## Modo 2

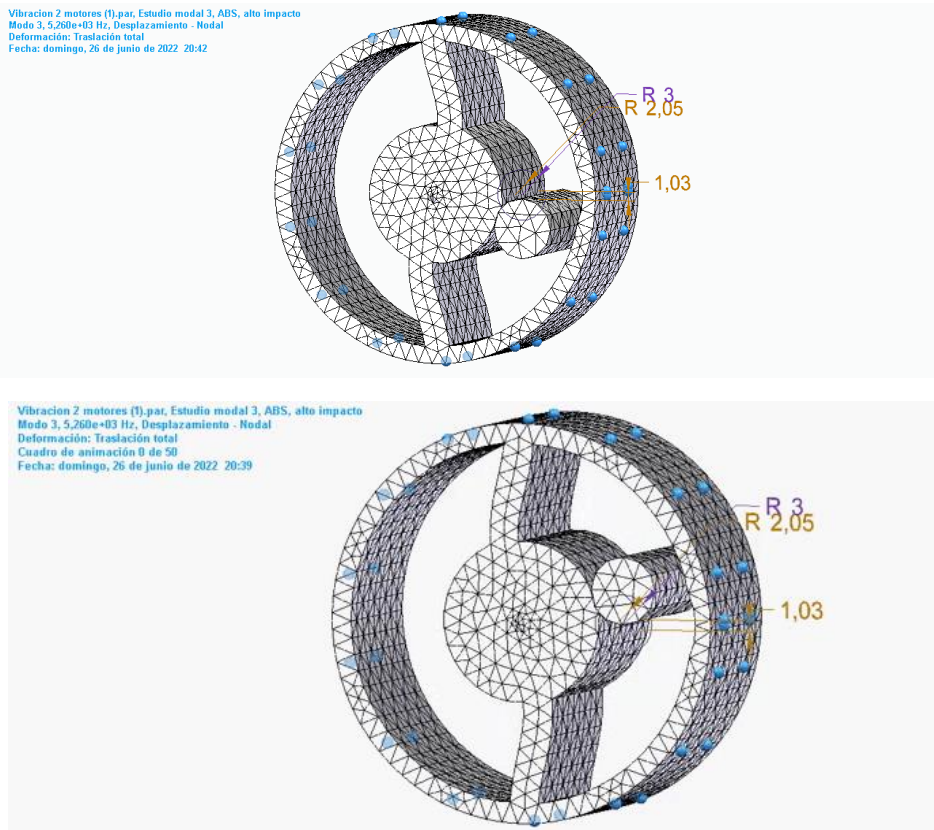


Modo de vibración Nº2: Movimiento sinusoidal en el eje Y.

El segundo modo de vibración que sufre el prototipo no es ningún tipo de giro, sino que se trata de un desplazamiento del láser y el motor en el plano XY, este desplazamiento se podría aproximar a un movimiento senoidal, donde el conjunto láser + motor, se desplaza hacia el lado de las Y's positivas, después vuelve al centro y posteriormente se desplaza hacia las Y's negativas.

Las láminas también se deforman de la misma forma que el láser, siguiendo ese movimiento sinusoidal en los extremos más cercanos al láser.

### Modo 3



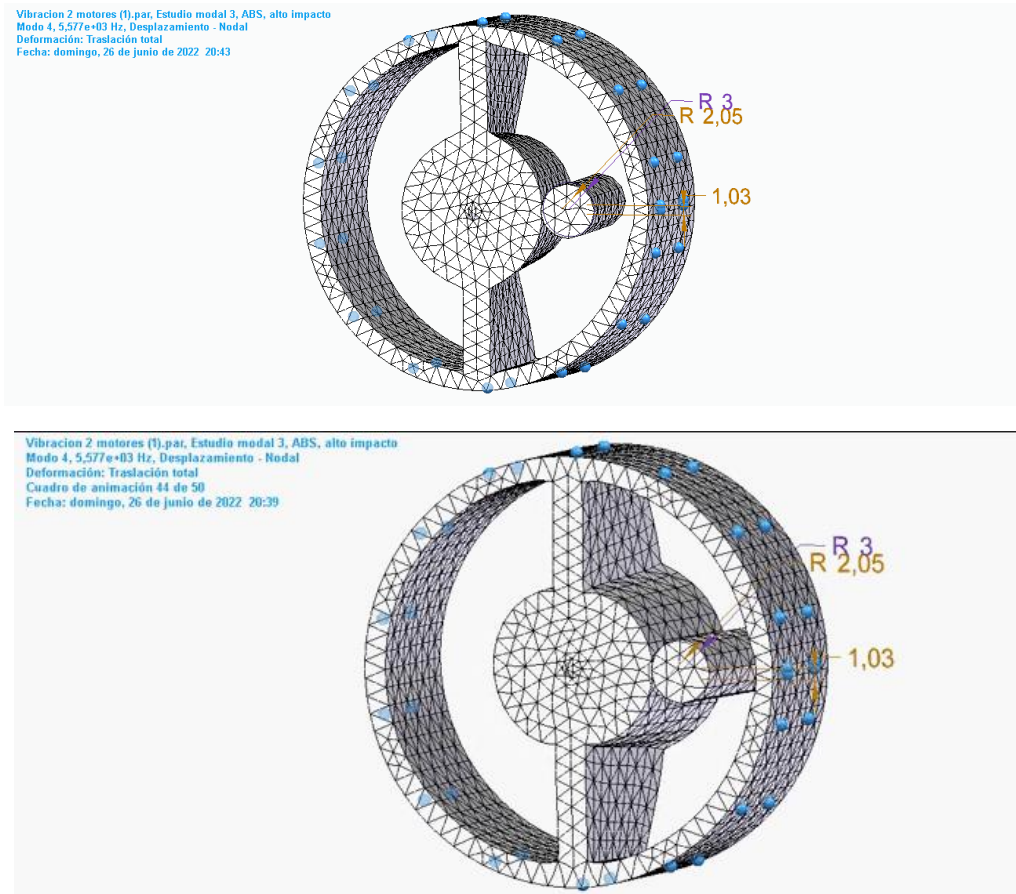
Modo de vibración N.º 3: Giro en el eje X.

El tercer modo de vibración que sufre el prototipo vuelve a ser un giro en uno de los ejes principales, en este caso es el eje X, el eje longitudinal que atraviesa el láser por su centro.

En este tipo de giro, el láser no se desplaza, solo rota en el eje X, en cambio el motor sí que se desplaza ya que se encuentra en la órbita del láser, por lo que describe una trayectoria circular; Cabe destacar que es el único de los 4 modos en el que el centro del láser no se mueve, cosa que no nos interesa nada, ya que buscamos que el láser cambie su trayectoria para que así se reflecte más veces por las paredes del sistema telescópico, para que tras una posible flexión del brazo telescópico, haya más probabilidades de que el láser llegue al reflector final y vuelva revotado, para así poder realizar la medición.

Las láminas se desforman, sufriendo un esfuerzo de tracción, ya que, al girar el láser estira de uno de los extremos de las láminas, aquel extremo que no se encuentra fijo.

## Modo 4



Modo de vibración N.º 4: Movimiento en el eje X.

El cuarto y último modo de vibración que sufre el prototipo consiste en un movimiento o desplazamiento en el eje X, este se podría asimilar como si estiráramos y empujáramos del centro de coordenadas que se encuentra en el centro de la circunferencia que representa el láser.

Este movimiento hace que el láser se balancee hacia delante y hacia detrás, movimiento que tampoco nos interesa, como ya hemos explicado en el Modo 3, ya que no cambia la trayectoria del láser; aunque en este caso sí que se desplace el centro de la circunferencia que representa la punta del láser.

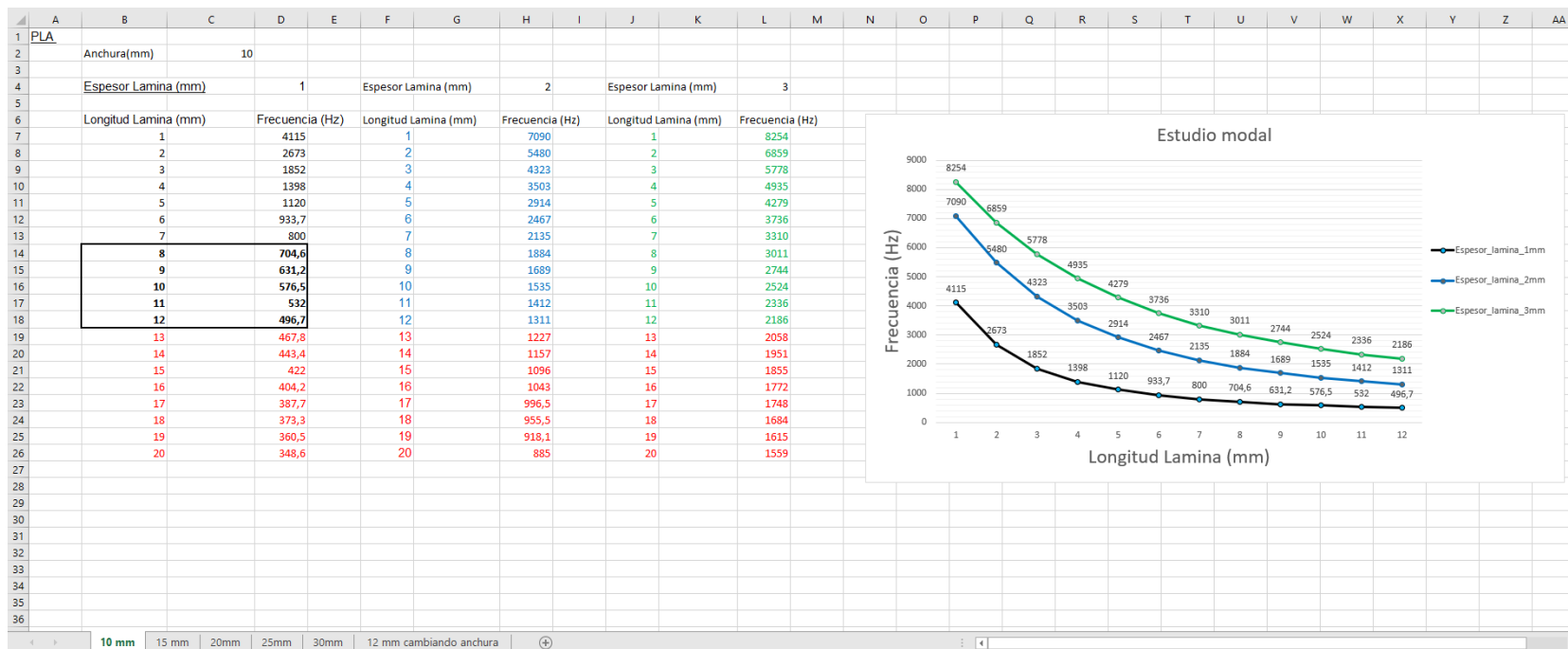
Las láminas en este caso se deforman de la misma manera, cambiando su inclinación, aunque esto no afecte a la trayectoria del láser, ya que la circunferencia que rodea al láser también se deforma.

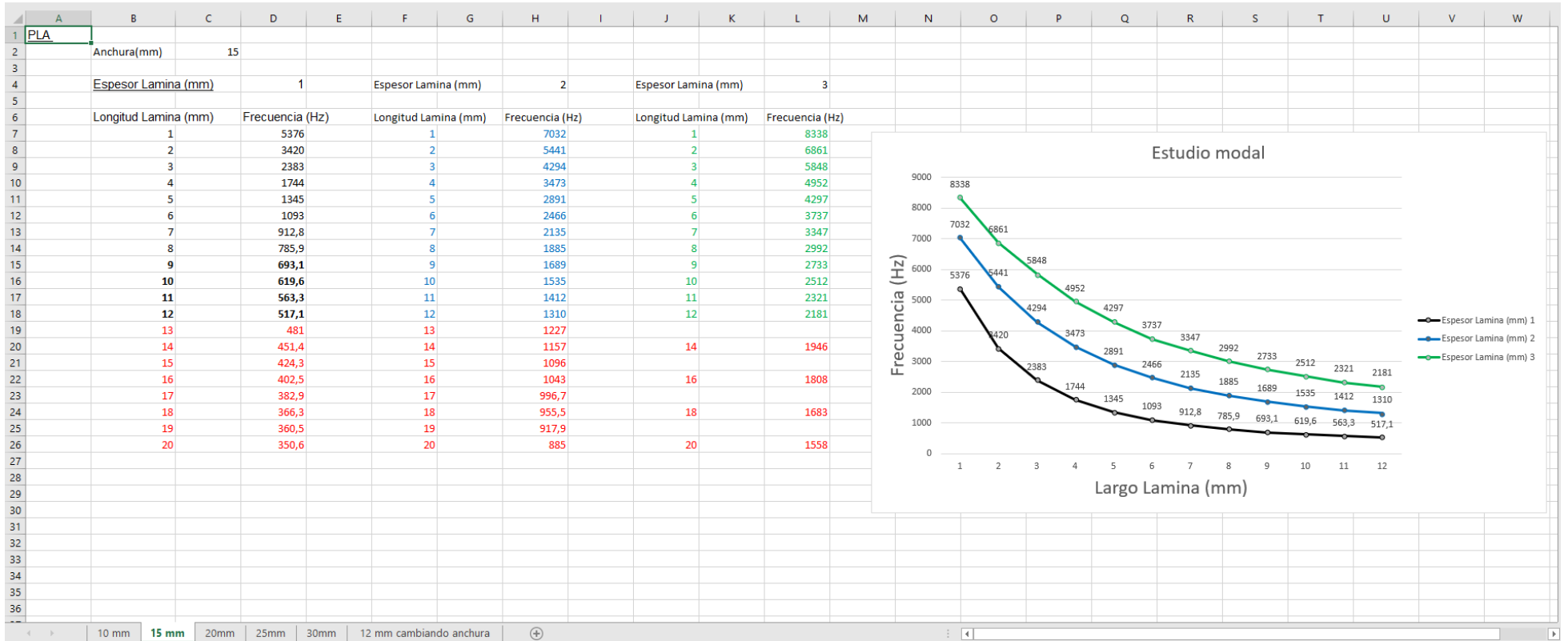
## Anexo 2. Simulación por elementos finitos de las alternativas de diseño estudiadas

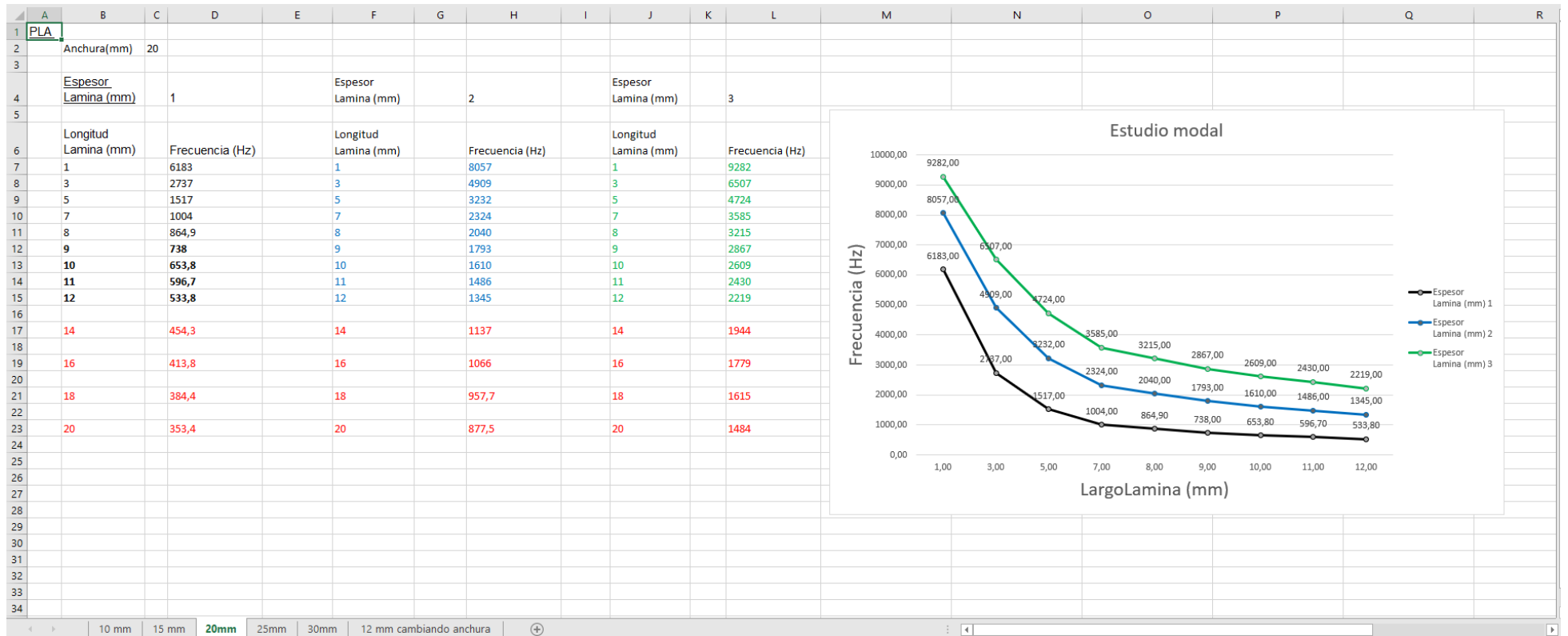
En este anexo se incorporan las simulaciones realizadas para cada prototipo.

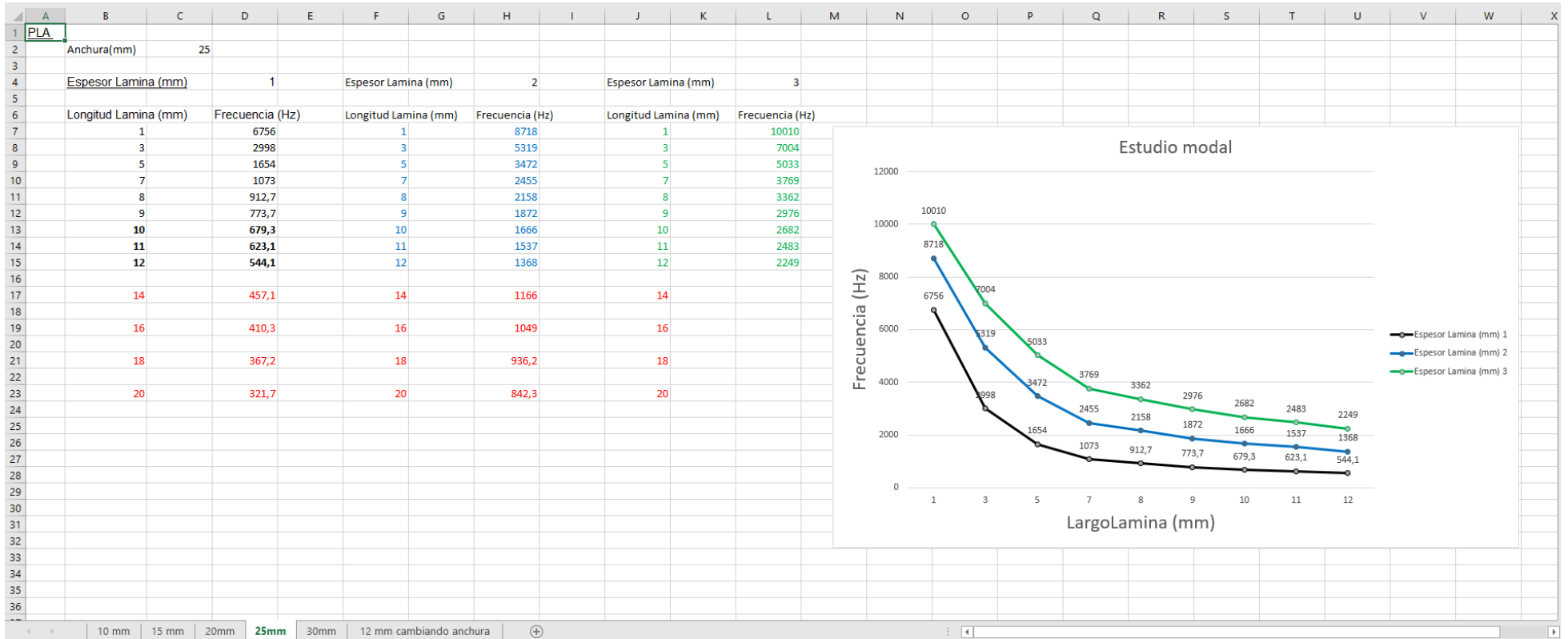
Se ha tratado de mantener un formato similar en forma de tablas, ya que todos los datos se han recogido un formato Excel.

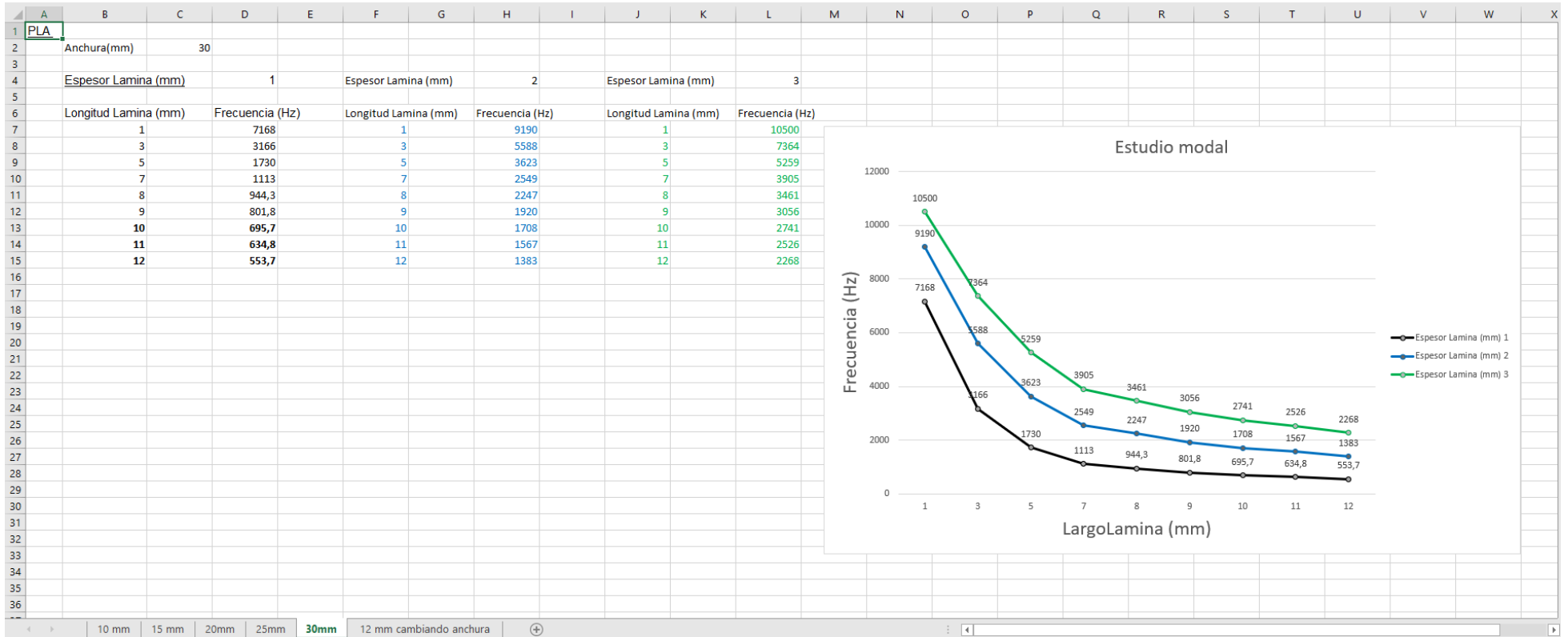
Para el Estudio previo, tenemos tablas con distintas columnas para los diversos espesores, longitudes y sus respectivas frecuencias obtenidas, también se puede observar las gráficas ya dispuestas en el punto 4.1 del documento, además en la parte superior izquierda se indica que material se está simulando. Se puede apreciar que las columnas de datos están coloreadas según el espesor que representan para que así sea más fácil identificar los datos en las gráficas, los datos en rojo representan dimensiones que sobrepasan los límites geométricos del hueco interior del brazo telescópico.



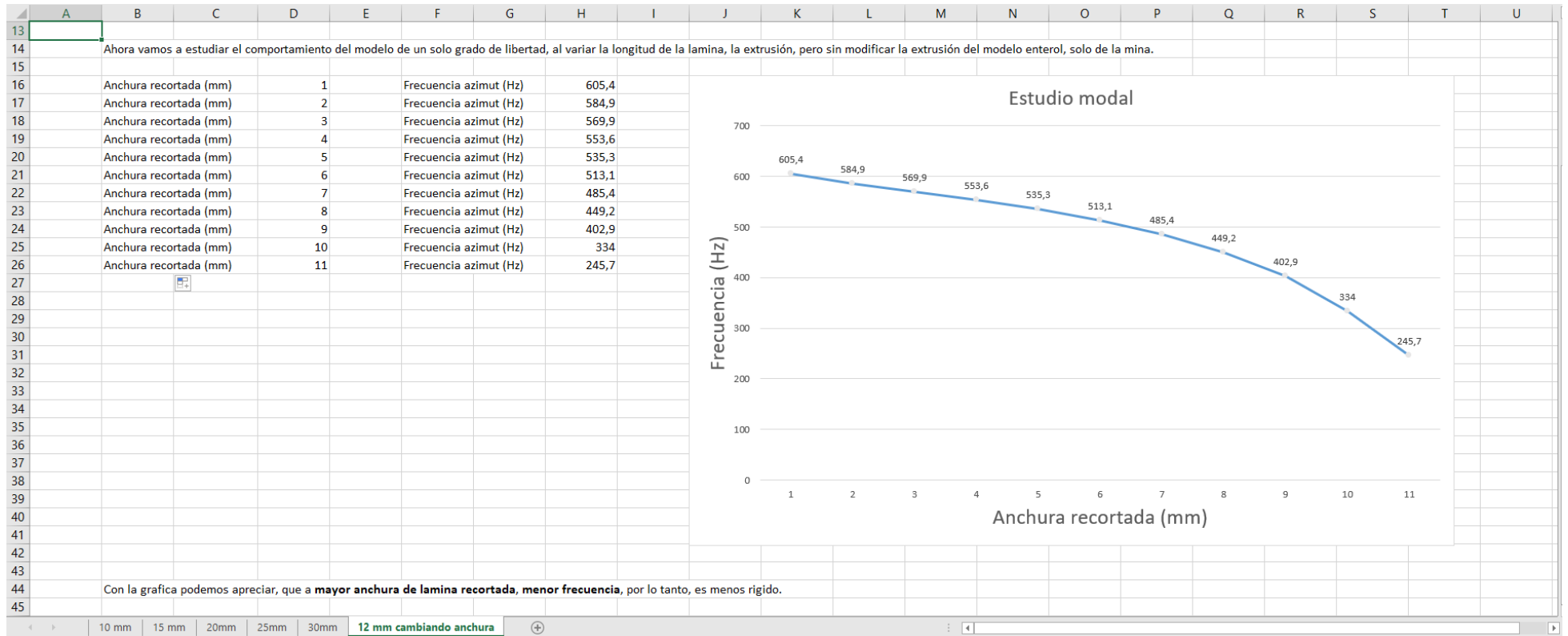




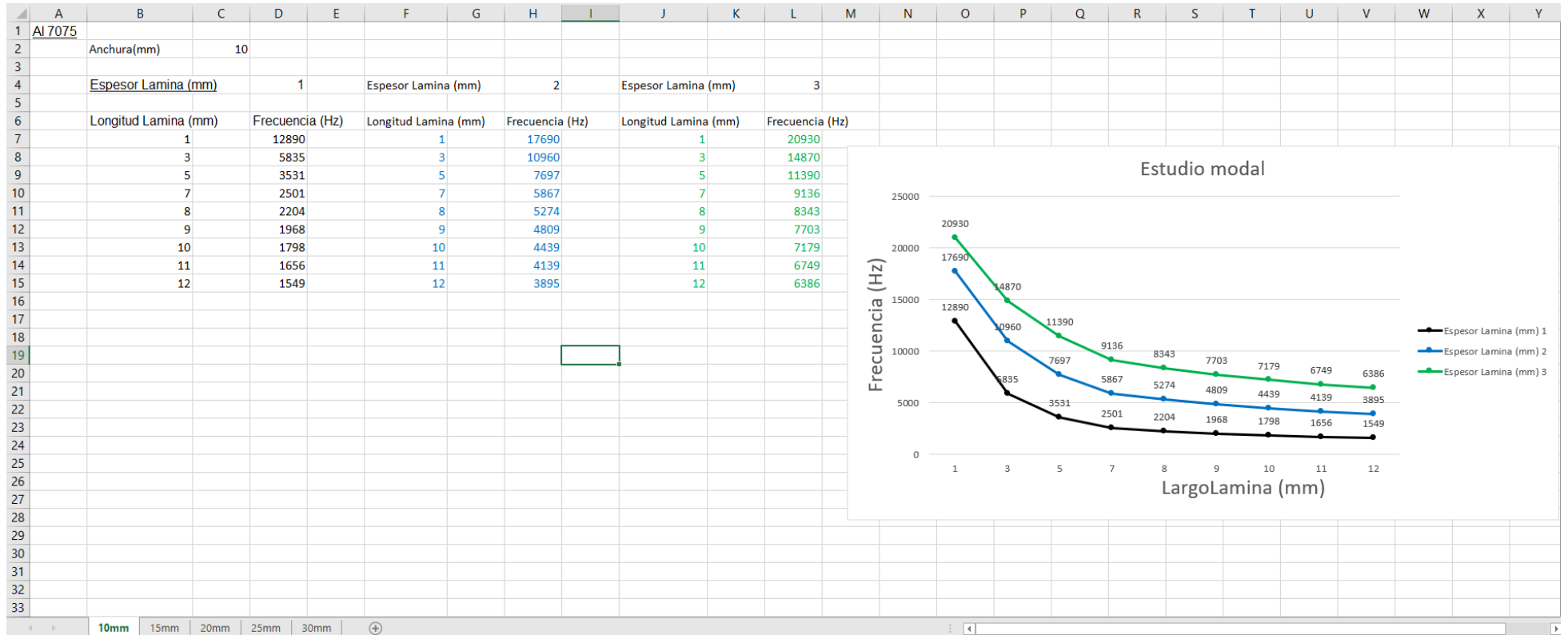


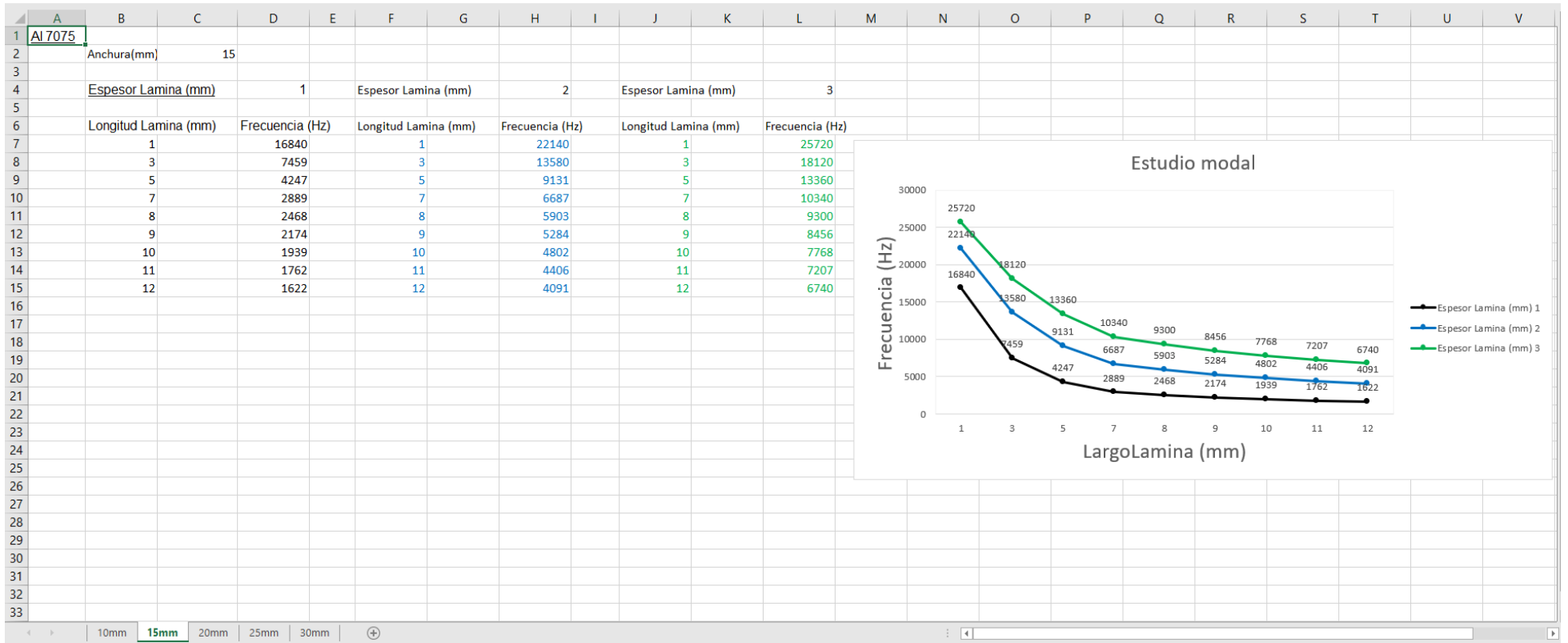


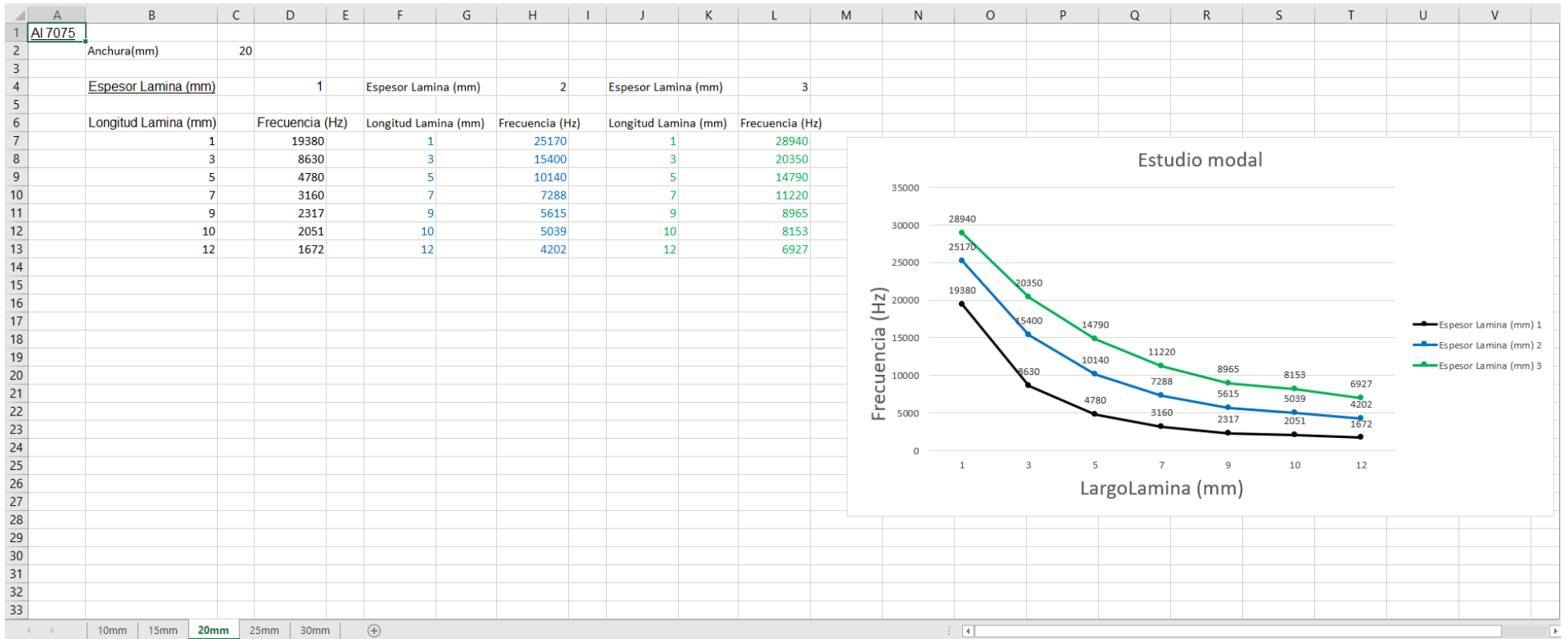
Podemos apreciar que esta grafica es distinta al resto, ya que en este caso se ha simulado la reducción de la anchura de las láminas, tenemos 2 columnas, una que muestra la anchura que se ha recortado respecto de la anchura inicial de 12 mm y las frecuencias que se han obtenido para cada acaso. Para este caso, los parámetros de longitud y espesor se fijaron en 12,86 mm y 1 mm respectivamente.

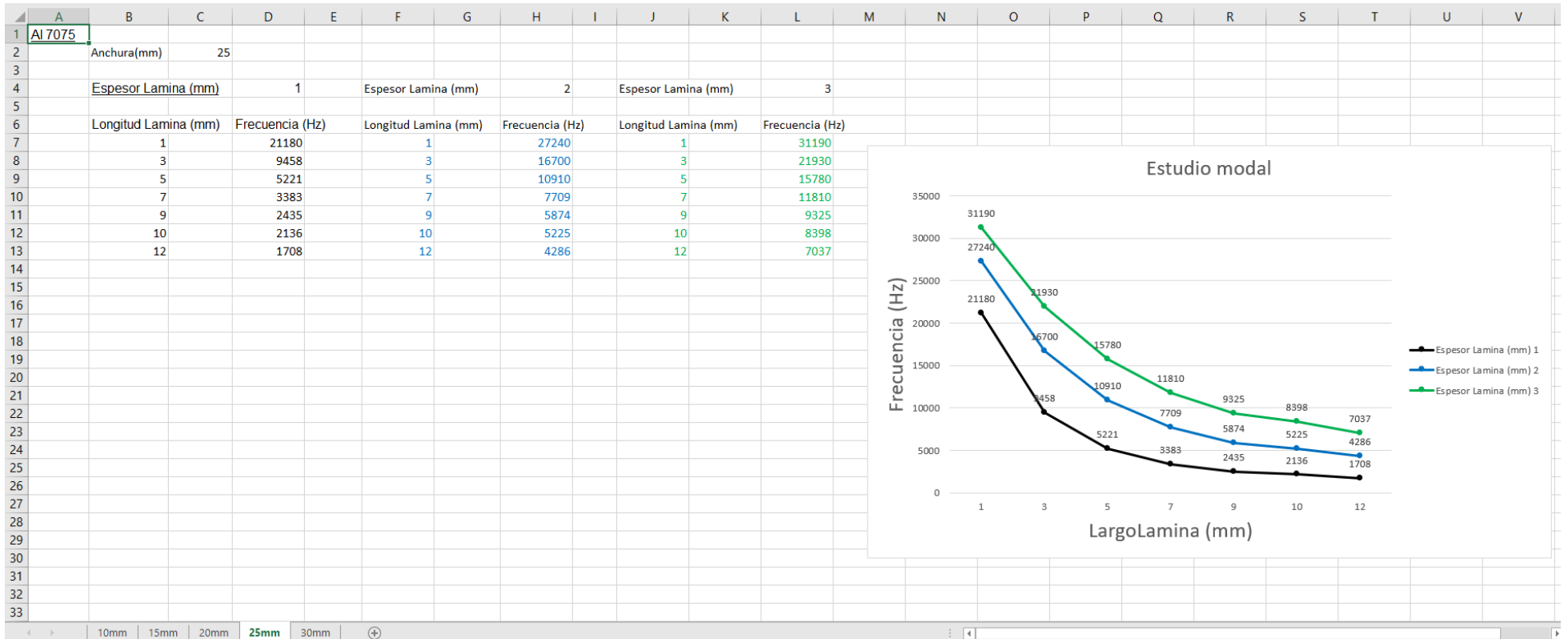


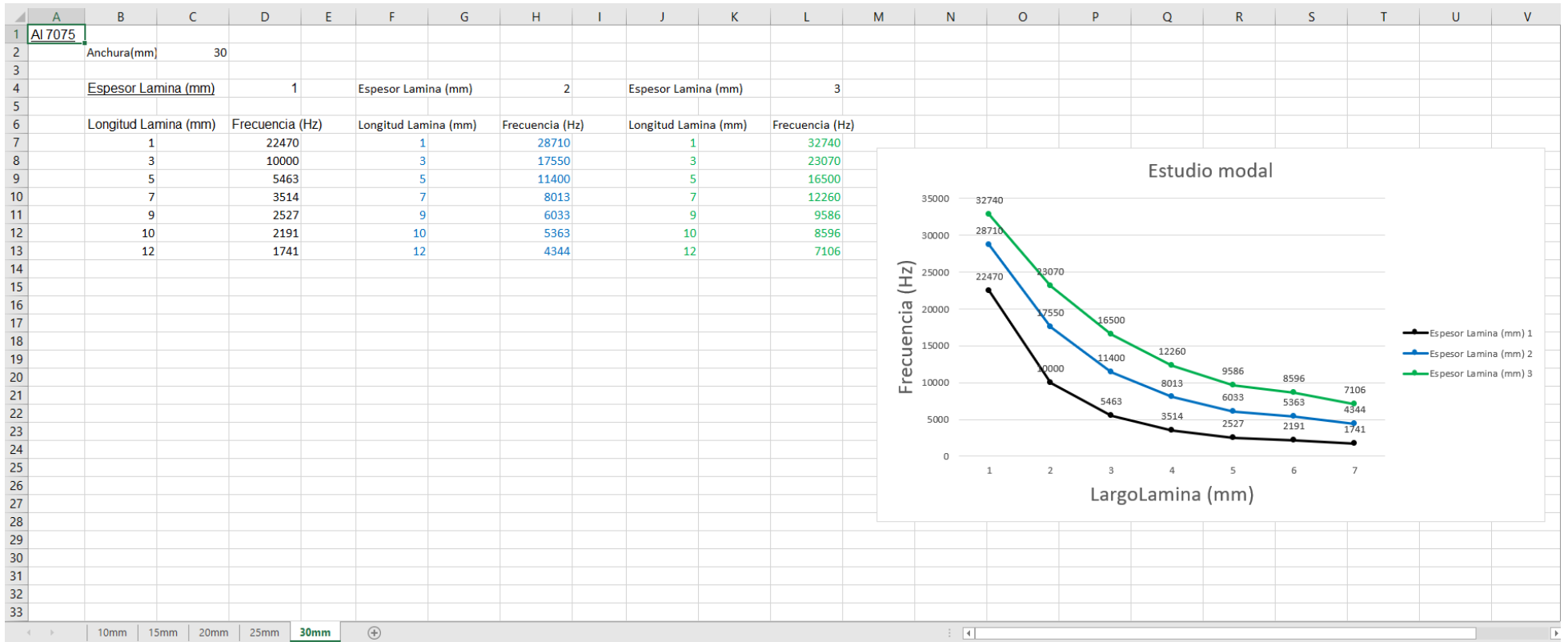
A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones para el material Aluminio 7075











**RESULTADOS SIMULACIONES ANALISIS DE VIBRACIÓN PROTOTIPO 2 GRADOS DE LIBERTAD.**

ANCHURA DE LÁMINA = 12mm

PROTOTIPO 2 GRADOS DE LIBERTAD	
Datos iniciales	mm
Espesor lamina exterior	1
L lamina exterior de 1	7
Espesor circulo intermedio	2
R intermedio exterior	13
R intermedio interior	10,98
Espesor lamina interior	1
L lamina interior	8

Simulaciones iniciales para ver como se comportaba el modelo				TAMAÑO DEL AMALLA = 8	
Nº simulación	ESPEORES	mm	Frecuencia en Azimut (Hz)	Frecuencia en Elevación (Hz)	Diferencia entre frecuencias
1	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	1 1	834,3	407,9	426,4
2	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	1,55 0,84	663,4	704,3	40,9
3	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	1,45 0,84	673,8	641	32,8
4	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	1,65 1,04	877,4	745,9	131,5
5	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	1,55 1,04	877,2	604,1	273,1
6	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	1,65 0,94	778,5	743,8	34,7
7	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	1,63 0,9	721,3	749,3	28
8	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	1,62 0,91	724,4	751,4	27
9	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	1,64 0,92	734,6	761,5	26,9
10	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	1,6 0,92	756,3	718,3	38
11	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	1,62 0,92	758,1	727,3	30,8
12	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	1,63 0,92	759,7	731,3	28,4
13	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	1 0,5	329,1	416,2	87,1
14	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	0,9 0,6	426,2	360	66,2
15	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	0,9 0,5	327,9	364,8	36,9
16	Espesor lamina exterior Espesor lamina interior	0,9 0,53	350,9	369,2	18,3

NO CUMPLE CON LAS CONDICIONES DE MINIMO ESPESOR

ANCHURA DE LÁMINA = 10mm

PROTOTIPO 2 GRADOS DE LIBERTAD

Datos iniciales mm TAMAÑO DE MALLA = 8

Espesor lamina exterior	1
Espesor lamina interior	1

Nº simulación	ESPEORES		Frecuencia en Azimut (Hz)	Frecuencia en Elevación (Hz)	Diferencia entre frecuencias	Nº simulación	ESPEORES		Frecuencia en Azimut (Hz)	Frecuencia en Elevación (Hz)	Diferencia entre frecuencias
1	Espesor lamina exterior	1	814,2	376,5	437,7						
	Espesor lamina interior	1									
2	Espesor lamina exterior	1,32	612,1	535	77,1						
	Espesor lamina interior	0,8									
3	Espesor lamina exterior	1,35	712,1	548,6	163,5	4	Espesor lamina exterior	1,35	661,7	549	112,7
	Espesor lamina interior	0,9					Espesor lamina interior	0,85			
5	Espesor lamina exterior	1,4	642,9	572,9	70	9	Espesor lamina exterior	1,48	664,7	608,3	56,4
	Espesor lamina interior	0,83					Espesor lamina interior	0,85			
6	Espesor lamina exterior	1,6	557	675,8	118,8						
	Espesor lamina interior	0,75									
7	Espesor lamina exterior	1,5	599,7	633,9	34,2	8	Espesor lamina exterior	1,5	613,9	649,1	35,2
	Espesor lamina interior	0,8					Espesor lamina interior	0,83			
10	Espesor lamina exterior	1,5	666	617,2	48,8	11	Espesor lamina exterior	1,51	657,8	619,9	37,9
	Espesor lamina interior	0,85					Espesor lamina interior	0,84			
12	Espesor lamina exterior	1,52	652,9	620,7	32,2	13	Espesor lamina exterior	1,53	617,7	650,5	32,8
	Espesor lamina interior	0,83					Espesor lamina interior	0,82			
14	Espesor lamina exterior	1,54	611,8	651	39,2	15	Espesor lamina exterior	1,53	668,5	629,8	38,7
	Espesor lamina interior	0,81					Espesor lamina interior	0,85			
16	Espesor lamina exterior	1,55	664,4	632,2	32,2	17	Espesor lamina exterior	1,57	630	666,4	36,4
	Espesor lamina interior	0,84					Espesor lamina interior	0,83			
18	Espesor lamina exterior	1,54	662,5	629,9	32,6	19	Espesor lamina exterior	1,54	653,6	619,3	34,3
	Espesor lamina interior	0,84					Espesor lamina interior	0,82			
20	Espesor lamina exterior	1,56	621,4	660,2	38,8						
	Espesor lamina interior	0,82									

ANCHURA DE LÁMINA = 15mm

PROTOTIPO 2 GRADOS DE LIBERTAD

Datos iniciales	mm
Espesor lamina exterior	1
Espesor lamina interior	1

Simulaciones iniciales para ver como se comportaba el modelo TAMANO DE MALLA = 8

Nº simulación	ESPEORES	mm	Frecuencia en Azimut (Hz)	Frecuencia en Elevación (Hz)	Diferencia entre frecuencias
1	Espesor lamina exterior	1	860,9	456,7	404,2
	Espesor lamina interior	1			
2	Espesor lamina exterior	2	858,1	1027	168,9
	Espesor lamina interior	1	Aumentando el espesor exterior, aumenta la frecuencia de elevación		
3	Espesor lamina exterior	1	1771	441,2	1329,8
	Espesor lamina interior	2	Aumentando el espesor interior, aumenta la frecuencia de azimut		
4	Espesor lamina exterior	2	1804	991,5	812,5
	Espesor lamina interior	2			
5	Espesor lamina exterior	3	2493	1470	1023
	Espesor lamina interior	3	Al aumentar el espesor de las laminas, aumenta mucho la frecuencia		
Nº simulación	ESPEORES	mm	Frecuencia en Azimut (Hz)	Frecuencia en Elevación (Hz)	Diferencia entre frecuencias
6	Espesor lamina exterior	0,5	341,8	189	152,8
	Espesor lamina interior	0,5			
7	Espesor lamina exterior	1	341,3	463,8	122,5
	Espesor lamina interior	0,5			
8	Espesor lamina exterior	1,5	861,9	739,4	122,5
	Espesor lamina interior	1			

Nº simulación	ESPEORES	mm	Frecuencia en Azimut (Hz)	Frecuencia en Elevación (Hz)	Diferencia entre frecuencias	Nº simulación	ESPEORES	mm	Frecuencia en Azimut (Hz)	Frecuencia en Elevación (Hz)	Diferencia entre frecuencias
9	Espesor lamina exterior	1,3	754,6	630,9	123,7	10	Espesor lamina exterior	1,3	654,6	626,7	27,9
	Espesor lamina interior	0,9					Espesor lamina interior	0,8			
11	Espesor lamina exterior	1,35	672	646,3	25,7	28	Espesor lamina exterior	1,35	602,6	664,8	62,2
	Espesor lamina interior	0,81					Espesor lamina interior	0,76			
12	Espesor lamina exterior	1,34	661,5	630,3	31,2	13	Espesor lamina exterior	1,34	664,3	637,9	26,4
	Espesor lamina interior	0,79					Espesor lamina interior	0,8			
14	Espesor lamina exterior	1,34	663,1	643,6	25,5	15	Espesor lamina exterior	1,34	684,1	648,1	36
	Espesor lamina interior	0,81					Espesor lamina interior	0,83			
17	Espesor lamina exterior	1,34	703,3	650,5	52,8	26	Espesor lamina exterior	1,34	660,1	621,5	38,6
	Espesor lamina interior	0,85					Espesor lamina interior	0,78			
27	Espesor lamina exterior	1,33	655,8	620,7	35,1	19	Espesor lamina exterior	1,33	667,3	640,7	26,6
	Espesor lamina interior	0,78					Espesor lamina interior	0,81			
16	Espesor lamina exterior	1,32	702,6	641	61,6	22	Espesor lamina exterior	1,32	658,6	633,5	25,1
	Espesor lamina interior	0,85					Espesor lamina interior	0,8			
18	Espesor lamina exterior	1,32	651,5	620	31,5	23	Espesor lamina exterior	1,32	666	636,8	28,2
	Espesor lamina interior	0,78					Espesor lamina interior	0,81			
20	Espesor lamina exterior	1,32	665,8	637,4	28,4	24	Espesor lamina exterior	1,32	673,4	639	34,4
	Espesor lamina interior	0,81					Espesor lamina interior	0,82			
21	Espesor lamina exterior	1,3	662,8	628,5	34,3	25	Espesor lamina exterior	1,31	664,1	633,5	30,6
	Espesor lamina interior	0,81					Espesor lamina interior	0,81			

ANCHURA DE LÁMINA = 20mm

PROTOTIPO 2 GRADOS DE LIBERTAD						
Datos iniciales		mm				
Espesor lamina exterior		1				
Espesor lamina interior		1				
Simulaciones iniciales para ver como se comportaba el modelo			TAMAÑO DE LA MALLA = 8			
Nº simulación	ESPESORES		mm	Frecuencia en Azimut (Hz)	Frecuencia en Elevación (Hz)	Diferencia entre frecuencias
1	Espesor lamina exterior	1		885,1	526,8	358,3
	Espesor lamina interior	1				
2	Espesor lamina exterior	1,32		670,1	743,4	73,3
	Espesor lamina interior	0,8				
3	Espesor lamina exterior	1,4		775	794,1	19,1
	Espesor lamina interior	0,9				
4	Espesor lamina exterior	1,3		616,9	730,8	113,9
	Espesor lamina interior	0,75				
5	Espesor lamina exterior	1,3		886,7	724,8	161,9
	Espesor lamina interior	1				
6	Espesor lamina exterior	1,2		563,8	666,3	102,5
	Espesor lamina interior	0,7				
7	Espesor lamina exterior	1,2		676,9	651,8	25,1
	Espesor lamina interior	0,8				
8	Espesor lamina exterior	1,2		616,5	666,2	49,7
	Espesor lamina interior	0,75				
9	Espesor lamina exterior	1,18		634,9	655,1	20,2
	Espesor lamina interior	0,77				
10	Espesor lamina exterior	1,19		626,4	659,7	33,3
	Espesor lamina interior	0,76				

Para las simulaciones en las que se calcula el giro del láser, cada simulación incorpora dos filas de datos en las que se recogen:

En la parte izquierda (A) se encuentran los parámetros geométricos de las láminas del prototipo estudiado: espesor y anchura.

A continuación, en la parte (B) se indican los dos puntos seleccionados para estudiar los giros buscados del cuerpo central del sistema flexible, junto con sus coordenadas

En la parte central (C) se presentan los giros calculados.

En la parte derecha (D) se muestran algún comentario de la malla.

En la parte derecha (E) se presentan las frecuencias tanto de Azimut y Elevación en Hertzios.

Estos detalles se muestran en la tabla ejemplo de abajo:

Prototipo 3.1 bueno		Punto	Mpa	X	Y	Z	Dx	Dy	Dz	Angulo (mrad)	Angulo (grados)	Comentario	Tamaño de malla	Frecuencia Azimut(Hz)	Frecuencia Elevación(Hz)
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1.63</b>	1	0,000187	-5	0	-5,18E-15	-4,08E-05	-0,0049	-0,00105	0,81	0,05	Azimut	1,48	758,6	730,3
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0.92</b>	2	0,000154	17	0	0,0726	-5,98E-05	0,0129	0,00244	0,16	0,01	Elevación			

Las unidades utilizadas son mm para tamaños y desplazamientos lineales, mrad para los giros, MPa para las tensiones y Hertzios (Hz) para las frecuencias.

**CALCULOS DE GIRO Y FRECUENCIAS EN EL PROTOTIPO 2 GRADOS DE LIBERTAD, DISMINUYENDO LA ANCHURA DE LAMINAS.**

		Punto	Mpa	X	Y	Z	Dx	Dy	Dz	Angulo (mrad)	Angulo (grados)	Frecuencia Azimut(Hz)	Frecuencia Elevación(Hz)
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>2</b>	1	0,00203	-1	0	0	1,31E-05	-0,000523	-0,000236	0,47	0,03 Azimut	715,8	778,3
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,1</b>	2	0,0017	13	0	0,06	4,39E-06	0,0061	0,00141	0,12	0,01 Elevación		
Anchura de las laminas	10,00												
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,9</b>	1	0,002	-1	0	-5,18E-15	2,15E-05	-0,00189	-0,000466	<b>0,86</b>	0,05 Azimut	<b>710,7</b>	<b>740</b>
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,1</b>	2	0,0016	13	0	0,0596	5,33E-06	0,0101	0,00205	0,18	0,01 Elevación		
Anchura de las laminas	10,00												
Con anchura de laminas 10 no se encuentra una solución, ya que para la frecuencia deseada no obtenemos el giro deseado													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>3</b>	1	0,00256	-1	0	0	1,27E-05	-0,00028	-0,000183	0,43	0,02 Azimut	910	960
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,8</b>	2	0,00158	13	0	0,0604	4,18E-06	0,0058	0,00147	0,12	0,01 Elevación		
Anchura de las laminas	8,00												
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>2,3</b>	1	0,00253	-1	0	-5,18E-15	2,15E-05	-0,00192	-0,000471	0,95	0,05 Azimut	675,7	729,3
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,3</b>	2	0,00136	13	0	0,0595	2,71E-06	0,0114	0,0024	0,21	0,01 Elevación		
Anchura de las laminas	8,00												
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>2,3</b>	1	0,00252	-1	0	0	2,01E-05	-0,00139	-0,000472	<b>0,79</b>	0,05 Azimut	<b>741</b>	<b>716,3</b>
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,4</b>	2	0,00135	13	0	0,0598	3,18E-06	0,0097	0,00239	0,20	0,01 Elevación		
Anchura de las laminas	8,00												
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,4</b>	1	0,00212	-1	0	0	8,77E-05	-0,00945	-0,002	3,43	0,20 Azimut	371,5	409,4
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,8</b>	2	0,00164	13	0	0,104	-6,53E-05	0,0386	0,00703	0,64	0,04 Elevación		
Anchura de las laminas	8,00												
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1</b>	1	0,00213	-1	0	0	9,80E-05	-0,00945	-0,00496	3,44	0,20 Azimut	373,4	266,2
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,8</b>	2	0,00158	13	0	0,104	-0,000157	0,0387	0,016	1,50	0,09 Elevación		
Anchura de las laminas	8,00												
Con anchura de laminas 8 no se encuentra una solución, ya que para la frecuencia deseada no obtenemos el giro deseado													

<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,2</b>	1	0,00224	-1	0	0	0,000128	-0,012	-0,00384	4,58	0,26	Azimut	323	293,6
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,8</b>	2	0,00137	13	0	0,104	-0,000163	0,0521	0,014	1,27	0,07	Elevación		
Anchura de las laminas	7,00													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,4</b>	1	0,00224	-1	0	0	0,000124	-0,012	-0,00255	4,59	0,26	Azimut	320,7	358,3
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,8</b>	2	0,00164	13	0	0,104	-0,00012	0,0522	0,00971	0,88	0,05	Elevación		
Anchura de las laminas	7,00													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,3</b>	1	0,00231	-1	0	5,18E-15	0,000124	-0,012	-0,00312	<b>4,59</b>	0,26	Azimut	<b>317,6</b>	<b>330,7</b>
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,8</b>	2	0,00136	13	0	0,105	-0,00014	0,0522	0,0115	1,04	0,06	Elevación		
Anchura de las laminas	7,00													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,41</b>	1	0,00238	-1	-5,18E-15	0	1,29E-04	-0,0109	-0,00282	4,38	0,25	Azimut	324,7	338,9
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,86</b>	2	0,00134	13	-5,18E-15	0,105	-0,000118	0,0504	0,0113	1,01	0,06	Elevación		
Anchura de las laminas	6,50													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,43</b>	1	0,00232	-1	0	-5,18E-15	0,000113	-0,00991	-0,00273	4,07	0,23	Azimut	333,4	346,2
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,88</b>	2	0,00166	13	0	0,105	-0,000112	0,0471	0,011	0,98	0,06	Elevación		
Anchura de las laminas	6,50													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,42</b>	1	0,0025	-1	-5,18E-15	0	0,00012	-0,0103	-0,00278	<b>4,22</b>	0,24	Azimut	<b>329</b>	<b>342,4</b>
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,87</b>	2	0,00134	13	-5,18E-15	0,105	-0,000115	0,0488	0,0111	0,99	0,06	Elevación		
Anchura de las laminas	6,50													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,63</b>	1	0,00241	-1	0	-5,18E-15	0,000116	-0,0102	-0,00216	4,23	0,24	Azimut	329,4	372
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,92</b>	2	0,00147	13	0	0,059	-6,36E-05	0,049	0,00966	0,84	0,05	Elevación		
Anchura de las laminas	6													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,6</b>	1	0,00241	-1	0	5,18E-15	8,52E-05	-0,00752	-0,00227	3,38	0,19	Azimut	371,6	357,8
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1</b>	2	0,00133	13	0	0,104	-9,20E-05	0,0398	0,01	0,88	0,05	Elevación		
Anchura de las laminas	6,00													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,55</b>	1	0,00134	13	-5,18E-15	0,104	-0,000108	0,0455	0,0108	3,88	0,22	Azimut	340,2	353,3
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,95</b>	2	0,00236	-1	-5,18E-15	0	0,000102	-0,00883	-0,00247	0,95	0,05	Elevación		
Anchura de las laminas	6,00													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,5</b>	1	0,0023	-1	0	-5,18E-15	0,00012	-0,0105	-0,0027	4,50	0,26	Azimut	318,8	337,4
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,9</b>	2	0,00153	13	0	0,104	-0,000136	0,0525	0,0116	1,02	0,06	Elevación		
Anchura de las laminas	6,00													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,52</b>	1	0,00237	-1	0	5,18E-15	0,000112	-0,00973	-0,00261	<b>4,23</b>	0,24	Azimut	<b>327,7</b>	<b>343,7</b>
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,92</b>	2	0,00137	13	0	0,104	-0,000125	0,0495	0,0113	0,99	0,06	Elevación		
Anchura de las laminas	6,00													

<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>3</b>	1	0,00284	-1	0	0	1,45E-05	-0,00048	-0,00039	0,61	0,03	Azimut	793,8	722,6
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>2</b>	2	0,00146	13	0	0,0608	-2,10E-06	0,00805	0,00275	0,22	0,01	Elevación		
Anchura de las laminas			6,00											
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>3</b>	1	0,00284	-1	0	0	1,95E-05	-0,00093	-0,00039	<b>0,78</b>	0,04	Azimut	<b>734,4</b>	<b>712,4</b>
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,8</b>	2	0,00147	13	0	0,0604	1,25E-06	0,00997	0,00277	0,23	0,01	Elevación		
Anchura de las laminas			6,00											
Con anchura de laminas entre 7 y 6 no se encuentra una solución, ya que para la frecuencia deseada no obtenemos el giro deseado														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>3</b>	1	0,00306	-1	0	0	3,56E-05	-0,00213	-0,00084	1,66	0,10	Azimut	505,3	486,3
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,8</b>	2	0,00147	13	0	0,0604	-1,77E-05	0,0211	0,00659	0,53	0,03	Elevación		
Anchura de las laminas			4,00											
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>4,5</b>	1	0,00338	-1	0	0	1,62E-05	-0,00037	-0,00028	<b>0,74</b>	0,04	Azimut	<b>697</b>	<b>717</b>
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>2,6</b>	2	0,00135	13	0	0,0572	-3,30E-06	0,01	0,00345	0,27	0,02	Elevación		
Anchura de las laminas			4,00											
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>2</b>	1	0,00266	-1	0	-5,18E-15	7,79E-05	-7,41E-03	-2,29E-03	<b>4,39</b>	0,25	Azimut	<b>313,4</b>	<b>325,7</b>
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,2</b>	2	0,00146	13	0	0,104	-0,00019	0,054	0,0143	1,18	0,07	Elevación		
Anchura de las laminas			4,00											
Con anchura de laminas 4 no se encuentra una solución, ya que para la frecuencia deseada no obtenemos el giro deseado														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>2</b>	1	0,00269	-1	5,18E-15	0,00E+00	0,000209	-1,05E-02	-0,00648	8,54	0,49	Azimut	219,2	167,7
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,5</b>	2	0,00148	13	5,18E-15	7,08E-02	-0,000766	1,09E-01	0,057	4,53	0,26	Elevación		
Anchura de las laminas			2,00											
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>3,63</b>	1	0,00359	-1	-5,18E-15	0	8,77E-06	-0,00227	-0,0022	2,55	0,15	Azimut	394	276,4
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>2,92</b>	2	1,35E-03	13	-5,18E-15	0,0671	-0,000172	0,0335	0,0218	1,71	0,10	Elevación		
Anchura de las laminas			2,00											
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>5</b>	1	0,00339	-1	0	0	4,39E-05	-0,00224	-0,00125	2,43	0,14	Azimut	404,2	354,9
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>3</b>	2	0,00137	13	0	0,0542	-6,52E-05	0,0318	0,0141	1,10	0,06	Elevación		
Anchura de las laminas			2,00											
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>3,5</b>	1	0,00299	-1	0	0	8,51E-05	-4,42E-03	-2,39E-03	<b>4,09</b>	0,23	Azimut	<b>315</b>	<b>268,2</b>
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>2,2</b>	2	0,00142	13	0	0,059	-0,000165	5,28E-02	0,0235	1,85	0,11	Elevación		
Anchura de las laminas			2,00											
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>3,5</b>	1	0,00298	-1	-5,18E-15	0	0,000101	-0,00497	-0,0024	<b>4,47</b>	0,26	Azimut	<b>302,5</b>	<b>268,2</b>
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>2</b>	2	0,00132	13	-5,18E-15	0,0592	-0,000173	0,0576	0,0236	1,86	0,11	Elevación		
Anchura de las laminas			2,00											
Con anchura de laminas 2 no se encuentra una solución, ya que para la frecuencia deseada no obtenemos el giro deseado														

<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>2</b>	1	0,00255	-1	-5,18E-15	-5,18E-15	0,00173	-0,0339	-0,0257	29,70	1,70	Azimut	119,2	78,87
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,7</b>	2	0,00137	13	-5,18E-15	0,0704	-0,00898	0,382	0,266	20,83	1,19	Elevación		
Anchura de las laminas	1,00													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>4</b>	1	0,00342	-1	-5,18E-15	0	0,000227	-0,0106	-0,00974	9,69	0,55	Azimut	203	128,4
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>3,7</b>	2	0,0015	13	-5,18E-15	0,0702	-0,00144	0,125	0,102	7,98	0,46	Elevación		
Anchura de las laminas	1,00													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>5,5</b>	1	0,00354	-1	0	-5,18E-15	0,000146	-0,00783	-0,006	7,33	0,42	Azimut	231,2	163,5
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>4,5</b>	2	0,00137	13	0	0,0607	-0,000716	0,0948	0,0648	5,06	0,29	Elevación		
Anchura de las laminas	1,00													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>8</b>	1	0,00385	-1	0	-5,18E-15	7,34E-06	-0,00481	-0,00313	<b>4,76</b>	0,27	Azimut	<b>280</b>	<b>223</b>
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>6</b>	2	0,00142	13	0	0,07	-0,000405	0,0618	0,0365	2,83	0,16	Elevación		
Anchura de las laminas	1,00													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>8,5</b>	1	0,00372	-1	0	-5,18E-15	-6,67E-05	-4,18E-03	-0,00278	<b>4,22</b>	0,24	Azimut	<b>296</b>	<b>235,5</b>
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>6,5</b>	2	0,00145	13	0	8,16E-02	-0,000446	0,0549	0,0331	2,56	0,15	Elevación		
Anchura de las laminas	1,00													

Con anchura de laminas 1 no se encuentra una solución, ya que para la frecuencia deseada no obtenemos el giro deseado

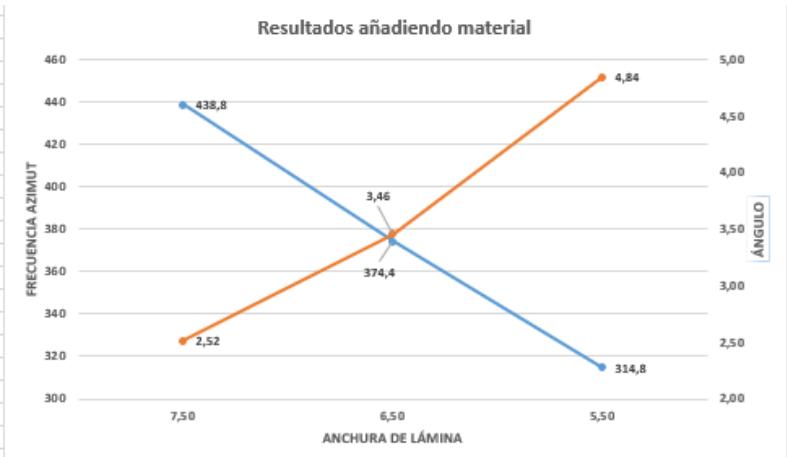
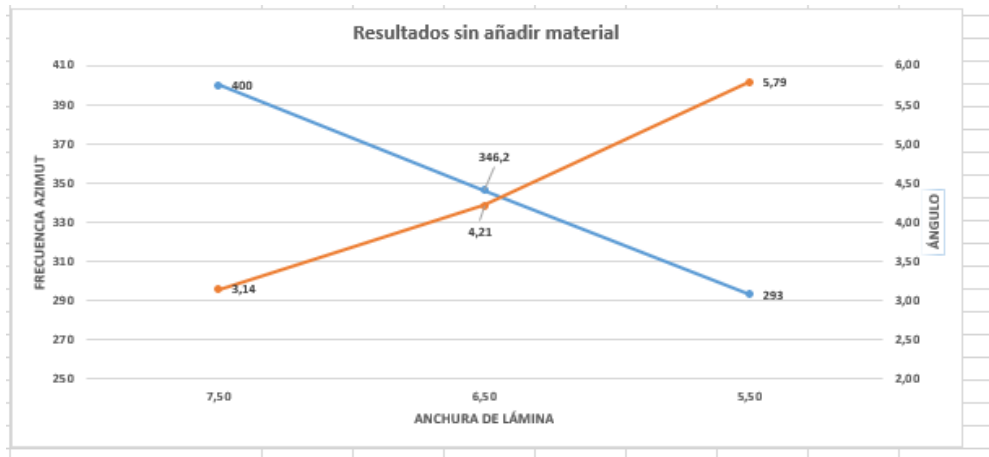
**CALCULOS DE GIRO Y FRECUENCIAS EN EL PROTOTIPO 2 GRADOS DE LIBERTAD, DISMINUYENDO LA LONGITUD DE LAS LÁMINAS AÑADIENDO MATERIAL.**

Todas las simulaciones se han realizado con mallado numero 7 que su tamaño es de 1,48															
Recortando 1 mm, la altura de las laminas, añadiendo material															
		Punto	Mpa	X	Y	Z	Dx	Dy	Dz	Angulo (mrad)	Angulo (grados)		Frecuencia Azimut(Hz)	Frecuencia Elevación(Hz)	
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,42</b>	1	0,00216	-1	-5,18E-15	0	9,19E-05	-0,0092	-0,00243	3,457129084	0,198079	Azimut	374,4	358,4	
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,87</b>	2	0,00136	13	-5,18E-15	0,105	-8,09E-05	0,0392	0,00888	0,807856967	0,046287	Elevación			
Extrusión de las laminas	5,50														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,42</b>	1	0,00216	-1	-5,18E-15	0,00E+00	6,21E-05	-7,05E-03	-0,00188	2,517851822	0,144262	Azimut	438,8	415,7	
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,87</b>	2	0,00147	13	-5,18E-15	1,05E-01	-4,57E-05	2,82E-02	0,00626	0,581428506	0,033313	Elevación			
Extrusión de las laminas	4,50														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,42</b>	1	0,00234	-1	-5,18E-15	0	0,000128	-0,0119	-0,00315	4,842819283	0,277473	Azimut	314,8	303,5	
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,87</b>	2	0,00137	13	-5,18E-15	0,105	-0,00017	0,0559	0,013	1,153570917	0,066095	Elevación			
Extrusión de las laminas	6,50														
Si añadimos mas material, recortando 2 mm la altura de las laminas															
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,42</b>	1	0,00221	-1	-5,18E-15	0	0,000102	-0,0101	-0,00267	3,857123729	0,220997	Azimut	351,2	325,9	
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,87</b>	2	0,0015	13	-5,18E-15	0,105	-0,00011	0,0439	0,0103	0,926428306	0,05308	Elevación			
Extrusión de las laminas	6,50														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,42</b>	1	0,0022	-1	-5,18E-15	0	0,000125	-0,0117	-0,00308	4,657109188	0,266833	Azimut	317,9	296,2	
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,87</b>	2	0,00145	13	-5,18E-15	0,105	-0,00015	0,0535	0,0126	1,119999532	0,064171	Elevación			
Extrusión de las laminas	7,00														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>4,5</b>	1	0,00356	-1	0	0	0,0005	-0,00039	-0,00016	0,579499935	0,033203	Azimut	826,5	736,8	
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>2,6</b>	2	0,00136	13	0	0,105	0,000476	0,00772	0,00272	0,20535714	0,011766	Elevación			
Extrusión de las laminas	8,00														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>2</b>	1	0,00244	-1	0	0	-8,00E-07	-0,00674	-0,00191	3,381415684	0,193741	Azimut	380,2	350,9	
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,2</b>	2	0,00148	13	0	0,105	-0,00018	0,0406	0,0101	0,857856932	0,049152	Elevación			
Extrusión de las laminas	8,00														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>8</b>	1	0,00279	-1	-5,18E-15	-5,18E-15	-8,95E-05	-5,93E-03	-0,00198	5,259237224	0,301332	Azimut	275,4	261,5	
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>4,5</b>	2	0,00137	13	-5,18E-15	1,05E-01	-0,00049	0,0677	0,0228	1,769998152	0,101413	Elevación			
Extrusión de las laminas	11,00														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>9</b>	1	0,0031	-1	0	-5,18E-15	-9,81E-05	-0,00412	-0,00152	3,815695767	0,218623	Azimut	317,6	293,9	
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>5,5</b>	2	0,00132	13	0	0,105	-0,00036	0,0493	0,0182	1,408570497	0,080705	Elevación			
Extrusión de las laminas	11,00														

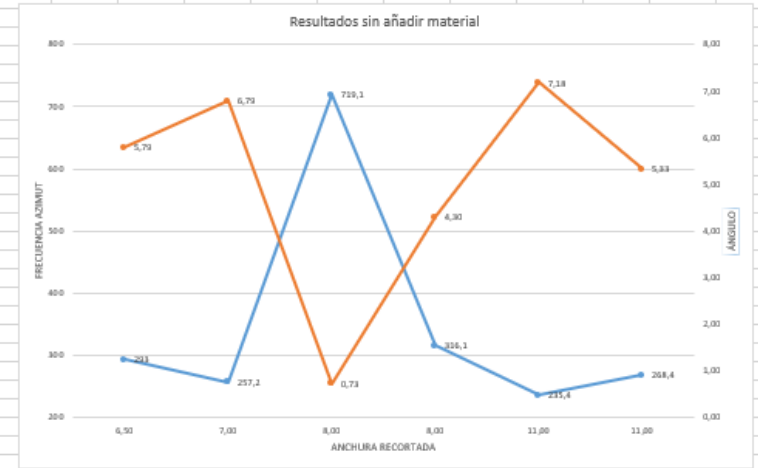
Recortando 4 mm, la altura de las laminas														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>2,3</b>	1	0,0018	-1	0	0	-2,62E-05	-0,0189	-0,00902	14,70608261	0,842596	Azimut	169,1	110,3
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,7</b>	2	0,00157	13	0	0,105	-0,00259	0,187	0,087	6,858463889	0,392961	Elevación		
Extrusión de las laminas	11,00													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>8</b>	1	0,00293	-1	0	0	-9,19E-05	-0,00177	-0,000764	1,869283537	0,107102	Azimut	443,9	355,3
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>6</b>	2	0,00156	13	0	0,105	-0,000199	0,0244	0,00986	0,758856997	0,043479	Elevación		
Extrusión de las laminas	11,00													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,42</b>	1	0,002	-1	0	0	8,79E-06	-0,0102	-0,00254	4,171404376	0,239004	Azimut	338,6	293
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,87</b>	2	0,00171	13	0	0,105	-0,000221	0,0482	0,0111	0,974285406	0,055822	Elevación		
Extrusión de las laminas	8,00													
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,9</b>	1	0,0021	-1	0	0	4,40E-06	-1,03E-02	-2,10E-03	5,007101012	0,286886	Azimut	303,5	290,4
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1</b>	2	0,00152	13	0	0,105	-0,000282	0,0598	0,0118	0,992856817	0,056887	Elevación		
Extrusión de las laminas	9,00													

**GRÁFICAS COMPARATIVAS ENTRE LA MODIFICACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA ANCHURA Y LA MODIFICACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE LAS LÁMINAS.**

SIN AÑADIR MATERIAL VS AÑADIENDO	Punto	Mpa	X	Y	Z	Dx	Dy	Dz	Angulo (mrad)	Angulo (grados)	Frecuencia Azimut(Hz)	Frecuencia Elevación(Hz)	
<b>Espesor_lamina_exterior</b> 1,42	1	0,00233	-1	0	0	8,46E-05	-8,20E-03	-0,00218	3,14	0,180072	Azimut	400	384,4
<b>Espesor_lamina_interior</b> 0,87	2	0,00138	13	0	0,105	-6,43E-05	3,58E-02	0,00797	0,724999873	0,041539	Elevación		
Anchura de las laminas			7,50										
<b>Espesor_lamina_exterior</b> 1,42	1	0,00232	-1	0	0	0,000121	-0,0103	-0,00278	4,21	0,241453	Azimut	346,2	331,9
<b>Espesor_lamina_interior</b> 0,87	2	0,00142	13	0	0,105	-0,00012	0,0487	0,0111	0,991428247	0,056805	Elevación		
Anchura de las laminas			6,50										
<b>Espesor_lamina_exterior</b> 1,42	1	0,00246	-1	-5,18E-15	0,00E+00	0,000169	-0,013	-0,00355	5,79	0,331903	Azimut	293	280
<b>Espesor_lamina_interior</b> 0,87	2	0,00145	13	-5,18E-15	1,05E-01	-0,00023	0,0681	0,016	1,396427664	0,080009	Elevación		
Anchura de las laminas			5,50										
<b>Recortando 1 mm de la altura de las laminas, añadiendo material</b>													
<b>Espesor_lamina_exterior</b> 1,42	1	0,00216	-1	-5,18E-15	0,00E+00	6,21E-05	-7,05E-03	-0,00188	2,52	0,144262	Azimut	438,8	415,7
<b>Espesor_lamina_interior</b> 0,87	2	0,00147	13	-5,18E-15	1,05E-01	-4,57E-05	2,82E-02	0,00626	0,581428506	0,033313	Elevación		
Anchura de las laminas			7,50										
<b>Espesor_lamina_exterior</b> 1,42	1	0,00216	-1	-5,18E-15	0	9,19E-05	-0,0092	-0,00243	3,46	0,198079	Azimut	374,4	358,4
<b>Espesor_lamina_interior</b> 0,87	2	0,00136	13	-5,18E-15	0,105	-8,09E-05	0,0392	0,00888	0,807856367	0,046287	Elevación		
Anchura de las laminas			6,50										
<b>Espesor_lamina_exterior</b> 1,42	1	0,00234	-1	-5,18E-15	0	0,000128	-0,0119	-0,00315	4,84	0,277473	Azimut	314,8	303,5
<b>Espesor_lamina_interior</b> 0,87	2	0,00137	13	-5,18E-15	0,105	-0,00017	0,0559	0,013	1,153570917	0,066095	Elevación		
Anchura de las laminas			5,50										

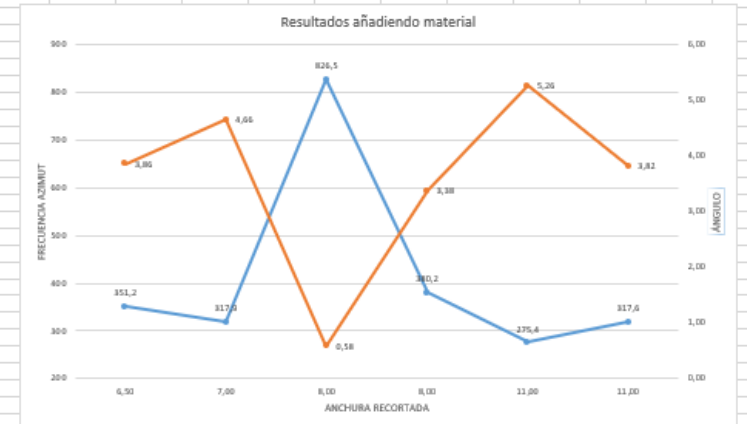


<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,42</b>	1	0,00246	-1	-5,18E-15	0,00E+00	0,00017	-0,013	-0,00355	5,79	0,3319	Azimet	293	280
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,87</b>	2	0,00145	13	-5,18E-15	1,05E-01	-0,00023	0,0681	0,016	1,396427664	0,08001	Elevación		
Extrusión de las laminas 6,50														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,42</b>	1	0,00279	-1	0	0,00E+00	0,00013	-0,014	-0,00394	6,79	0,38879	Azimet	257,2	263,9
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,87</b>	2	0,00164	13	0	1,46E-01	-0,0004	0,081	0,0191	1,6457128	0,09429	Elevación		
Extrusión de las laminas 7,00														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>4,5</b>	1	0,00341	-1	0	0	-2,62E-05	-0,00013	-0,00029	0,73	0,04187	Azimet	719,1	698,9
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>2,6</b>	2	0,00144	13	0	0,142	-6,84E-05	0,0101	0,00342	0,265214279	0,0152	Elevación		
Extrusión de las laminas 8,00														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>2</b>	1	0,00275	-1	0	0	6,34E-05	-6,83E-03	-0,00227	4,30	0,24649	Azimet	316,1	328
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,2</b>	2	0,00148	13	0	0,139	-0,00023	0,0534	0,0142	1,176428029	0,0674	Elevación		
Extrusión de las laminas 8,00														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>8</b>	1	0,00338	-1	0	0,00E+00	-2,81E-04	-7,59E-03	-3,28E-03	7,18	0,41125	Azimet	235,4	222,9
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>4,5</b>	2	0,00148	13	0	1,50E-01	-1,14E-03	0,0929	0,0378	2,394277293	0,16812	Elevación		
Extrusión de las laminas 11,00														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>9</b>	1	0,0036	-1	0	0	-2,37E-04	-5,48E-03	-0,00258	5,33	0,30522	Azimet	268,4	248,6
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>5,5</b>	2	0,00147	13	0	0,156	-0,00091	0,0691	0,0308	2,384281196	0,13661	Elevación		
Extrusión de las laminas 11,00														

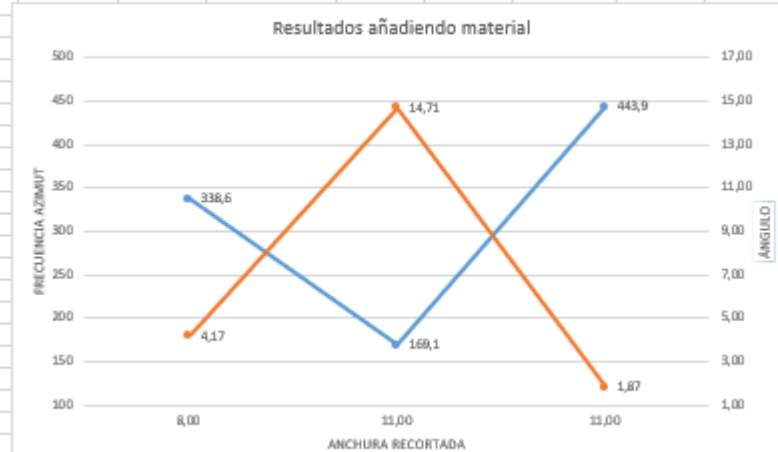
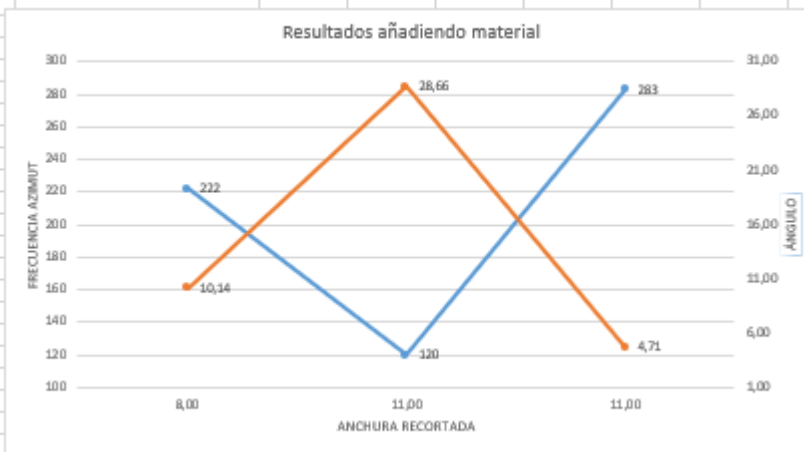


**Recortado 2 mm de la altera de las laminas**

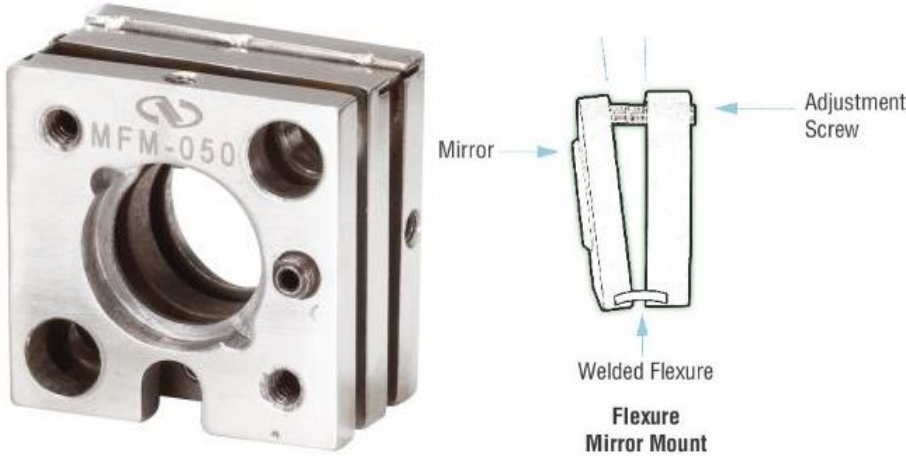
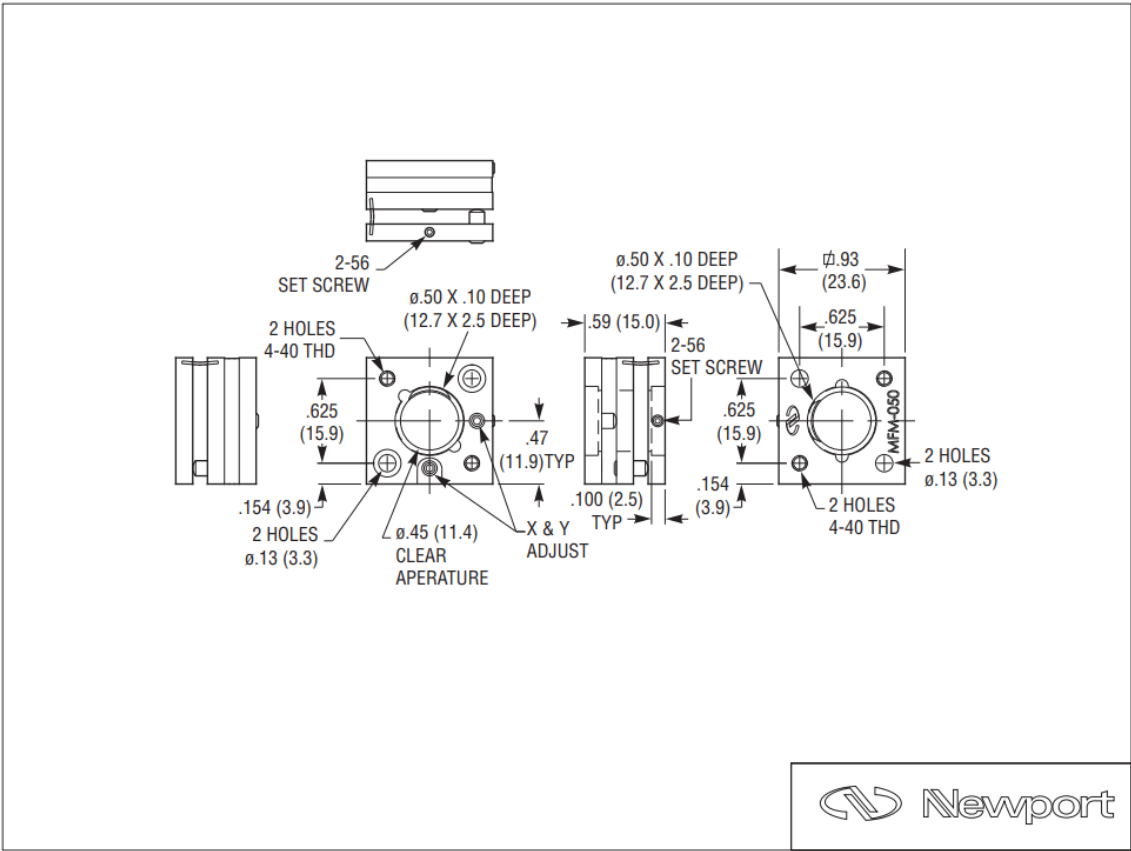
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,42</b>	1	0,00221	-1	-5,18E-15	0	0,0001	-0,0101	-0,00267	3,86	0,221	Azimet	351,2	325,9
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,87</b>	2	0,0015	13	-5,18E-15	0,105	-0,00011	0,0439	0,0103	0,926428306	0,05308	Elevación		
Extrusión de las laminas 6,50														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>1,42</b>	1	0,0022	-1	-5,18E-15	0	0,00013	-0,0117	-0,00308	4,66	0,26683	Azimet	317,9	296,2
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>0,87</b>	2	0,00145	13	-5,18E-15	0,105	-0,00015	0,0535	0,0126	1,119999532	0,06417	Elevación		
Extrusión de las laminas 7,00														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>4,5</b>	1	0,00356	-1	0	0	0,0005	-0,000393	-0,00016	0,58	0,0332	Azimet	826,5	736,8
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>2,6</b>	2	0,00136	13	0	0,105	0,00048	0,00772	0,00272	0,20535714	0,01177	Elevación		
Extrusión de las laminas 8,00														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>2</b>	1	0,00244	-1	0	0	-8,00E-07	-0,00674	-0,00191	3,38	0,19374	Azimet	380,2	350,9
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>1,2</b>	2	0,00148	13	0	0,105	-0,00018	0,0406	0,0101	0,857856932	0,04915	Elevación		
Extrusión de las laminas 8,00														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>8</b>	1	0,00279	-1	-5,18E-15	-5,18E-15	-8,35E-05	-5,93E-03	-0,00198	5,26	0,30133	Azimet	275,4	261,5
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>4,5</b>	2	0,00137	13	-5,18E-15	1,05E-01	-0,00049	0,0677	0,0228	1,769998152	0,10141	Elevación		
Extrusión de las laminas 11,00														
<b>Espesor lamina exterior</b>	<b>9</b>	1	0,0031	-1	0	-5,18E-15	-9,81E-05	-0,00412	-0,00152	3,82	0,21862	Azimet	317,6	293,9
<b>Espesor lamina interior</b>	<b>5,5</b>	2	0,00132	13	0	0,105	-0,00036	0,0493	0,0182	1,408570497	0,08071	Elevación		
Extrusión de las laminas 11,00														



<b>Espesor_lamina_exterior</b>	<b>1,42</b>	1	0,00245	-1	-5,18E-15	0	3,29E-04	-1,89E-02	-5,35E-03	10,14	0,58071	Azimut	222	210,5
<b>Espesor_lamina_interior</b>	<b>0,87</b>	2	0,00133	13	-5,18E-15	0,105	-0,0007	0,123	0,0304	2,553565878	0,14631	Elevación		
Extrusión de las laminas			8,00											
<b>Espesor_lamina_exterior</b>	<b>2,3</b>	1	0,00246	-1	0	-5,18E-15	1,19E-03	-0,0324	-0,0213	28,66	1,6423	Azimut	120	87,81
<b>Espesor_lamina_interior</b>	<b>1,7</b>	2	0,00148	13	0	1,06E-01	-0,00847	0,363	0,22	17,23400785	0,38744	Elevación		
Extrusión de las laminas			11,00											
<b>Espesor_lamina_exterior</b>	<b>8</b>	1	0,00374	-1	0	0	-2,29E-04	-4,70E-03	-3,11E-03	4,71	0,27011	Azimut	283	224,8
<b>Espesor_lamina_interior</b>	<b>6</b>	2	0,00156	13	0	0,125	-7,31E-04	0,0613	0,0361	2,800706363	0,16047	Elevación		
Extrusión de las laminas			11,00											
<b>Recortando 4 mm de la altura de las laminas</b>														
<b>Espesor_lamina_exterior</b>	<b>1,42</b>	1	0,002	-1	0	0	8,79E-06	-0,0102	-0,00254	4,17	0,233	Azimut	338,6	293
<b>Espesor_lamina_interior</b>	<b>0,87</b>	2	0,00171	13	0	0,105	-0,00022	0,0482	0,0111	0,374285406	0,05582	Elevación		
Extrusión de las laminas			8,00											
<b>Espesor_lamina_exterior</b>	<b>2,3</b>	1	0,0018	-1	0	0	-2,62E-05	-0,0183	-0,00302	14,71	0,8426	Azimut	163,1	110,3
<b>Espesor_lamina_interior</b>	<b>1,7</b>	2	0,00157	13	0	0,105	-0,00253	0,187	0,087	6,858463883	0,33236	Elevación		
Extrusión de las laminas			11,00											
<b>Espesor_lamina_exterior</b>	<b>8</b>	1	0,00233	-1	0	0	-3,19E-05	-0,00177	-0,00076	1,87	0,1071	Azimut	443,3	355,3
<b>Espesor_lamina_interior</b>	<b>6</b>	2	0,00156	13	0	0,105	-0,0002	0,0244	0,00386	0,758856337	0,04348	Elevación		
Extrusión de las laminas			11,00											



### Anexo 3. Componentes comerciales



<https://www.newport.com/p/MFM-050>

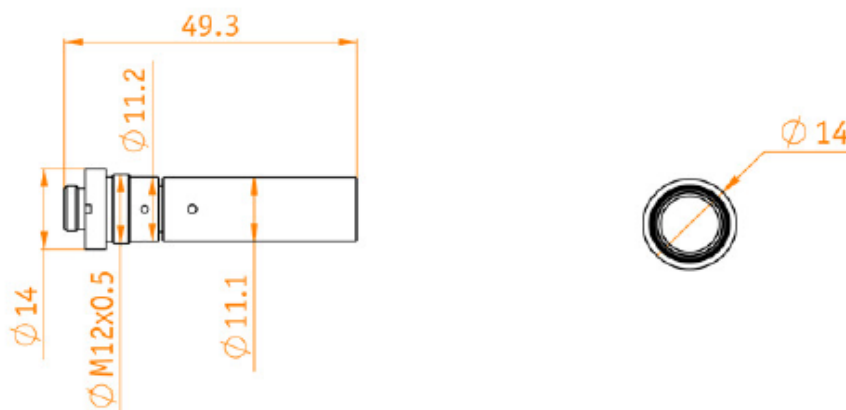
## Sensor Head M12/C7.6

1011396



### Technical Specifications

Sensor Head	
optics type	collimating
dimensions	Ø 14 mm, length 49.3 mm
mounting	metric M12 x 0.5
spot size	7.6 mm
focal length [mm]	infinity
connector	FC/PC
measurement range (target: retroreflector)	0..5000 mm
lateral alignment tolerance (target: retroreflector) [mm]	± 2
alignment tolerance (target : retroreflector) [°]	± 15
Scope of delivery	
number of axes	1
attenuator	Connector, SC/APC, Attenuation: 1dB



All rights, including rights created by patent grant or registration of a utility model or design as well as rights of technical modifications are reserved. Delivery subject to availability. Designations may be trademarks, the use of which by third parties for their own purposes may violate the rights of the trademark owners. © attocube systems AG 2001-2019

<https://www.attocube.com/en/products/laser-displacement-sensor/displacement-measuring-interferometer>

## Overview

The BGR-12.7 Solid Glass Retroreflector is sometimes called a corner cube because the reflecting surfaces are three mutually perpendicular faces, like the corner of a cube. Light entering this 1/2 inch (12.7 mm) retroreflector with 9.5 mm height is reflected back 180°, and parallel to the original beam, regardless of its orientation to the beam. This makes retroreflectors valuable for applications requiring an exact 180° reflection without having to precisely orient the prism, reflected images are both inverted and reversed. The three reflective surfaces are uncoated, relying on total internal reflection (TIR), which gives them limitations at severe angles of incidence. They also must be kept clean for TIR to work properly. Upon request, the reflecting surfaces can be custom coated with protected aluminum on a lot-charge basis to avoid TIR failure.



### Product Series Overview

[Solid Glass Retroreflectors](#)

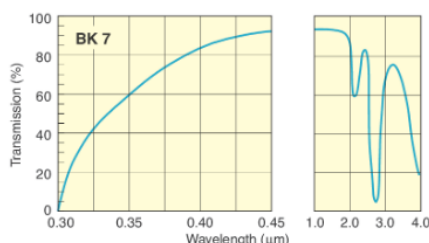
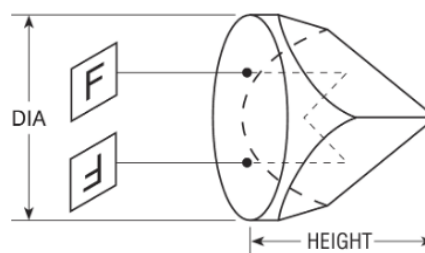
## Technical Specs

Reflected Beam Deviation	180° ±2 arc sec	Clear Aperture	>85% of central face
Diameter	12.7 mm	Size Tolerance	+0/-0.15 mm
Height	9.5 mm	Chamfers	0.1 mm face width
Material	Grade A N-BK7	Chamfers Angle Tolerance	45° ±15°
Surface Quality	40-20 scratch-dig	Cleaning	See <a href="#">How to Clean Optics</a>
Surface Flatness	≤λ/4 at 632.8 nm over the clear aperture		

## Features

### 180° Reflection Regardless of Beam Orientation

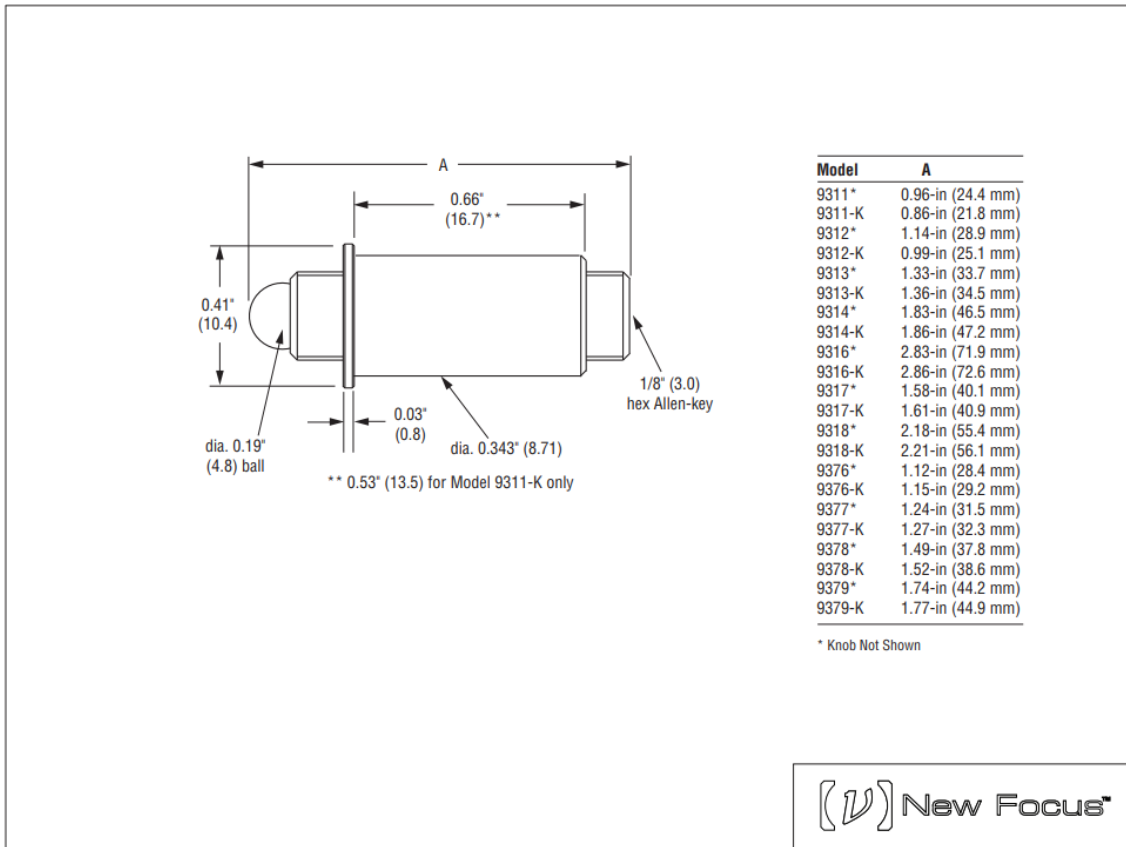
Solid glass retroreflectors are sometimes called corner cubes because the reflecting surfaces are three mutually perpendicular faces, like the corner of a cube. Light entering a retroreflector is reflected back 180°, and parallel to the original beam, regardless of its orientation to the beam. The three reflective surfaces are uncoated, relying on total internal reflection (TIR), which gives them limitations at severe angles of incidence. They also must be kept clean for TIR to work properly.



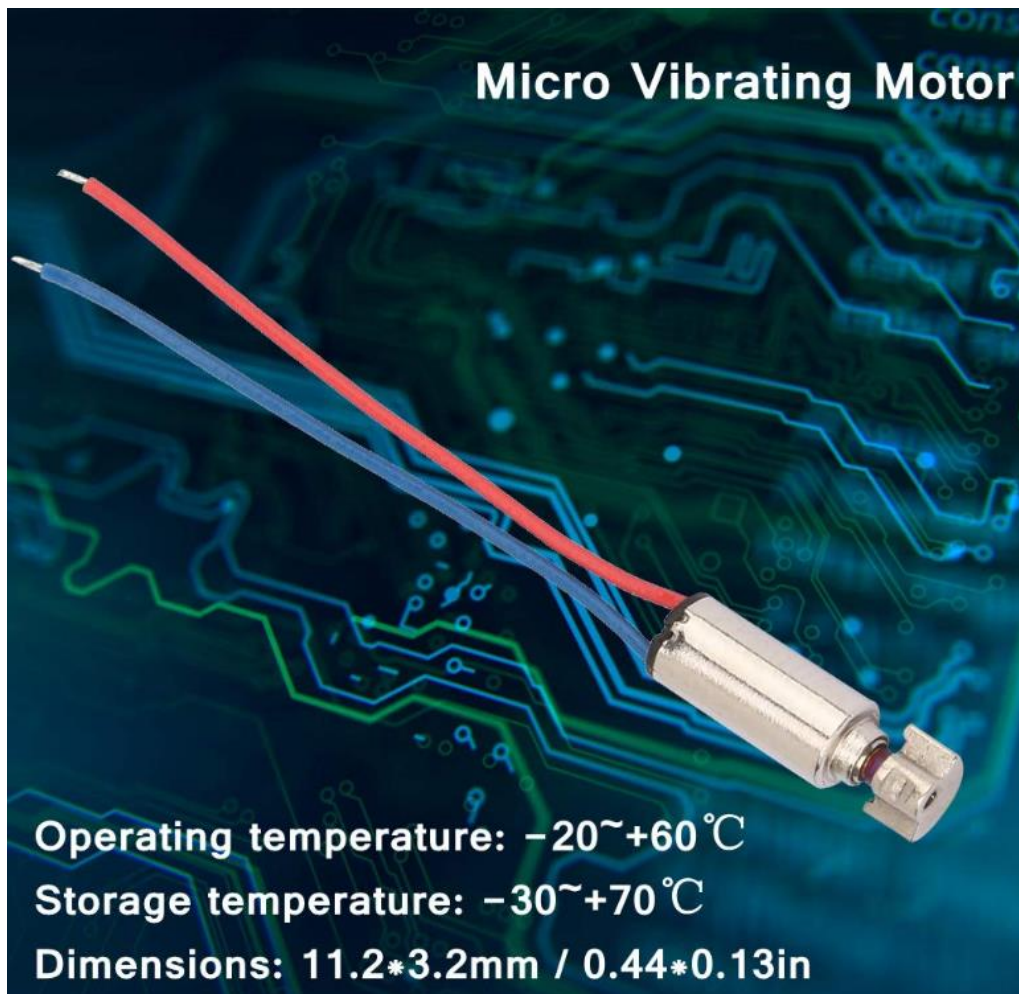
### N-BK7 for VIS and NIR Applications

N-BK7 is an excellent prism material for most visible and near infrared applications. It is the most common borosilicate crown optical glass, and it provides great performance at a good value. Its high homogeneity, low bubble and inclusion content, and straightforward manufacturability make it a good choice for transmissive optics.

<https://www.newport.com/p/BGR-12.7>



<https://www.newport.com/f/thread-matched-adjustment-screws>



[https://www.amazon.es/Vibraci%C3%B3n-El%C3%A9ctrico-Peque%C3%B1o-Potente-Consumo/dp/B07YWTBYCL/ref=pd\\_sbs\\_10/258-8643908-4822600?pd\\_rd\\_w=aSyaz&pf\\_rd\\_p=bead054f-de1a-4d92-98b9-04253f60cdcd&pf\\_rd\\_r=GWPZJF7J4HPCJDN2DZY4&pd\\_rd\\_r=7968a568-2e1d-41a8-ad8f-6102b71e57c9&pd\\_rd\\_wg=M8R4g&pd\\_rd\\_i=B07YWTBYCL&psc=1](https://www.amazon.es/Vibraci%C3%B3n-El%C3%A9ctrico-Peque%C3%B1o-Potente-Consumo/dp/B07YWTBYCL/ref=pd_sbs_10/258-8643908-4822600?pd_rd_w=aSyaz&pf_rd_p=bead054f-de1a-4d92-98b9-04253f60cdcd&pf_rd_r=GWPZJF7J4HPCJDN2DZY4&pd_rd_r=7968a568-2e1d-41a8-ad8f-6102b71e57c9&pd_rd_wg=M8R4g&pd_rd_i=B07YWTBYCL&psc=1)

Dimensiones: 11,2 \* 3,2 mm / 0,44 \* 0,13 pulgadas; Velocidad nominal: 44000 rpm = 733,3 Hz



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe remitirse a [seceina@unizar.es](mailto:seceina@unizar.es) dentro del plazo de depósito)

D./D<sup>a</sup>.

,  
en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de  
11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se  
aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,  
Declaro que el presente Trabajo de Fin de Estudios de la titulación de  
(Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser  
citada debidamente.

Zaragoza,

Fdo: