



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Máster

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE SISTEMAS FLEXIBLES DE MEJORA AERODINÁMICA Y CAPTACIÓN DE ENERGÍA

Alumno/a: Muñoz Hervás, Jose Carlos

Tutor/a: Prof. D. José Ignacio Jiménez González
Dpto.: Departamento de Ingeniería Mecánica y
Minera

Septiembre, 2021



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don José Ignacio Jiménez González, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Estudio experimental de sistemas flexibles de mejora aerodinámica y captación de energía, que presenta Jose Carlos Muñoz Hervás, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2021

El alumno:

El tutor:

JOSE CARLOS MUÑOZ HERVÁS

JOSÉ IGNACIO JIMÉNEZ GONZÁLEZ

Índice

1	Introducción.....	10
1.1	Motivación.....	10
1.2	Objetivos.....	13
1.3	Antecedentes o estado del arte.....	14
1.4	Definición de los piezoeléctricos.....	18
1.5	Lamas flexibles acopladas en cuerpos romos.....	24
2	Descripción del problema.....	26
2.1	Flujo alrededor de cuerpo romo con apéndice flexible.....	26
2.2	Piezoeléctricos.....	29
3	Ensayos y resultados experimentales.....	32
3.1	Circuito electrónico rectificador.....	32
3.2	Ensayos preliminares túnel de viento.....	34
3.3	Ensayos Módulo de elasticidad.....	36
3.3.1	Instalación experimental.....	37
3.3.2	Procedimiento de medida.....	38
3.3.3	Procesado de datos.....	41
3.4	Ensayos completos túnel de viento.....	43
3.4.1	Instalación experimental.....	43
3.4.2	Procedimiento de medida.....	48
3.4.3	Procesado de datos.....	49
3.5	Ensayos de estroboscopia.....	55
3.6	Ensayos Balance de energía.....	56
4	Resultados.....	59
4.1	Módulo de elasticidad.....	59
4.2	Resultados de los Ensayos completos.....	62
4.2.1	Amplitud y frecuencia de la vibración.....	63
4.2.2	Coeficientes de fuerzas.....	66
4.2.3	Tensión piezoeléctricos.....	70
4.3	Estroboscopia.....	73
4.4	Balance de energía.....	75
5	Conclusiones y trabajo futuro.....	78
6	Bibliografía.....	81
7	Anexos.....	83
7.1	carga.m.....	83
7.2	Piezo_laser_fuerza.m.....	85

7.3	general_graf.m	96
7.4	Cargar_datos.m	99
7.5	splines.m.....	106
7.6	pasabaja.m	106
7.7	guardar_fuerzastxt.m	107
7.8	balance_energia.m.....	111

Índice de figuras

Figura 1. Prototipo de sistema de aprovechamiento de energía que se introduce en un flujo de aire [3].....	12
Figura 2. Baldosas de la empresa Pavegen Systems en Westfield Stratford City [5] ...	13
Figura 3. Sistema de recuperación de energía residual del corazón mediante un piezoeléctrico para un marcapasos y encapsulado en tubo blando necesario. [6].....	13
Figura 4. Estructura de una hoja y el prototipo diseñado en [3].....	14
Figura 5. Sistema empleado por Emmanuel Binyet, Chih-Yung Huang, Jen-Yuan (James) Chang en las referencias [7-10]	17
Figura 6. Energía eléctrica recuperada para un Reynolds de 37500 y una velocidad del aire de 10 m/s [12]	18
Figura 7: Piezoeléctrico PVDF LDT1-028K, en forma de viga en voladizo	20
Figura 8: Piezoeléctrico MCFT-27T-4.2AL-127 en forma de diafragma circular	21
Figura 9: Piezoeléctricos entre placas metálicas [16]	21
Figura 10: Piezoeléctricos P-088 en forma de piezoeléctricos apilados	22
Figura 11: Agitador de imanes permanentes LDS V101	23
Figura 12. Esquema del problema e instalación experimental en el túnel de viento. (a) Vista general frontal. (b) Detalle vista de planta.	26
Figura 13. Diodo 1N4004, condensador 100 μF, diodo led verde 2.4 V, diodo led azul 3.4 V y piezoeléctrico de diafragma circular	33
Figura 14. Circuito electrónico realizado. Arriba: esquema del circuito [23]. Debajo: circuito real.....	33
Figura 15. Ensayos realizados con el circuito rectificador	34
Figura 16. Esquema ensayos preliminares en el túnel de viento y montaje real.....	35
Figura 17. Montaje experimental para los ensayos del Módulo de elasticidad.....	37
Figura 18. Lama Negradura y Blancatranslucida.	38
Figura 19. Lamas Blancablanda y Transparente.....	39
Figura 20. Lamas TransparenteSinPiezo y Negrablanda.....	39
Figura 21. (a) Procedimiento de selección de los ejes y (b) Procedimiento de selección de los puntos de la deformada.....	41
Figura 22. Cilindro y ranura. Detalle CAD ranura.	44
Figura 23. Montaje completo del cuerpo y detalle del piezoeléctrico.....	44
Figura 24. Célula de carga y su esquema.....	45
Figura 25. Láser para medir la amplitud y colocación.....	46
Figura 26. Tarjeta de adquisición.....	46
Figura 27. Plataforma rotativa y montaje superior completo.	47

Figura 28. Montaje real completo.....	47
Figura 29. Estroboscopia para la lama # 3.	55
Figura 30. Estroboscopia para la lama # 5.	55
Figura 31. Combinación de modos de vibración en la deformada [9].....	56
Figura 32. Coeficientes βnlc para viga en voladizo [24].....	65
Figura 33. Ensayo estroboscopia lama (a) # 1, (b) # 2, (c) # 3, (d) # 4 y (e) # 5.	73
Figura 34. Lama # 5, deformada en un ciclo.....	74
Figura 35. Esquema de la vibración de la lama aproximada.....	77

Índice de gráficas

Gráfica 1. Ensayos preliminares. (a) Tensión RMS, (b) Tensión pico a pico	35
Gráfica 2. Ejemplo procesado de datos ensayos Módulo de elasticidad	42
Gráfica 3. Ejemplo del cálculo de la amplitud de la vibración	50
Gráfica 4. Ejemplo de cálculo del coeficiente transversal.....	51
Gráfica 5. Gráficas del ajuste de la deformación teórica a la experimental	60
Gráfica 6. PSD para la amplitud de la vibración, av , para $Re = 10073$ (10 Hz) y $Re = 21704$ (20 Hz) para la lama # 5.	64
Gráfica 7. A^* y f^* de la vibración frente al Ca para $Re = 10073$ (10 Hz).	64
Gráfica 8. A^* y f^* de la vibración frente a la K^* para $Re = 10073$ (10 Hz).....	65
Gráfica 9. A^* y f^* de la vibración frente al Ca para $Re = 21704$ (20 Hz).	66
Gráfica 10. A^* y f^* de la vibración frente a la K^* para $Re = 21704$ (20 Hz).....	66
Gráfica 11. PSD de las señales de los coeficientes de arrastre c_x y transversal c_y para $Re = 10073$ (10 Hz), para la lama # 5.	67
Gráfica 12. PSD de las señales de los coeficientes de arrastre c_x y transversal c_y para $Re = 21704$ (20 Hz), para la lama # 5.	67
Gráfica 13. Coeficientes de arrastre C_x y transversal C_y frente al Ca para 10 Hz.....	68
Gráfica 14. Coeficientes de arrastre C_x y transversal C_y frente a la K^* para $Re = 10073$ (10 Hz).	69
Gráfica 15. Coeficientes de arrastre C_x y transversal C_y frente al Ca para $Re = 21704$ (20 Hz).	69
Gráfica 16. Coeficientes de arrastre C_x y transversal C_y frente a la K^* para $Re = 21704$ (20 Hz).	70
Gráfica 17. Tensión RMS y pico a pico frente al Ca a $Re = 10073$ (10 Hz).	70
Gráfica 18. Tensión RMS y pico a pico frente a la K^* a $Re = 10073$ (10 Hz).....	71
Gráfica 19. Gráficas de la tensión RMS y pico a pico frente al Ca a $Re = 21704$ (20 Hz).	71
Gráfica 20. Gráficas de la tensión RMS y pico a pico frente al K^* a $Re = 21704$ (20 Hz).	72

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades de piezoeléctricos cerámicos (PZT) y piezoeléctricos poliméricos (PVDF) [2]	20
Tabla 2. Nomenclatura usada y mediciones realizadas para las lamas.	40
Tabla 3. Total de ensayos completos realizados.	49
Tabla 4. Mediciones realizadas a las lamas.	59
Tabla 5. Propiedades de las lamas sin la corrección (Módulo de elasticidad y rigidez flexural)	61
Tabla 6. Propiedades de las lamas con la corrección (Módulo de elasticidad y rigidez flexural)	61
Tabla 7. Coeficientes adimensionales de las lamas a $Re = 10073$ (10 Hz).	63
Tabla 8. Coeficientes adimensionales de las lamas a $Re = 21704$ (20 Hz).	63
Tabla 9. Potencia eléctrica y del flujo y rendimiento total para $Re = 10073$ (10 Hz).	75
Tabla 10. Potencia eléctrica y del flujo y rendimiento total para $Re = 21704$ (20 Hz).	75
Tabla 11. Coeficientes de la Fórmula 2.3, para la lama # 4.	76
Tabla 12. Potencia eléctrica y mecánica y rendimiento electromecánico, para la lama # 4.	76

Índice de diagramas

Diagrama 1. carga.m (Cálculo de propiedades de las lamas)	42
Diagrama 2. Piezo_laser_fuerza.m (Análisis de las señales del láser, piezoeléctrico y fuerzas)	52
Diagrama 3. general_graf.m (Recopilación y guardado de los resultados globales)	53
Diagrama 4. Cargar_datos.m (Abrir los archivos y variables de datos)	53
Diagrama 5. splines.m y pasabaja.m (Filtrado de las señales y obtener amplitud).....	54
Diagrama 6. guardar_fuerzastxt.m (Convertir de archivos de datos a variables de Matlab)	54
Diagrama 7. Balance_energia.m (Cálculo de los rendimientos total y electromecánico)	58

1 Introducción

El presente trabajo Fin de Máster, se centra en el estudio del efecto de la implementación de lamas flexibles de material plástico en la estela de un cuerpo canónico cilíndrico, así como en la posible generación eléctrica a partir de la vibración producida en dichos elementos flexibles, mediante el acoplamiento de un dispositivo piezoeléctrico.

Por tanto, la investigación, abarca desde el estudio de los distintos materiales piezoeléctricos, así como dispositivos comerciales que los implementan, pasando por el diseño de un circuito eléctrico para la generación de una señal continua, (los dispositivos admitidos usan corriente continua, como elementos de iluminación led), hasta el desarrollo de experimentos y análisis de las fuerzas en un cilindro dentro de un túnel de viento, al que se le incorporan lamas flexibles de material plástico. Uniendo ambas ramas del trabajo, o sea, adhiriendo los piezoeléctricos a las lamas flexibles, se va a poder adquirir la información de generación de energía eléctrica.

En este apartado de introducción, se comenzará explicando la justificación del problema estudiado, motivando cada una de las variantes o partes del trabajo realizadas, continuando por expresar los objetivos que se pretenden conseguir y una descripción de las investigaciones y estudios que existen sobre el tema hasta el momento, terminando con una descripción teórica tanto de la piezoelectricidad, como de la colocación de lamas flexibles en la estela de cuerpos romos.

1.1 Motivación

Todo este proyecto se podría dividir en dos ramas, estudio y uso de piezoeléctricos y mejora aerodinámica de los cuerpos mediante lamas flexibles, que se unirían en la realización de experimentos en el laboratorio. Es por ello que debemos explicar la motivación que ha llevado a realizar este trabajo en cada uno de sus ámbitos. Los piezoeléctricos son un tipo de sistemas de recuperación de energía residual, cuyas características se desarrollarán en posteriores apartados.

En primer lugar, el uso de sistemas de aprovechamiento de energía residual es una herramienta en clave de actualidad, cada día surgen nuevas fuentes de energía menos contaminantes al mismo tiempo que aparecen legislaciones y normas

perjudicando a las fuentes de energía convencionales, que conducen al planeta a un deterioro máximo a través del cambio climático. Por este motivo, la posibilidad de aplicar el ciclo del reciclaje a la energía es algo extraordinario. Con este trabajo se pretende reducir las fuerzas sobre un cilindro sometido a un flujo de aire, es decir, mejorar su aerodinámica, hecho que puede ser aplicable a cuerpos romos semejantes a vehículos, por otro lado, al introducir estos elementos en el flujo, surge una vibración considerable, con lo que se puede reutilizar esta energía en forma de vibración para generar electricidad con un piezoeléctrico. Queda clara la importancia del estudio de este tipo de dispositivos que permiten aprovechar la energía, que de otra forma se perdería, mejorando así el balance energético y reduciendo el consumo de otros tipos de fuentes de energía contaminantes.

Este tipo de aprovechamiento energético de la energía latente en el ambiente tiene su denominación en inglés *Energy harvesting*. Este concepto, como ya se ha ido adelantando, engloba la utilización de energía residual en el ambiente para generar energía eléctrica, que nos permita alimentar dispositivos de bajo consumo, como pueden ser sensores inalámbricos o incluso teléfonos móviles [1].

Este tipo de redes de sensores inalámbricos, cada día están tomando un impulso mayor debido al crecimiento del concepto de Internet de las cosas (IdC), donde cada dispositivo se encuentra conectado. En la actualidad, estos sensores son alimentados por baterías, que es necesario recargar, pero en numerosas ocasiones debido a la expansión del IdC, dichos sensores se encuentran en lugares remotos y de difícil acceso, por tanto, teniendo una gran dificultad la recarga de dichas baterías. Esta energía puede ser aportada por sistemas de aprovechamiento de energía residual con lo que mejoramos el funcionamiento y mantenimiento de los sensores, unido a esto se encuentra la reducción de la contaminación producida por el ciclo de vida de las baterías [2].

La sustitución de las baterías no solo se debe a un afán de reducir la contaminación o a que se encuentren en lugares inaccesibles, sino también a que cada día el balance entre la energía almacenada en las baterías y el aumento del consumo de los sensores es más desfavorable, por lo que se necesitan fuentes adicionales de energía, por ejemplo, Zhou et al. [3] analiza el aprovechamiento de las vibraciones generadas por los vórtices de un flujo de un fluido y que se podría utilizar

por sensores próximos a dicho flujo. Esta aplicación es muy parecida a nuestro estudio y puede verse en la Figura 1.

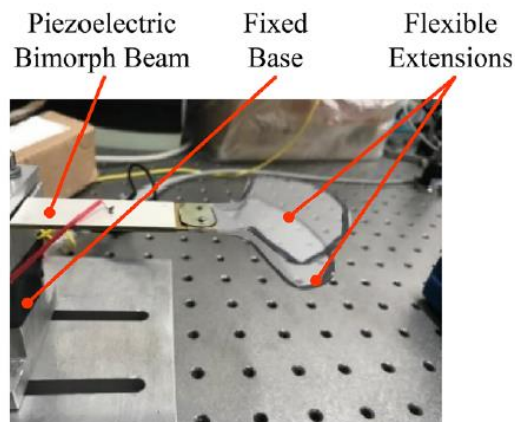


Figura 1. Prototipo de sistema de aprovechamiento de energía que se introduce en un flujo de aire [3]

La utilidad de estos sistemas yace en la ingente cantidad de energía que se pierde disipándose en el ambiente, simplemente los humanos podrían generar 10 mW por el movimiento de los brazos, 1 mW por el trabajo en un ordenador, 100 mW en el movimiento de respiración y 1 W andando. Toda esta energía se produce independientemente de las condiciones del medioambiente y podría ser recuperada por dispositivos incluidos en la ropa sin que nadie se percatase de ello [2].

Pero este sistema de aprovechamiento de energía no solo es útil en aparatos inalámbricos, se están realizando estudios de pavimentos con sensores piezoeléctricos incorporados para recuperar la energía residual producida por las personas al andar. Esta energía puede ser almacenada y usada para la iluminación de las aceras o de pasos de peatones. Con este método se pueden conseguir voltajes de hasta 15 V con pesos de 50 kg [4].

En este sentido están trabajando empresas como Pavegen Systems que introdujo baldosas en el exterior del Westfield Stratford City, el mayor centro comercial de Europa, en Londres, Figura 2. Estas baldosas permiten encender la mitad de la iluminación exterior del centro comercial. Además, esta misma empresa tiene numerosos proyectos en otros lugares como en colegios, plazas y estaciones de trenes [5]. Existen muchas otras implementaciones reales como son calles en Toulouse o el metro de Tokio, así como hoteles y gimnasios [1].



Figura 2. Baldosas de la empresa Pavegen Systems en Westfield Stratford City [5]

Por último, destacar otras aplicaciones totalmente diferentes, como es el uso de piezoeléctricos para alimentar los marcapasos. En este caso los piezoeléctricos van unidos a un cable introducido directamente en el corazón por lo que no se necesitan dispositivos externos, lo que hace a esta tecnología mínimamente invasiva y evita las cirugías necesarias para la sustitución de baterías con el paso de los años. En la práctica, este piezoeléctrico unido al cable deberá ser encapsulado en algún tipo de tubo blando para aislarlo de los fluidos corporales [6]. Lin Dong et al. [6] realizan ensayos con un piezoeléctrico de polímero (usado en el presente trabajo) poroso y muy delgado para enrollarlo alrededor del cable. Todo ello puede verse en la Figura 3.

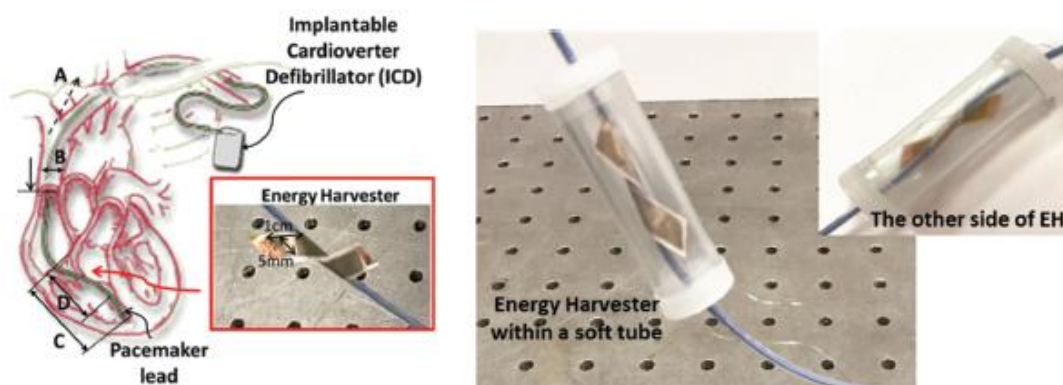


Figura 3. Sistema de recuperación de energía residual del corazón mediante un piezoeléctrico para un marcapasos y encapsulado en tubo blando necesario. [6]

1.2 Objetivos

Como ya se indicó en el apartado Introducción del presente Trabajo Fin de Máster, la investigación desarrollada se encuadra en dos ámbitos de forma simultánea, la mejora de la aerodinámica de un cuerpo cilíndrico en el interior de un flujo de aire acoplándole una serie de lamas flexibles de distinta rigidez y material, al

mismo tiempo que se recupera la energía residual de las vibraciones, mediante dispositivos piezoeléctricos, de forma que resulte un balance energético conjunto positivo. Esto se va a llevar a cabo a través del cumplimiento de una serie de objetivos:

- 1: Estudio pormenorizado de los materiales y tipos de piezoeléctricos usados en otras investigaciones y comercialmente.
- 2: Desarrollo de un circuito eléctrico para la obtención de una señal de tensión continua y constante para la alimentación de un LED, a partir, de la tensión generada por un piezoeléctrico.
- 3: Estudio de las fuerzas y coeficientes de fuerza *drag* y *lift* sobre un cilindro en el interior de un flujo de aire, colocándole lamas flexibles de material plástico de distinta rigidez, además de estudiar la incorporación en dichas lamas un sistema de captación de energía cinética debido a la vibración de las mismas.

1.3 Antecedentes o estado del arte

En este apartado se van a comentar las investigaciones específicas que tienen que ver con el diseño experimental y físico de nuestro problema, es decir, se centra en aquellos trabajos enfocados en el movimiento de lamas en algunos casos con piezoeléctricos incluidos, en otros no, en el interior de un flujo de un fluido, en la mayoría de casos aire.

Por ejemplo, se puede comentar el trabajo de Zhou et al. [3], al que ya se ha hecho referencia en anteriores puntos. El tema interesante de este trabajo es que se diseña un nuevo dispositivo aeroelástico de recuperación de energía, este sistema consta de una viga en voladizo formada por piezoeléctricos a la que se le añaden unas extensiones flexibles para aumentar las vibraciones. En el artículo se indica que esta disposición está basada en la forma de una hoja y su pecíolo (unión de la hoja al tallo), Figura 4.

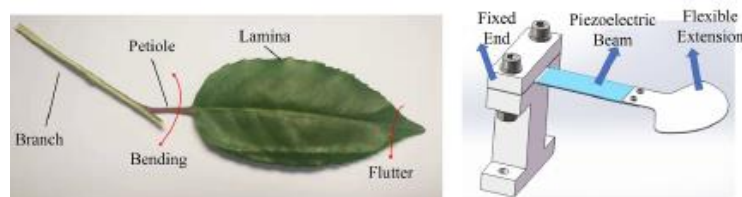


Figura 4. Estructura de una hoja y el prototipo diseñado en [3]

Las extensiones flexibles se diseñan en forma de T o de sector circular, algo diferente a nuestro trabajo en el que el piezoeléctrico se adhiere a la lama coincidiendo el inicio del piezoeléctrico con el empotramiento de la lama en el cilindro.

Además de simulaciones numéricas, en este estudio se realizaron trabajos experimentales introduciendo el dispositivo recuperador de energía en un flujo de aire, donde para recopilar la información se usa un osciloscopio digital. Sin embargo en nuestro caso se usan tarjetas de adquisición, a las que se le conecta la medición de tensión en los correspondientes pines y son alimentadas a través de un ordenador al mismo tiempo que vuelcan la información.

Los resultados más destacables obtenidos en este estudio, tanto de forma teórica con simulaciones, como de forma experimental, indican que existe cierta velocidad del aire, a niveles altos, donde el voltaje aportado por los piezoeléctricos decrece, debido a que excede los parámetros de resonancia y las extensiones flexibles entrarán en un rango de vibración divergente. Se han obtenido aproximadamente 25 V de amplitud de tensión en circuito abierto, es decir, la tensión pico a pico, de la que hablaremos en nuestros resultados, a una velocidad de 13 m/s.

A continuación nos centraremos en los trabajos de Binyet, Huang y Chang [7-10]. En todos ellos el tema principal es la recuperación de energía con piezoeléctricos en estelas de un cuerpo en el interior del flujo de un fluido.

En primer lugar, se comenta la referencia [7]. En este caso se colocan lamas flexibles de polímero en la estela de un cuerpo cuadrado dentro de un tanque de agua, aprovechando la energía de esta vibración, Figura 5. En este trabajo se usa una combinación de simulaciones en ANSYS [11] y experimentaciones con láser, ensayos PIV (Particle Image Velocimeter o Velocimetría de Imagen de Partículas), y cámaras de alta velocidad para observar la deflexión de la lama. Las vibraciones que se producen en la lama se deben a la desigual distribución de presión que aparece en el flujo debido al cuerpo. Al tener forma cuadrada, el flujo se desprende en los bordes, generando una estela oscilatoria que, como ya se ha indicado, produce una vibración en la lama, deformándose ésta siguiendo una onda sinusoidal o modo 4.

Destacar que se ha utilizado polietileno de 0.12 mm debido a que ofrece propiedades similares a la de los piezoeléctricos PVDF (poli fluoruro de vinilideno), aunque realmente no se usan los piezoeléctricos en el estudio. Es importante reseñar que en nuestro caso se están usando lamas de espesores y materiales similares, debido a que se tiene el mismo tipo de piezoeléctricos. Como se verá en posteriores referencias y en la descripción de los piezoeléctricos realizada en esta memoria, este tipo de piezoeléctricos tiene un amplio uso en labores de investigación.

Un resultado a remarcar del artículo es que la energía de la deformación se veía incrementada al mismo tiempo que aumentaba el espesor de las lamas, sin embargo, esto sucede hasta un cierto valor óptimo, a partir del cual sería demasiado rígida. Esto se verá en los resultados de nuestros ensayos.

En segundo lugar, los estudios realizados en [8] son muy semejantes a los comentados anteriormente, pero en este artículo se dedican a caracterizar los vórtices inducidos por el cuerpo mediante técnicas de velocimetría con imágenes.

Ya en este trabajo Binyet et al [8], introducen un concepto interesante como es la similitud entre el movimiento de las lamas y el movimiento que realizan al nadar las anguilas o peces. Este movimiento al nadar, permite a los peces gastar la mínima cantidad de energía posible, lo que hace que puedan cubrir grandes distancias [10]. Se realizan ensayos y simulaciones donde se caracteriza el recurso mecánico una vez más, pero como se dice expresamente no se convierte a la posible adquisición de energía eléctrica.

De nuevo se usa polietileno, aportando aquí algunas propiedades útiles en posteriores comentarios del presente trabajo, como son un Módulo de Young de 2 GPa y una densidad de 1475 kg/m^3 , se indica que podrían ser propiedades similares a las de un piezoeléctrico PVDF. Se destaca en este caso que el aumento de la longitud de la lama provoca el incremento de la energía de deformación, sucediendo lo contrario para el caso del ancho de la lama, siendo inversamente proporcional.

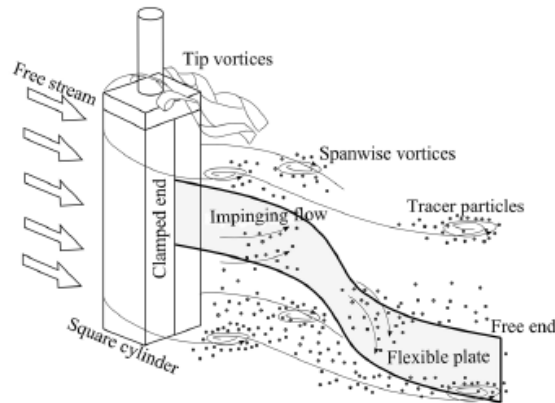


Figura 5. Sistema empleado por Emmanuel Binyet, Chih-Yung Huang, Jen-Yuan (James) Chang en las referencias [7-10]

El tercer artículo [9] es una continuación del anterior [8], se usa un nuevo tipo de material en las lamas, polietileno tereftalato con propiedades similares a las ya indicadas. Además, se ofrecen algunos datos de la posible conversión de energía mecánica a eléctrica, indicando que entre un 20 % y un 90 % de la energía de deformación podría ser aprovechada. Esto se debe tener en cuenta, aunque en cuanto a energías renovables se refiere el verdadero parámetro importante es cuánto ha costado producir la energía que se aprovecha de forma residual y no tanto el balance energético, ya que siempre será recomendable hacer uso de la energía que normalmente se desecharía.

Finalmente, se va a comentar el artículo más extenso de estos autores [10], que podría ser el resumen de los anteriormente comentados [7-9]. De nuevo se pone de manifiesto lo novedoso de nuestro estudio donde se está midiendo de forma simultánea el recurso eléctrico (señal eléctrica del piezoeléctrico) y el recurso mecánico (deformada de la lama), ya que una vez más en este estudio se realiza una estimación del recurso eléctrico, además de no usar los piezoeléctricos en sí, sino materiales plásticos similares. El gran resultado de este trabajo es que se estima la tensión que podría obtenerse en función de un gran número de parámetros, como puede ser la frecuencia de vibración, la resistencia de la carga conectada y sobre todo la longitud de la lama. Para revisar esta fórmula se recomienda acceder a la bibliografía [10], debido a su magnitud.

Quizás la referencia más semejante a nuestro trabajo sea el trabajo realizado por Latif et al. [12], debido a que usan el mismo tipo de piezoeléctricos que en esta

investigación. El estudio se enfoca en observar el efecto que tienen las relaciones de parámetros S/D y L/D , donde S , es la distancia entre el cilindro y el piezoeléctrico, L , la longitud del piezoeléctrico y D , el diámetro del tubo y la velocidad del flujo en la tensión obtenida y en los modos de vibración. En la Figura 6, se observa como el mayor valor tensión eficaz obtenido es de 0.1975 V a una velocidad del flujo de 10 m/s y un Reynolds de 37500, valores considerables.

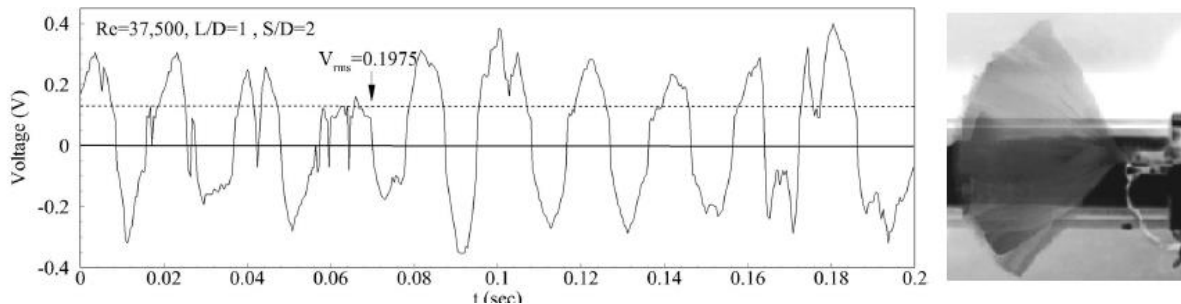


Figura 6. Energía eléctrica recuperada para un Reynolds de 37500 y una velocidad del aire de 10 m/s [12]

1.4 Definición de los piezoeléctricos

Anteriormente, se han comentado ciertos dispositivos de conversión de energía residual en energía eléctrica, como son los piezoeléctricos, pero existen tres formas de conversión, la propia piezoelectricidad, la electrostática (sistema de condensadores de placas variables, se genera electricidad al variar el área de las placas por efecto de cierta energía mecánica [14]) y el electromagnetismo (un sistema con un diafragma con imanes permanentes unidos rodeados de una bobina, que debido a la acción de un flujo, oscila y genera la electricidad [15]) [2]. Sin embargo, los piezoeléctricos son los dispositivos más usados.

Este tipo de recuperación se utiliza cuando se necesitan voltajes altos, alta densidad de energía, gran capacidad y baja amortiguación del movimiento. Pero para entender estos dispositivos, en primer lugar, se debe conocer que es la piezoelectricidad. Se trata de la capacidad para generar electricidad que tienen ciertos materiales con estructura cristalina en respuesta a una deformación. Aunque este efecto (piezoelectricidad directa), tiene también el efecto contrario o piezoelectricidad inversa, en la que si aplicamos un campo eléctrico al material, éste se deformaría.

Una característica importante de estos materiales, y que por ejemplo, exige un estudio intensivo para realizar asociaciones en serie o paralelos para realizar baterías de corriente o tensión, es que durante las sucesivas deformaciones del material, éste cambia su polarización.

Según Covaci et al. [2], los piezoeléctricos presentan algunas ventajas pero también desventajas:

- Ventajas: estructura simple, no se necesitan fuentes de alimentación externas, variedad de formas, pueden ser montados sobre mecanismos de aprovechamiento de manera sencilla, gran energía y capacidad de trabajo a altas temperaturas, entre otras.
- Desventajas: la potencia obtenida es baja, del orden de milivatios y se necesita rectificar la señal obtenida.

En este mismo estudio, en el que se analizan al completo los piezoeléctricos, se indica que existen dos principales tipos de piezoeléctricos, los cerámicos y los polímeros. Dentro de estos grupos destacan los piezoeléctricos cerámicos hechos de titanato zirconato de plomo o PZT y los piezoeléctricos de polímero poli fluoruro de vinilideno o PVDF (tipo usado en este trabajo).

Las diferencias entre estos dos tipos se basan en que los piezoeléctricos cerámicos son más rígidos, tienen una mayor eficiencia de conversión de energía mecánica y se recomienda su uso como actuadores en algunos tipos de estructuras, aunque también son usados en sistemas de aprovechamiento de energía residual. Por otro lado, los piezoeléctricos poliméricos tienen una baja rigidez, una menor eficiencia y su objetivo principal es actuar como sensores (detección de vibraciones, por ejemplo, airbags), aunque la gran cantidad de sistema de aprovechamiento que se están desarrollando, en su gran mayoría usan este tipo de piezoeléctricos, como hemos podido observar en gran parte de la bibliografía. En la Tabla 1, se muestran distintas propiedades de ambos tipos de piezoeléctricos (PZT y PVDF).

Properties/Parameters	Piezoelectric Ceramics (PZT)	Piezoelectric Polymers (PVDF)
Piezoelectricity	High	Low
Acoustic impedance ($10^6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ¹	High (30)	Low (2.7)
Density (10^3 kg m^{-3})	7.5	1.78
Relative permittivity (ϵ/ϵ_0)	1200	12
Piezoelectric strain constant ($10^{-12} \text{ C N}^{-1}$)	$d_{31} = 110, d_{33} = 225-590$	$d_{31} = 23, d_{33} = -33$
Piezoelectric stress constant ($10^{-3} \text{ V m N}^{-1}$) ¹	$g_{31} = 10, g_{33} = 26$	$g_{31} = 216, g_{33} = -330$
Electromechanical coupling factor ²	$k_{31} = 30$	$k_{31} = 12$
Dielectric constant	1180	10-15
Mechanical flexibility ¹	Poor	Outstanding
Curie temperature ($^{\circ}\text{C}$)	386	80

¹ Exceptional properties of PVDF for energy harvesting application vis-à-vis PZT ceramics. ² % at 1 kHz.

Tabla 1. Propiedades de piezoeléctricos cerámicos (PZT) y piezoeléctricos poliméricos (PVDF) [2]

Estos piezoeléctricos se pueden usar de distintas formas para generar la electricidad:

- Viga en voladizo: existen en forma unimorfo, donde un piezoeléctrico está embebido entre dos láminas de material no piezoeléctrico o bimorfo, donde existen dos piezoeléctricos. Este tipo de montaje es el más usado por su facilidad y gran deformación. El montaje aquí descrito es el que se ha usado durante los ensayos, aunque utilizando una sola lámina de material no piezoeléctrico.



Figura 7: Piezoeléctrico PVDF LDT1-028K, en forma de viga en voladizo

- Diafragma circular: se trata de un piezoeléctrico circular colocado en medio de dos electrodos, todo sujeto a una base metálica, para mejorar el rendimiento. Se suele utilizar en instrumentos musicales de percusión.

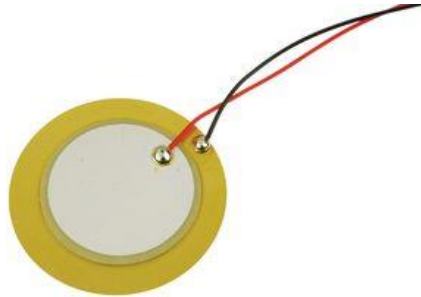


Figura 8: Piezoeléctrico MCFT-27T-4.2AL-127 en forma de diafragma circular

Este tipo de piezoeléctricos también se han usado a lo largo del desarrollo del proyecto para entender mejor el funcionamiento de los piezoeléctricos en general. Aunque, finalmente debido al tipo de experimentos realizados no se usaron como los captadores de energía residual de los ensayos principales. Además, en la parte de Trabajo experimental se mostrarán imágenes de su uso y funcionamiento.

- Plato piezoeléctrico entre dos tapas metálicas, estas dos tapas metálicas forman una cavidad, por lo que se usan para grandes fuerzas de impacto. Gracias a estas cavidades, se transforma la deformación longitudinal en radial en el piezoeléctrico.

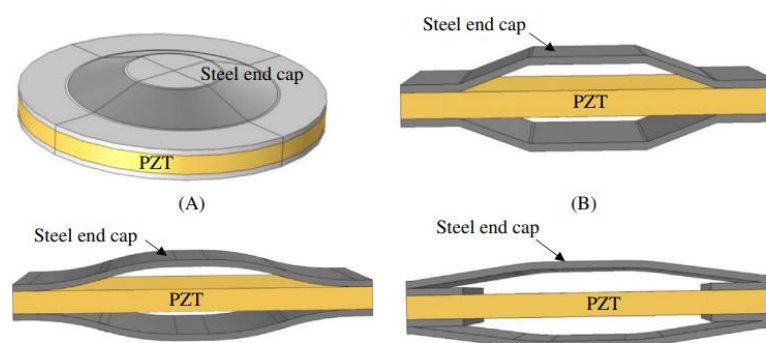


Figura 9: Piezoeléctricos entre placas metálicas [16]

- Piezoeléctricos apilados entre electrodos: se usan en aplicaciones donde se ejerce una gran presión.

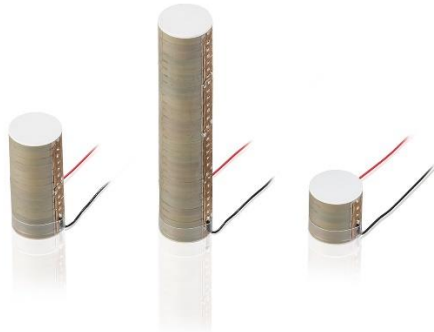


Figura 10: Piezoeléctricos P-088 en forma de piezoeléctricos apilados

Una importante propiedad de los piezoeléctricos es que se trata de dispositivos sensibles a la frecuencia de deformación, por tanto, se debe estudiar su frecuencia de resonancia e intentar hacerlos trabajar en ella para poder obtener la máxima eficiencia [2]. Esto es algo que en la investigación en que se enmarca esta memoria ha quedado pendiente de hacer, ya que encontrar la frecuencia a la que obtendríamos la máxima conversión de energía eléctrica, nos permitiría ajustar el flujo de aire para alcanzar el valor más próximo que pueda usarse según la física del problema. Sin embargo, a falta de un instrumento que nos permita controlar tanto la frecuencia, como la amplitud de las vibraciones, como es un agitador electrodinámico, los experimentos se hicieron a ciertos regímenes de velocidad del aire.

En este tipo de agitadores se puede aplicar una señal tipo sinusoidal a cierta frecuencia, que equivaldrá a la frecuencia de vibración de la viga o piezoeléctrico acoplado [17]. Un ejemplo comercial, se puede ver en la Figura 11, este tipo de agitadores aparte del uso en la investigación de piezoeléctricos, se suele utilizar para ensayos de ciclo de vida de elementos estructurales y de piezas de vehículos.



Figura 11: Agitador de imanes permanentes LDS V101

También en este punto, se recuerda que existen diferencias entre los tipos de piezoeléctricos, los piezoeléctricos cerámicos exigen trabajar a altas frecuencias, en torno a 100 Hz (mayor espesor), sin embargo, los poliméricos funcionan bien entre 10 Hz y 30 Hz.

Por último, en este apartado nos centramos en el circuito electrónico necesario para rectificar la onda generada por el piezoeléctrico y que la energía eléctrica pueda ser usada por los distintos sensores. Normalmente, para facilitar el trabajo se usan circuitos integrados, que además permiten optimizar la señal como son: MB39C811, LTC3588 y MAX17710, que se usan dependiendo de la aplicación y el voltaje de entrada [18]. Este tipo de circuitos integrados en su mayoría contienen o simulan un rectificador de onda completa, formada por un puente de diodos de doble onda con cuatro diodos, al que se le añade un condensador, dependiente de la carga a utilizar y la señal de salida del rectificador, para reducir el rizado de la señal de entrada a la carga.

Además, según Covaci [2], existen otras técnicas para usar en este tipo de circuitos con piezoeléctricos, como son: rectificador de dos etapas (maximiza la potencia), SSHI (Synchronized Switch Harvesting on Inductor, técnica no lineal que anula el efecto capacitivo y aumenta el voltaje a la salida) y SECE (Synchronous Electrical Charge Extraction, no depende de la carga alimentada).

1.5 Lamas flexibles acopladas en cuerpos romos

Se va a describir de forma general el problema o estudio de la colocación de lamas flexibles en la estela de cuerpos, ya sean cilíndricos o cuerpos contundentes (forma prismática con “cabeza” semicircular).

La colocación de lamas flexibles en cuerpos romos o contundentes, normalmente conduce a la reducción del coeficiente de arrastre o *drag* en inglés [19]. Teniendo en cuenta que esta reducción está limitada cuando la amplitud de la vibración de las lamas se vuelve grande, a altos valores del número adimensional de Cauchy o bajos valores de la rigidez adimensional. La deformación también ayuda a paliar el desprendimiento de vórtices y reducir la burbuja de recirculación que se forma en la estela, justo en la parte trasera del objeto.

Se puede saber mediante sistemas de análisis de imágenes, ya sea estroboscopia o análisis PIV, que las lamas flexibles van a vibrar siguiendo el primer modo de vibración, el segundo o una combinación de ambos [19-21].

La reducción del coeficiente de arrastre puede realizarse acoplando sistemas activos, que tienen un alto rendimiento o sistemas pasivos, como lamas flexibles que se adaptan al flujo. El problema de los sistemas activos yace en que son difíciles de implementar en la realidad y, además, suponen un consumo extra de energía, aunque se debe aclarar que los sistemas pasivos no generan una reducción del coeficiente de arrastre en cualquier condición del flujo, sobre todo a diferentes ángulos de ataque [19].

Como se indicó en el apartado de Antecedentes o estado del arte, este tipo de reconfiguraciones de elementos flexibles según el flujo incidente, está basado en gran medida en la observación de la naturaleza. Según Vogel [22], la flexibilidad de las hojas hace que se adapten perfectamente al viento incidente en los árboles, lo que provoca una reducción del coeficiente de arrastre. Debido a esto, a pesar de las grandes tormentas, los árboles no caen tan fácilmente. Este fenómeno ocurre sea cual sea el tipo de hoja y tamaño que tenga. Vogel realizó ensayos de análisis de estelas de cuerpos en un flujo de aire, pero introduciendo hojas de árboles reales.

Como se ha realizado en los ensayos, en este tipo de estudios es clave analizar el efecto del espesor de las lamas y, por tanto, su flexibilidad, sobre los parámetros característicos del problema [19 y 20]. Además del espesor, se debe tener en cuenta la longitud de la lama, ya que debería ser lo suficientemente larga como para que se adapte al flujo [20]. Esto se debe a que Shukla et al. [20] demuestra que para lamas cortas las diferencias entre ensayos son altas.

El uso de sistemas flexibles, a pesar de las complicaciones que entraña, es algo beneficioso.

2 Descripción del problema

2.1 Flujo alrededor de cuerpo romo con apéndice flexible

Este apartado se enmarca dentro de la mejora aerodinámica mediante sistemas flexibles, que se incluye en el título del presente Trabajo Fin de Máster. Sin embargo, se debe aclarar, ante futuros razonamientos que se van a realizar que, en realidad, aunque es deseable dicha mejora aerodinámica, no va a ser exigida debido a que se tiene una forma de recuperar la energía residual generada, se podría decir por la no mejora de la aerodinámica, buscando siempre que el balance total de energía sea favorable, frente al caso de no tener los elementos flexibles.

El problema que se describe a continuación, está basado en el uso de un cuerpo cilíndrico. A pesar de su sencillez, estructuralmente hablando, este tipo de forma está omnipresente en muchos problemas de ingeniería civil, arquitectura e ingeniería marina, y se usa como geometría de referencia en casos de control en aerodinámica.

Los parámetros característicos de este problema y que se describen a continuación, se muestran en el siguiente esquema de la Figura 12.

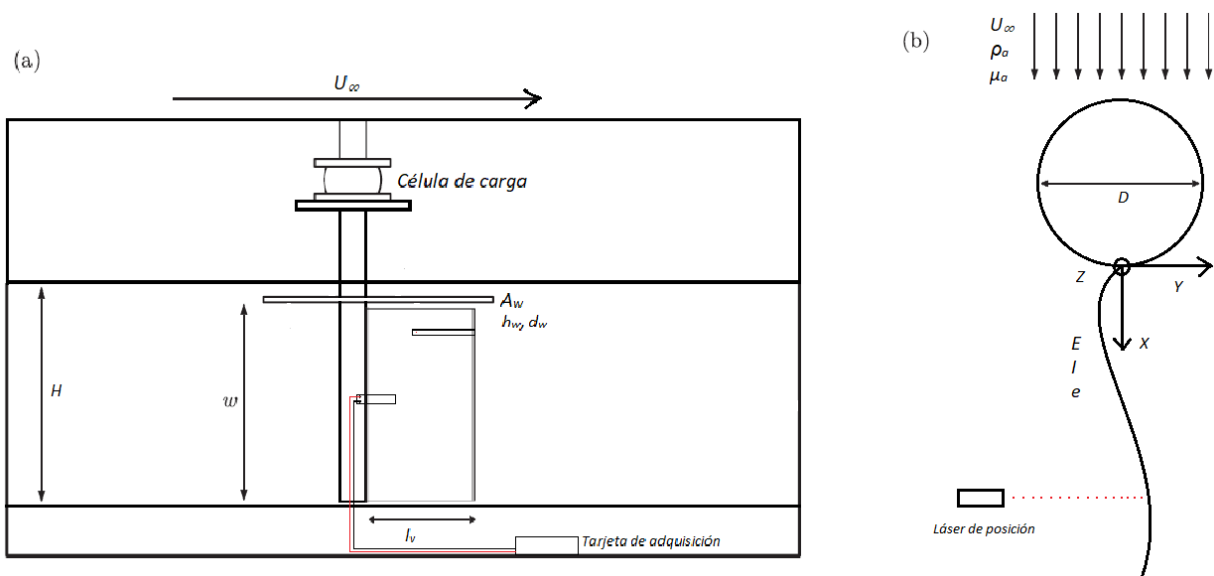


Figura 12. Esquema del problema e instalación experimental en el túnel de viento. (a) Vista general frontal. (b) Detalle vista de planta.

- l_v , longitud de la lama, D , diámetro del cilindro, E , Módulo de elasticidad del material de la lama, $I = \frac{w \cdot e^3}{12}$, momento de inercia de la lama colocada en el cilindro, w , alto de la lama, e , espesor de la lama, ρ_a , densidad del fluido (aire), ρ_l , densidad

de la lama, U_∞ , velocidad del fluido (aire) sin influencia del cuerpo, μ_f , viscosidad dinámica del fluido (aire), A_c , área transversal del cuerpo (nuestro caso $A_c = H_t \cdot D - A_w$, H_t , longitud total del cilindro en el túnel, A_w , área del *winglet*) y f , frecuencias predominantes.

- La relación entre la longitud de la lama y el diámetro del tubo, l_v/D .
- La rigidez flexural de la lama [20], $E \cdot I$.
- Relación de masas, que expresa relación de la densidad de las lamas respecto a la densidad del aire:

$$m^* = \frac{\rho_l}{\rho_a} \quad (\text{Fórmula 2.1})$$

- El número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho_a \cdot U_\infty \cdot D}{\mu_f} \quad (\text{Fórmula 2.2})$$

• El coeficiente adimensional de Cauchy, representa la relación entre la fuerza producida por la dinámica debida al flujo y la rigidez a flexión de las lamas flexibles:

$$Ca = \frac{\rho_a \cdot U_\infty^2 \cdot l_v^3}{2 \cdot EI} \quad (\text{Fórmula 2.3})$$

• La rigidez a flexión adimensional, se trata de un parámetro inverso al anterior, usado por Shukla et al. [20]. Si este coeficiente tiene un valor alto, nos indica que la rigidez de la lama es mayor y que la deformación será menor, por otro lado, con altas velocidades, la fuerza producida por la dinámica del flujo aumenta, reduciéndose este parámetro, aumentando por ello la deformación.

$$K^* = \frac{E \cdot I}{\frac{1}{2} \rho_a \cdot U_\infty^2 \cdot l_v^3} \quad (\text{Fórmula 2.4})$$

• La velocidad reducida nos permite medir una vez más la rigidez a flexión de las lamas.

$$U^* = \frac{U_\infty}{f_1 \cdot n \cdot D} \quad (\text{Fórmula 2.5})$$

En la Fórmula 2.5 se debe tener en cuenta que $f_{1,n}$, representa la frecuencia natural del primer modo de vibración de las lamas flexibles. Para aplicar esta ecuación, se debe asumir que la lama flexible trabaja como una viga en voladizo y, además, vibra en primer modo, esta última consideración debería comprobarse con un análisis de imágenes de la deformada, aunque es útil en primera aproximación.

$$f_{1,n} = \frac{(\beta \cdot l_v)^2}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho_l \cdot e \cdot w \cdot l_v^4}} \quad (\text{Fórmula 2.6})$$

donde:

$\beta \cdot l_v = 1.8751$, al tratarse de una viga en voladizo vibrando en primer modo. Cada uno de estos parámetros dimensionales se puede observar en una representación gráfica en el apartado de Trabajo experimental.

- El coeficiente de arrastre o drag y el coeficiente transversal o *lift*, son dos coeficientes que nos permiten entender el comportamiento de las fuerzas (según OX y OY, respectivamente) que actúan sobre el cilindro en nuestro caso, o sobre cualquier cuerpo sometido a un flujo, en general.

$$c_x(t) = \frac{f_x(t)}{\frac{1}{2} \rho_a \cdot U_\infty^2 \cdot A_c} \quad (\text{Fórmula 2.7})$$

$$c_y(t) = \frac{f_y(t)}{\frac{1}{2} \rho_a \cdot U_\infty^2 \cdot A_c} \quad (\text{Fórmula 2.8})$$

- El coeficiente adimensional de Strouhal, adimensionaliza las frecuencias en términos del flujo y del cuerpo.

$$St = \frac{f \cdot D}{U_\infty} \quad (\text{Fórmula 2.9})$$

Por ejemplo, para el caso del flujo a través de un cilindro, se obtiene un Strouhal de 0.2. Se debe destacar que al contrario de lo asumido por Baena et al. [19], en su estudio Shukla et al. [20] comprueba la existencia de dos frecuencias dominantes (f) para la misma velocidad del flujo. Esto quiere decir, que existe una competición entre el primer modo y el segundo modo de vibración, que debe ser estudiado en profundidad.

Además, para cuantificar la respuesta dinámica de la lama nos resultarán útiles dos parámetros más,

- Amplitud y frecuencia adimensional

$$A^* = \frac{A_v}{D}, \quad f^* = \frac{f_v}{f_{n,1}} \text{ (Fórmula 2.10 y 2.11)}$$

Por último, se ha obtenido información Jinmo et al. [21], donde se ha tratado este problema pero desde un punto de vista numérico. Es interesante la demostración de que la forma de la deflexión de la lama es dependiente de su longitud y que la magnitud de la deflexión es dependiente de la rigidez flexural de la lama y su frecuencia natural. Sin embargo, el siguiente resultado es de vital importancia para nuestros experimentos y resultados: se obtuvo que la flexibilidad de la lama tiene un efecto negativo sobre el coeficiente de arrastre y transversal que actúan sobre el cilindro, pero produce una mayor oscilación de la lama.

2.2 Piezoeléctricos

En el apartado de Introducción se ha realizado una descripción teórica de la piezoelectricidad y más en concreto de los piezoeléctricos. Sin embargo, a continuación, se desarrollará la aplicación directa de los piezoeléctricos a nuestros ensayos y la forma de estudiarlos que se ha llevado a cabo.

En primer lugar, se debe indicar que, según Covaci y Gontean [2], un sistema para la captación de energía tiene tres partes; la fuente de energía, que puede ser energía proveniente del sol, el aire, las mareas o directamente energía residual que se pierde en el ambiente, como pueden ser el calor humano, la luminosidad o vibraciones. En segundo lugar, estaría el mecanismo de aprovechamiento de energía, se trata de la parte que convierte la energía ambiental en energía eléctrica útil. Por último, estaría el dispositivo o carga que va a consumir dicha energía eléctrica.

Aunque como ya se ha indicado y según Binyet et al. [9], la eficiencia del aprovechamiento de energía no es un parámetro tan importante cuando se tiene en cuenta que se trata de energía residual, que no puede usarse de otra forma, a continuación se realiza una breve descripción de esta magnitud.

La eficiencia del aprovechamiento de energía residual es la relación entre la energía mecánica que genera la energía residual y la potencia de la carga que se alimenta. Se podrían usar las siguientes fórmulas, basadas en el estudio de Huseyin et al. [13], para expresar la anterior definición:

$$\eta_{me} = \frac{P_e}{P_m} \quad (\text{Fórmula 2.12})$$

Si desarrollamos cada término para el caso de una viga en voladizo que produce energía con las vibraciones al aplicarle una fuerza:

$$P_m = \frac{1}{t_1 - t_0} \cdot \int_{t_0}^{t_1} F \cdot \dot{y}_t \cdot dt \quad (\text{Fórmula 2.13})$$

$$m \cdot \ddot{y}_t + c \cdot \dot{y}_t + k \cdot y_t - \theta \cdot v = F \quad (\text{Fórmula 2.14})$$

$$F(t) = \int_0^L q(x, t) \cdot \phi(x) \cdot dx \quad (\text{Fórmula 2.15})$$

$$P_e = \frac{1}{(t_1 - t_0) \cdot R} \cdot \int_{t_0}^{t_1} v^2 \cdot dt = \frac{V_{RMS}^2}{R} \quad (\text{Fórmula 2.16})$$

Globalmente se puede definir un rendimiento total como la relación entre la potencia eléctrica generada y la potencia disponible en un flujo:

$$\eta_t = \frac{P_e}{P_v} \quad (\text{Fórmula 2.17})$$

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot D \cdot U_\infty^3 \quad (\text{Fórmula 2.18})$$

donde:

η_{me} es la eficiencia del aprovechamiento de energía residual, P_e , potencia eléctrica generada, P_m , potencia mecánica por la deformación de la lama, F , fuerza aplicada sobre la viga, y_t , deflexión del extremo volado m , masa de la propia viga, c , coeficiente de amortiguamiento, k , constante elástica θ , el coeficiente del acoplamiento electromecánico (generador eléctrico-generador mecánico), v , voltaje, V_{RMS} , tensión RMS o eficaz, q , carga distribuida aplicada sobre la viga (propio peso), ϕ , función de ponderación del primer modo de vibración y R , resistencia de la carga

alimentada, η_t , rendimiento total del sistema, P_v , potencia disponible en el flujo de aire, ρ_a , densidad del aire, D , diámetro del cilindro y U_∞ , velocidad del flujo.

Para obtener la eficiencia simplemente se debería calcular la fuerza aplicada, F , que puede ser conocida por el modo de vibración y la carga distribuida aplicada o peso propio, q , con la Fórmula 2.15, y de la Fórmula 2.14, se obtendrían los coeficientes. Por último, solo haría falta sustituir la información anterior en la Fórmula 2.13, para obtener la potencia mecánica, P_m , y calcular la potencia eléctrica, P_e , conociendo el voltaje generado, v , y la resistencia de la carga, R , con la Fórmula 2.16.

3 Ensayos y resultados experimentales

Una vez se tiene claro el contexto y los parámetros que definen nuestro trabajo, se pasa a explicar cómo se ha tratado de desarrollar una serie de experimentos en el laboratorio, que nos ayuden a comprender mejor todo lo anteriormente enunciado, así como abrir un nuevo camino en la investigación de la mejora aerodinámica de cuerpos romos, estableciendo unas bases sólidas.

Para resumir un poco lo que se va exponer en este apartado, se puede realizar un índice cronológico del porqué de la realización de los ensayos. En primer lugar, al no haberse trabajado nunca con piezoeléctricos en el grupo de investigación (TEP 235) y no encontrar demasiadas personas dentro de la propia Universidad de Jaén que lo hubieran hecho, se tuvo que realizar una investigación sobre sus utilidades, materiales y venta comercial, todo ello se ha resumido en los dos apartados anteriores. A continuación, una vez se han conseguido los piezoeléctricos se realizó un circuito rectificador de onda completa porque según se había investigado era necesario para usarlos en los dispositivos de posible aplicación, consiguiendo así entender el uso de los piezoeléctricos en la vida real. Una vez realizado el circuito, se realizaron unos pequeños y caseros ensayos para comprobar la utilidad real de los mismos. Cuando se comprobó que era posible toda la revisión bibliográfica realizada, se decidió realizar un ensayo preliminar en el túnel de viento con un piezoeléctrico pegado directamente perpendicular al cilindro. El resultado fue que las vibraciones eran bajas, así que se decidió conectar el piezoeléctrico a una lama y ésta al cilindro, lo que aumentaba la masa y superficie en vibración. Sin embargo, estas lamas no estaban calibradas, es decir, no se conocían sus propiedades, así que se tuvo que realizar una serie de ensayos de flecha en vacío.

3.1 Circuito electrónico rectificador

Como ya se ha visto en la bibliografía [2, 17] es necesario rectificar la señal alterna obtenida de los piezoeléctricos, para ello pueden usarse circuitos integrados [2, 17], que es la opción más recomendable para un uso industrial o una investigación detallada de la carga, que es posible alimentar. Sin embargo, en este caso debido a que se trata de un estudio inicial y por el momento básico en cuanto a la carga alimentada, se decidió que la opción mejor y más económica era desarrollar por

nuestra cuenta el circuito rectificador de onda completa con los correspondientes componentes, basándonos en Motter et al. [23] y en la experiencia como graduado de Ingeniería mecánica. El esquema y circuito real se puede observar en la Figura 14.

Para el circuito es necesario realizar un puente completo de diodos, es decir, con cuatro diodos para poder rectificar las amplitudes de onda negativas. Los diodos utilizados fueron los del modelo 1N4004. Una vez que se ha rectificado la señal, ésta contiene un gran rizado, por lo que se debe incluir un condensador para reducirlo. Tras realizar varios ensayos con condensadores de distintas capacidades, 100 μF , 0.1 μF y 2.2 μF , con el que se obtuvo un mejor comportamiento fue con el de 100 μF . Por último, en el circuito, se utilizan leds de laboratorio para comprobar la efectividad del circuito y los piezoeléctricos, se usan tanto de 2.4 V con luz verde y carcasa transparente, como de 3.4 V de color azul al completo. Todos estos componentes se pueden ver en la Figura 13.

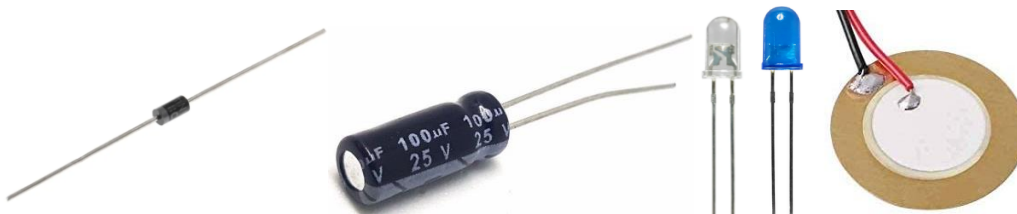


Figura 13. Diodo 1N4004, condensador 100 μF , diodo led verde 2.4 V, diodo led azul 3.4 V y piezoeléctrico de diafragma circular

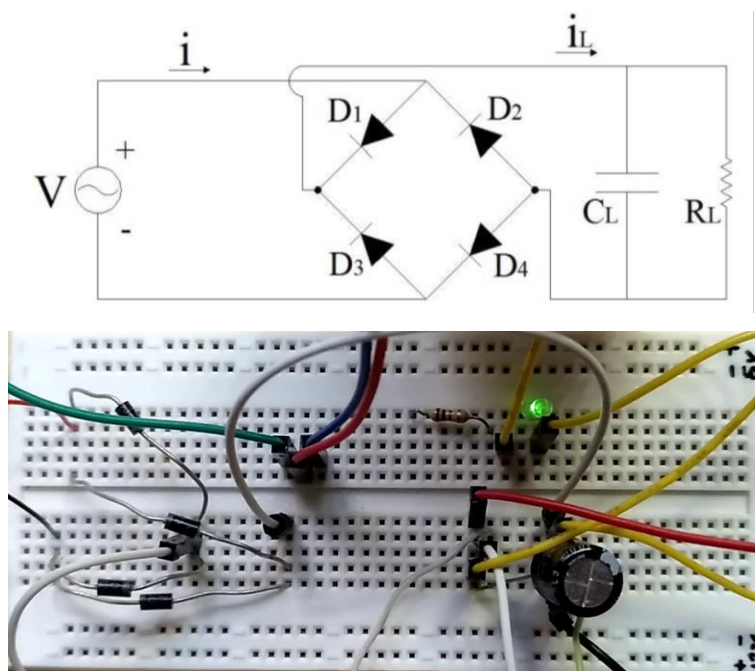


Figura 14. Circuito electrónico realizado. Arriba: esquema del circuito [23]. Debajo: circuito real.

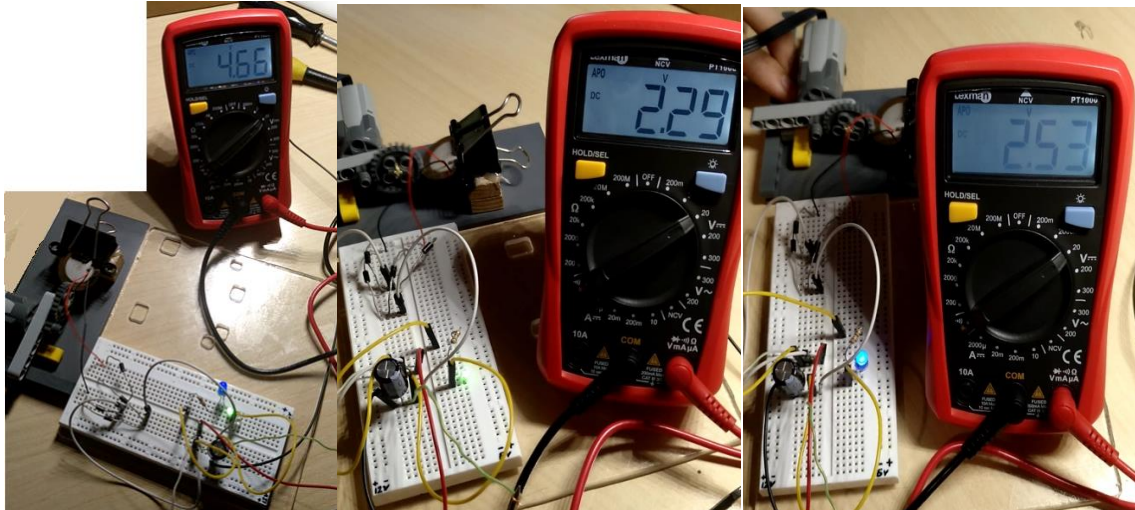


Figura 15. Ensayos realizados con el circuito rectificador

Como se puede observar en la Figura 15, se realizaron unos ensayos iniciales usando los piezoeléctricos tipo diafragma circular de la empresa DollaTek, haciéndolos vibrar con un engranaje y un pequeño motor alimentado a pilas de un set de juguete de la marca Lego. En la figura, de izquierda a derecha, se puede observar cómo se mide una tensión a la salida de 4.66 V fruto de la conexión de los anteriores diodos led en serie, en la siguiente imagen se obtienen 2.29 V constantes para alimentar el led verde y, por último, 2.53 V para alimentar el led azul. Esto nos demuestra la gran utilidad de los piezoeléctricos, que se viene enunciando hasta este apartado.

3.2 Ensayos preliminares túnel de viento

A continuación, como el objetivo de este trabajo era estudiar el efecto de las lamas flexibles en la mejora aerodinámica sobre un cuerpo, en este caso un cilindro, y obtener de ellas la energía residual de la vibración, se necesitaban piezoeléctricos con cierta flexibilidad para que puedan adaptarse a la deformada de la lama. Debido a que se trata de un problema de una viga en voladizo, se usan los piezoeléctricos de este tipo. Además, los piezoeléctricos elegidos serán de material polimérico, porque según nuestra Tabla 1, tienen una flexibilidad mecánica sobresaliente. Comercialmente se compran piezoeléctricos PVDF modelo LDT1-028K. Estos piezoeléctricos son los que se usan a partir de ahora en toda la investigación.

Los ensayos realizados consisten en unir el piezoeléctrico directamente a un cilindro de metacrilato e introducirlo en el túnel. Los experimentos se realizan para

distintos ángulos entre el flujo y el piezoeléctrico, desde 0 ° a 180 °, avanzando 10° por ensayo. Además, se realizan a dos Reynolds distintos 21704 (8.76 m/s) y 39150 (15.81 m/s). En la Figura 16, se esquematiza el experimento realizado y se incluye una imagen real del montaje.

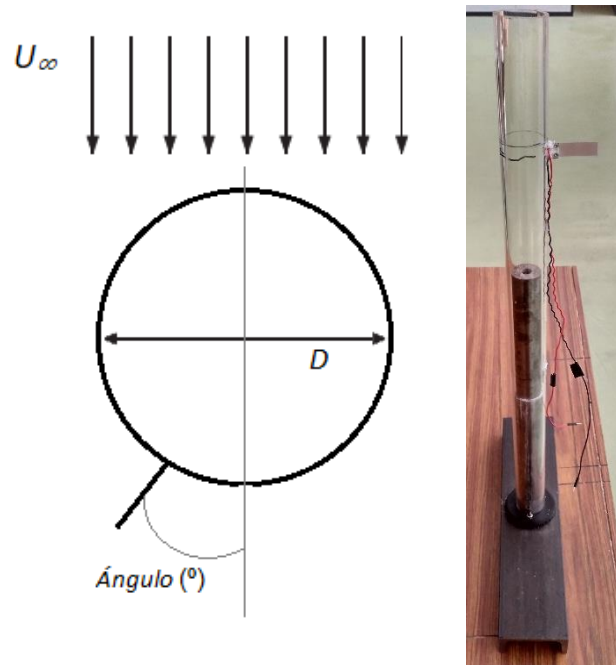
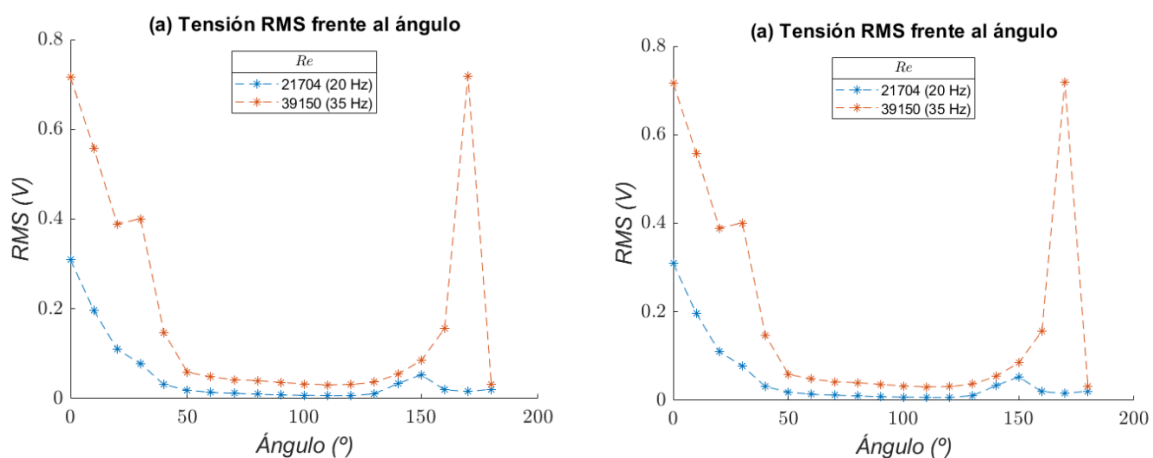


Figura 16. Esquema ensayos preliminares en el túnel de viento y montaje real.

Como se trata de ensayos preliminares no se consideran resultados del trabajo pero si muestran la capacidad de la interacción fluido-estructural para obtener energía eléctrica mediante vibración de piezoeléctricos, por ello los valores de tensión obtenidos se presentan a continuación en la Gráfica 1:



Gráfica 1. Ensayos preliminares. (a) Tensión RMS, (b) Tensión pico a pico

Según la Gráfica 1, se obtiene que la tensión resultante para el Reynolds mayor es mucho mayor y que dicho valor se obtiene para un ángulo de 0° y 180° .

3.3 Ensayos Módulo de elasticidad

En este apartado, se van a realizar ensayos de flecha en voladizo con cinco lamas de plástico desconocido (excepto una de ellas, fabricada en polipropileno), con los que se podrán calcular el módulo elástico de los distintos materiales.

Se debe tener en cuenta que para realizar un estudio y procesado de los datos obtenidos en los ensayos con el piezoeléctrico y lama unidos, se deben conocer las propiedades de dichas lamas. Concretamente nos interesan sus dimensiones y su Módulo de Young, que desconocemos al no tener datos del material en que están fabricadas. Existiendo la excepción de la lama negra más rígida, que está hecha de polipropileno con Módulo de elasticidad 1300 MPa.

Para medir la rigidez flexural de las lamas (EI) se ha medido la deflexión en vacío, y , real y teórica, es decir, la deflexión debida a su propio peso, q_0 , como una carga distribuida constante, q , [20].

La deflexión teórica, y , que deberían tener las lamas al estar sometidas únicamente a su propio peso, q_0 , se puede calcular con la fórmula que describe la flecha en una viga en voladizo [19]:

$$EI \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = q \quad (\text{Fórmula 3.1})$$

donde:

$$q = q_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{l_v}\right)^n \quad (\text{Fórmula 3.2})$$

Se obtiene que:

$$y = \frac{q_0 \cdot l_v^4}{EI \cdot (n+1) \cdot (n+2) \cdot (n+3) \cdot (n+4)} \cdot \left[\left(1 - \frac{x}{l_v}\right)^{n+4} - \left(1 - \frac{x}{l_v}\right) \cdot (n+4) + (n+3) \right] \quad (\text{Fórmula 3.3})$$

Si sustituimos $n = 0$, ya que q , debe ser una carga uniformemente distribuida con valor constante q_0 , que sería el peso específico.

$$y = \frac{q_0 \cdot l_v^4}{EI \cdot 24} \cdot \left[\left(1 - \frac{x}{l_v}\right)^4 - 4 \cdot \left(1 - \frac{x}{l_v}\right) + 3 \right] \quad (\text{Fórmula 3.4})$$

A continuación, se desarrolla cómo obtener la deflexión real de las lamas.

3.3.1 Instalación experimental

Para realizar el cálculo de la flecha, se debe simular una viga en voladizo. Por tanto, realizamos el empotramiento con un perfil de aluminio y dos sargentos. Para posteriormente medir la deflexión, se colocan dos folios con tamaño A3 en la parte trasera de la lama. La adquisición de datos se realiza fotografiando la lama con un móvil sobre un soporte fabricado para este ensayo en concreto. Un ejemplo del montaje y de las imágenes realizadas se encuentra en la Figura 17.

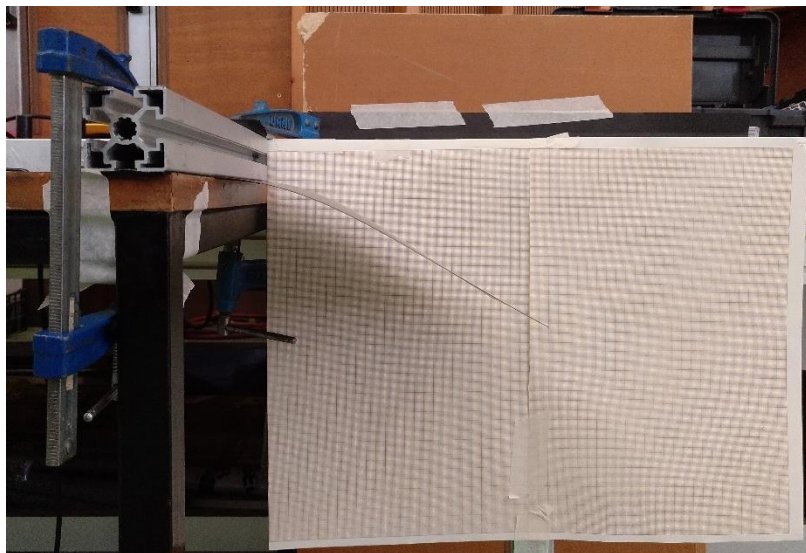


Figura 17. Montaje experimental para los ensayos del Módulo de elasticidad

3.3.2 Procedimiento de medida

Las lamas ensayadas y sus características son las siguientes:

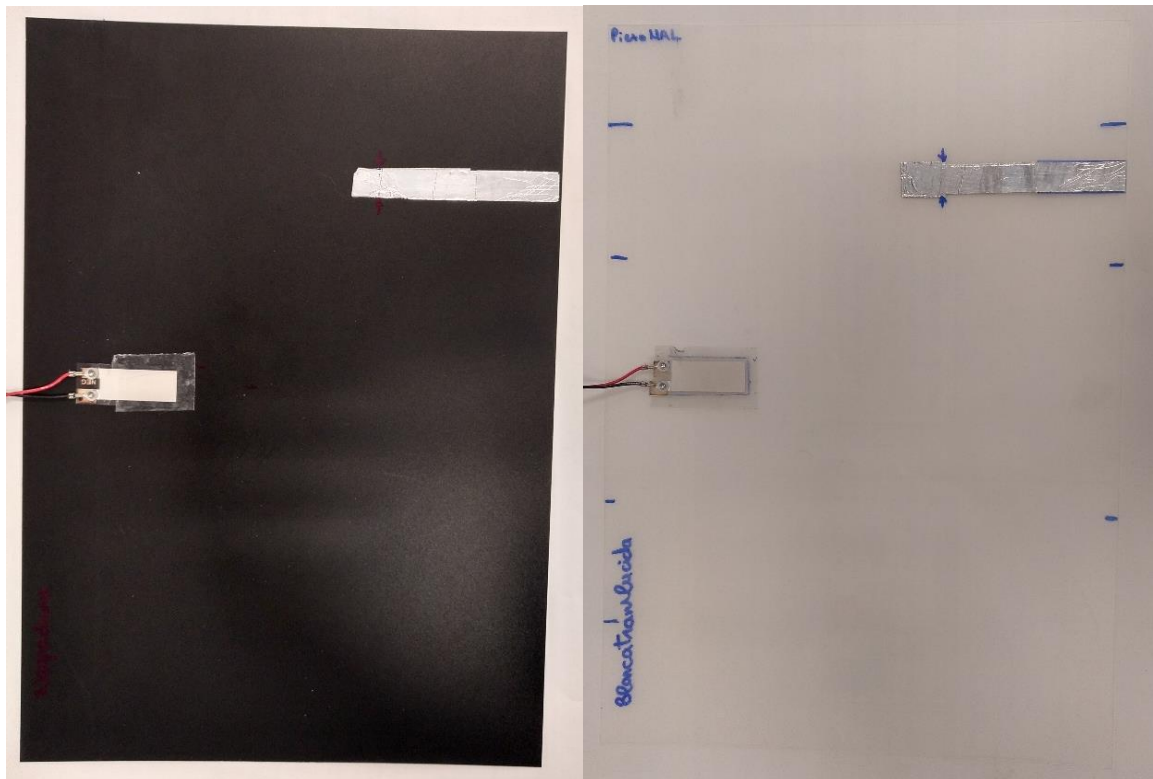


Figura 18. Lama Negradura y Blancatranslucida.

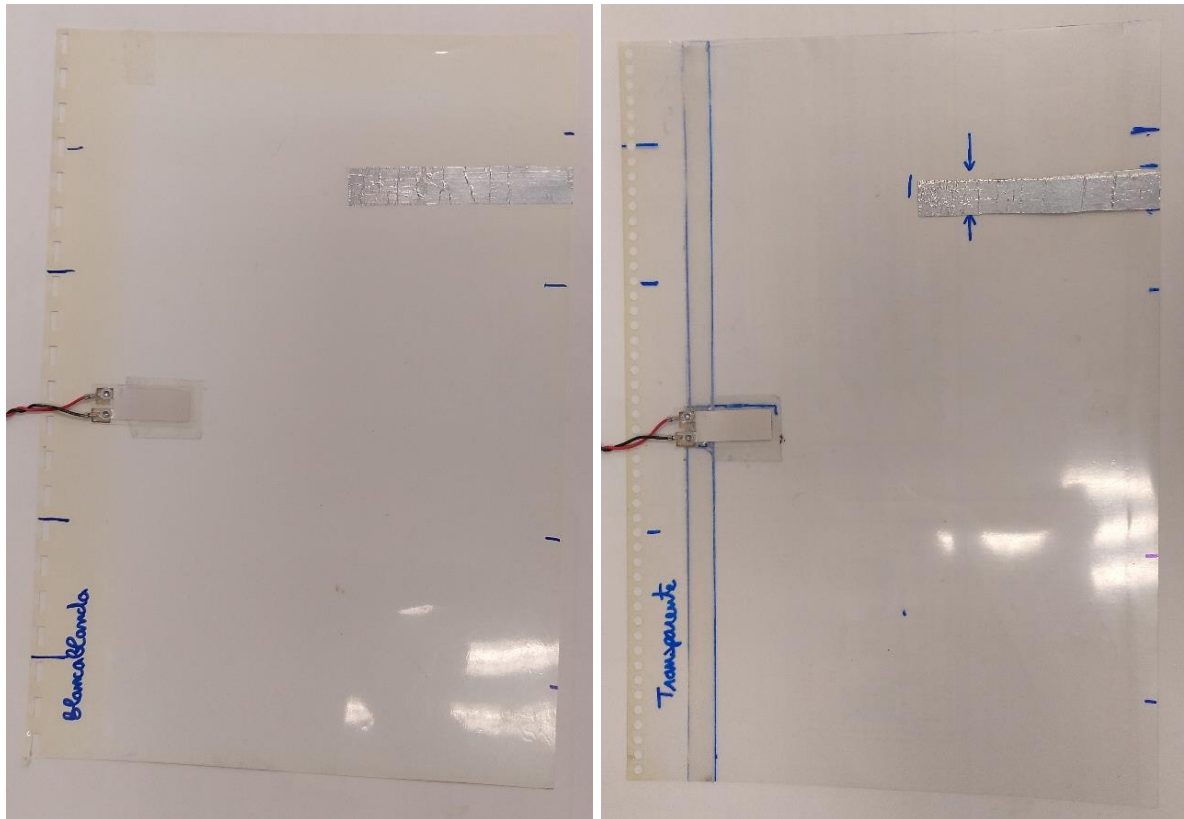


Figura 19. Lamas Blancablanda y Transparente.

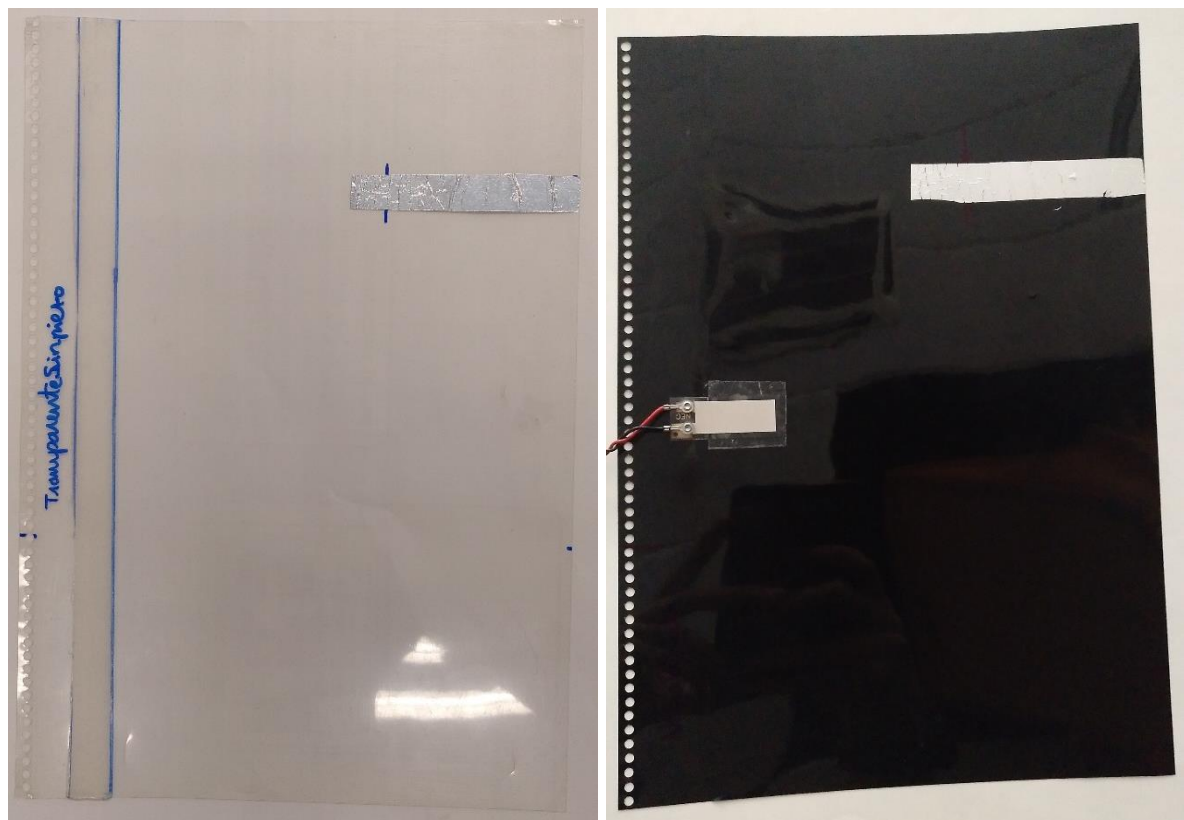


Figura 20. Lamas Transparente Sin Piezo y Negrablanda

Como puede observarse en las Figuras [18-20] existen lamas de distintos materiales. Se debe tener en cuenta que la realización de las imágenes es posterior a terminar todos los ensayos realizados con ellas. Por ello, se incluye una segunda lama del tipo Transparente, que posteriormente se usa en los Ensayos completos túnel de viento.

Para una mejor comprensión de la memoria se va a cambiar la nomenclatura usada en los anteriores pies de foto, algo más visual, a una más directa, numérica, en la Tabla 2. Además, para completar dicha Tabla 2, se realiza una caracterización inicial de las lamas, con la medición de sus dimensiones, usando un calibre digital para el espesor y, además, se mide su masa con una báscula de precisión.

Nomenclatura visual	Lama	e (mm)	w (mm)	l_v (mm)	m (g)	m_{esp} (kg/m ²)	ρ_l (kg/m ³)	m^*
Negradura	# 1	0.45	297	212	25.59	0.4065	903.28	749.55
Blancatranslucida	# 2	0.4	297	210	21.95	0.3519	879.70	729.98
Blancablanda	# 3	0.16	299	212	16.31	0.2573	1607.82	1334.18
Transparente	# 4	0.16	297	210	14.08	0.2258	1410.93	1170.80
Transparente-SinPiezo	# 4.1	0.16	297	210	14.08	0.2258	1410.93	1170.80
Negrablanda	# 5	0.16	297	209	14.58	0.2349	1468.03	1218.18

Tabla 2. Nomenclatura usada y mediciones realizadas para las lamas.

$$\text{Peso específico} = \frac{m}{l_v \cdot w} \text{ (Fórmula 3.5)}$$

donde:

m , es la masa de la lama.

Se realizan ensayos colocando un voladizo de 10 cm y 20 cm, además se efectúa una tercera medida empotrando la lama 4 cm. Aunque se debe indicar que, para las dos más rígidas, solo se analizan las mediciones del voladizo de 20 cm y con las otras tres menos rígidas, con el voladizo de 10 cm.

Una vez se han realizado todas las fotografías del ensayo, se debe obtener la deflexión de la lama. Para ello se va a hacer uso del programa *WebPlotDigitizer*, en el que se puede introducir una imagen. A continuación, se definen unos ejes señalando en la imagen y poniendo su equivalencia en las unidades correspondientes, este

proceso se realizó acercando la imagen y observando la cuadrícula del papel milimetrado. Con la imagen calibrada, se definen manualmente los puntos de la deformada, concretamente se eligen 12 puntos a lo largo de la lama. Todo este proceso se puede observar en la Figura 21. Entonces, el programa automáticamente nos proporciona las coordenadas de dichos puntos en base a los ejes planteados.

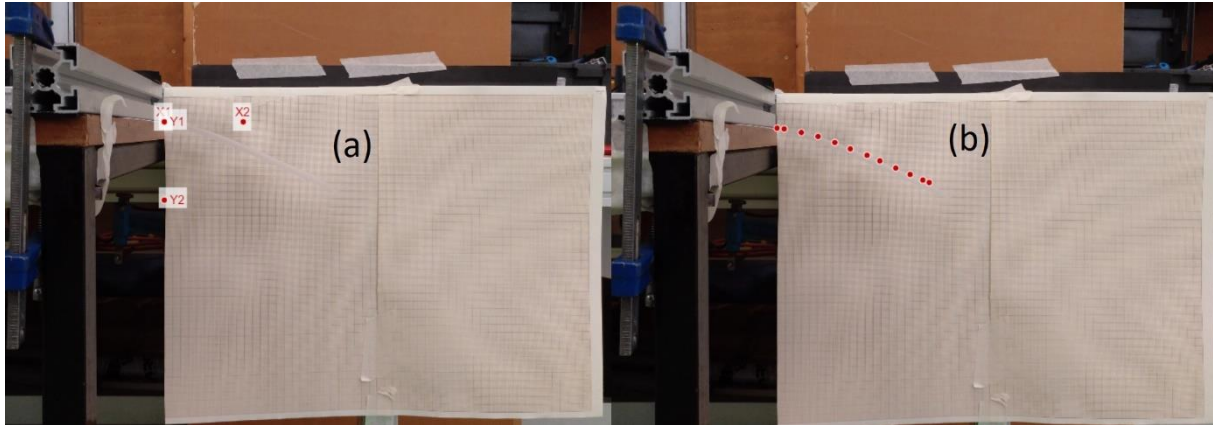


Figura 21. (a) Procedimiento de selección de los ejes y (b) Procedimiento de selección de los puntos de la deformada

Sin embargo, a la flecha máxima se le realiza una corrección debido a que las lamas poseían cierta precarga, que hacía que dicha flecha fuera menor al valor que hubiera conseguido si se hubiera ensayo totalmente plana. Para realizar estas mediciones, se realiza un empotramiento a las lamas con la misma longitud que en los ensayos anteriores, pero se colocan verticalmente. En el apartado de resultados se comprobará que resultó un método fiable.

3.3.3 Procesado de datos

Con todos los datos recogidos en hojas de Excel, por su facilidad de uso, se procesan en el programa Matlab. Para ello, se genera un código, Diagrama 1, donde se introducen todas las dimensiones necesarias de las lamas, así como los datos experimentales obtenidos anteriormente. Con las dimensiones y asumiendo un cierto Módulo de Young, sustituyendo en la Fórmula 3.4, se calcula la deformada teórica para la longitud de la lama. Partiendo del valor del Módulo de elasticidad asumido, se busca el valor experimental del mismo, haciendo coincidir la curva teórica con la flecha máxima corregida con la precarga.

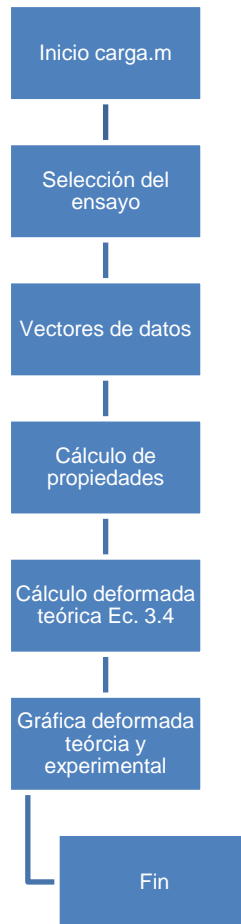
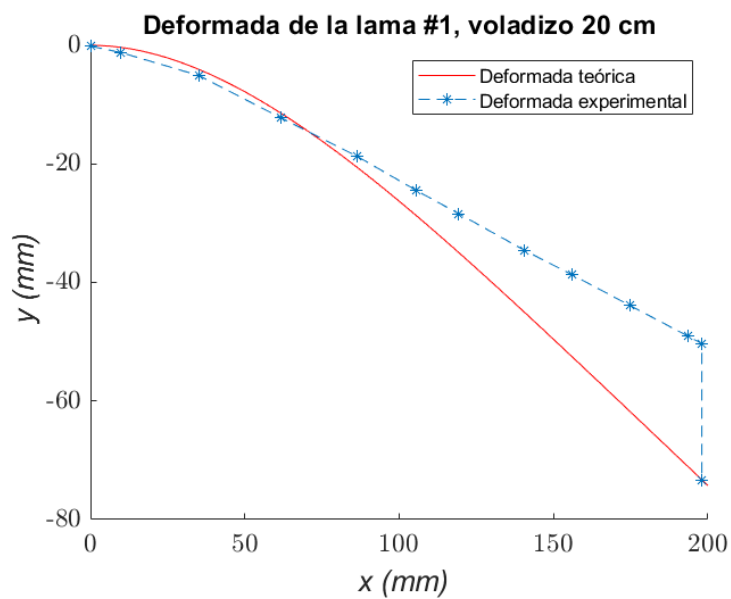


Diagrama 1. carga.m (Cálculo de propiedades de las lamas)

A continuación en la Gráfica 2 se presenta un ejemplo, aunque se desarrollará en el apartado de resultados.



Gráfica 2. Ejemplo procesado de datos ensayos Módulo de elasticidad

3.4 Ensayos completos túnel de viento

Por último, se realizan los ensayos completos en los que se van a obtener gran cantidad de datos. En estos ensayos se va a introducir el cilindro en el túnel de viento y se le coloca la lama con el piezoeléctrico pegado en la mitad. Se van a medir datos de tensión, distancia y fuerzas.

3.4.1 Instalación experimental

La instalación experimental para estos ensayos está basada en el uso de un túnel de viento situado en el laboratorio 003 del edificio A3 de la Universidad de Jaén. Se realizó una calibración previa de los distintos regímenes de velocidad del túnel, obteniendo la siguiente ecuación para la velocidad:

$$U \left(\frac{m}{s} \right) = 0.4696 \cdot f_{ventilador} (Hz) - 0.6287 \text{ (Fórmula 3.6)}$$

Se plantea la Fórmula 3.6, para que a lo largo de los próximos apartados se entienda que cuando se indica que el túnel está a cierta frecuencia, se extrapole a que se está hablando de la velocidad del aire en el túnel, ya que la frecuencia indicada es la del ventilador del propio túnel.

Un esquema de la instalación experimental completa, indicando instrumentos de medida, propiedades y parámetros importantes, se ha presentado en la Descripción del problema en la Figura 12.

Para desarrollar la instalación experimental, se va a explicar el cuerpo y sus accesorios, los instrumentos de medida y el montaje del conjunto.

Como ya se ha indicado a lo largo de este trabajo, el cuerpo de estudio es un cilindro de metacrilato hueco de diámetro 38 mm. Dicho cilindro se ha ranurado, una longitud de 40 cm con un ancho de 6 mm, transversalmente y se le ha acoplado un “postizo” con la misma curvatura y con una pequeña ranura en medio, del ancho de las lamas. La ranura fue impresa en una impresora 3D, a partir de un modelo CAD. En la Figura 22, a continuación, se ejemplifica lo anteriormente indicado con imágenes reales.

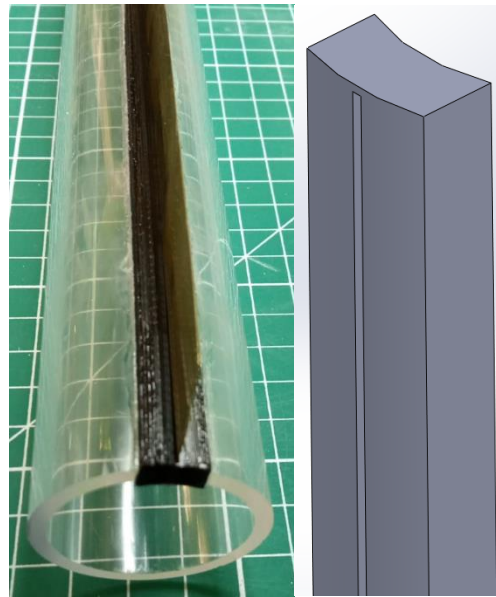


Figura 22. Cilindro y ranura. Detalle CAD ranura.

A continuación, se deben soldar unos cables de longitud media a los piezoeléctricos, para después coger cada una de las lamas y pegarles dicho piezoeléctrico en la mitad de la misma, pero en la zona del empotramiento. De esta manera al introducir la lama por la parte inferior de la ranura, las bornas del piezoeléctrico quedan dentro del cilindro hueco y, por tanto, parte del piezoeléctrico queda en el interior de la ranura. El objetivo es pasar los cables por el interior del cilindro. En la Figura 23, se presenta una imagen real de este detalle.

Además, se coloca un *winglet* para controlar el flujo por encima de la lama, ya que éstas no cubren la altura total del túnel de 40 cm. Tiene un espesor de 3 mm y un ancho (forma semicircular) de 20 cm.

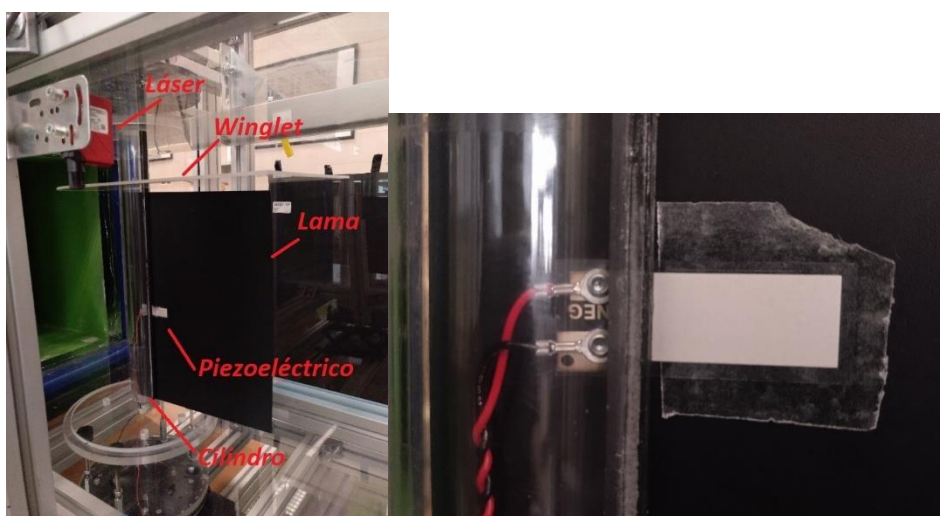


Figura 23. Montaje completo del cuerpo y detalle del piezoeléctrico

En cuanto a los instrumentos de medida, se destacan tres tipos de mediciones, para las que se usan tres dispositivos.

En primer lugar, realizamos mediciones de fuerza con una célula de carga, Figura 24, dispositivo que nos permite medir las fuerzas en los seis ejes. Este tipo de células suelen utilizarse en robots. En concreto, nuestro modelo es M3703A de la empresa Sunrise Instruments.

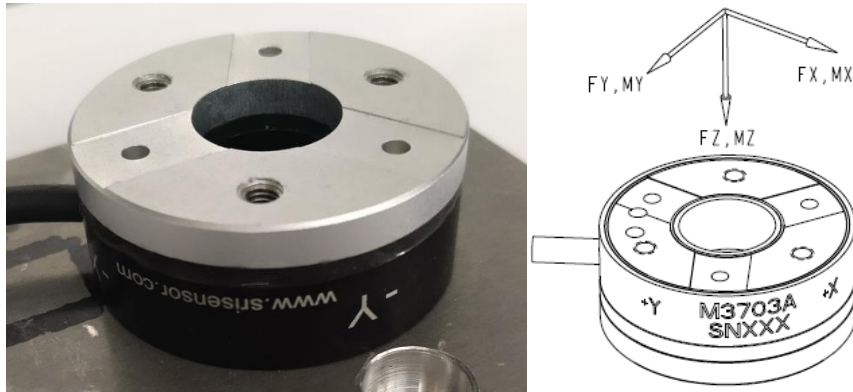


Figura 24. Célula de carga y su esquema.

Por otro lado, se mide la amplitud de la deformación instantánea de la lama con un láser de tensión, Figura 25, es decir, la información de calibración es entre distancia en milímetros y voltaje en voltios. El láser se coloca a 72 mm del extremo volado, debido a que con las lamas más flexibles el puntero láser perdía el contacto con la lama para ciertas velocidades del flujo, a causa de las grandes vibraciones. El láser tiene una precisión de 20 mm como mínimo y 200 mm como máximo, que se corresponden con 1 V y 10 V respectivamente. Se trata del modelo 8/V66-200-S12 de la empresa Leuze electronic.

. Destacar que a la lama se le coloca una pequeña tira de cinta de color de aluminio para mejorar la visión del láser.



Figura 25. Láser para medir la amplitud y colocación.

Para captar la señal emitida por el láser y medir la tensión generada por el piezoeléctrico, se utiliza una tarjeta de adquisición, Figura 26, que es capaz de recoger con gran precisión voltajes de entrada. Este dispositivo se conecta a un ordenador y mediante la *toolbox* de Matlab *Analog input recorder*, se realiza la grabación de las señales. Se trata de la tarjeta de adquisición NI USB-6009 de la empresa *National Instruments*.



Figura 26. Tarjeta de adquisición

Para montar el cuerpo por la parte superior del túnel se coloca un perfil, al que va unido una placa de aluminio y la célula de carga, a continuación se diseñó una plataforma circular de aluminio para evitar las vibraciones, a la que se le une una plataforma rotativa de precisión, por si se probaban diferentes ángulos de ataque, sobre la que se enrosca el cuerpo. Este montaje se observa en la Figura 27.

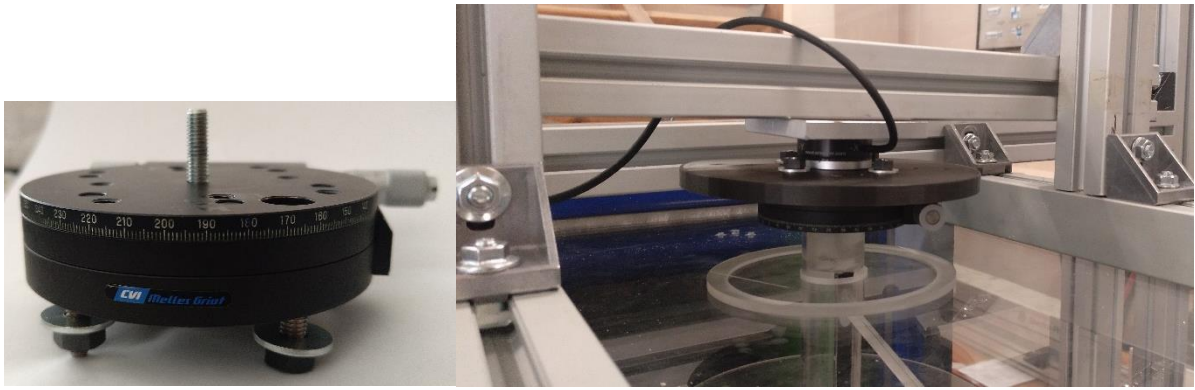


Figura 27. Plataforma rotativa y montaje superior completo.

En la Figura 27, hay que destacar que la placa redonda negra está fabricada en impresión 3D, pero se sustituyó por una fabricada en aluminio para generar un mejor anclaje y reducir la oscilación del cuerpo. Por último, se presenta una imagen en la Figura 28, del montaje real completo:

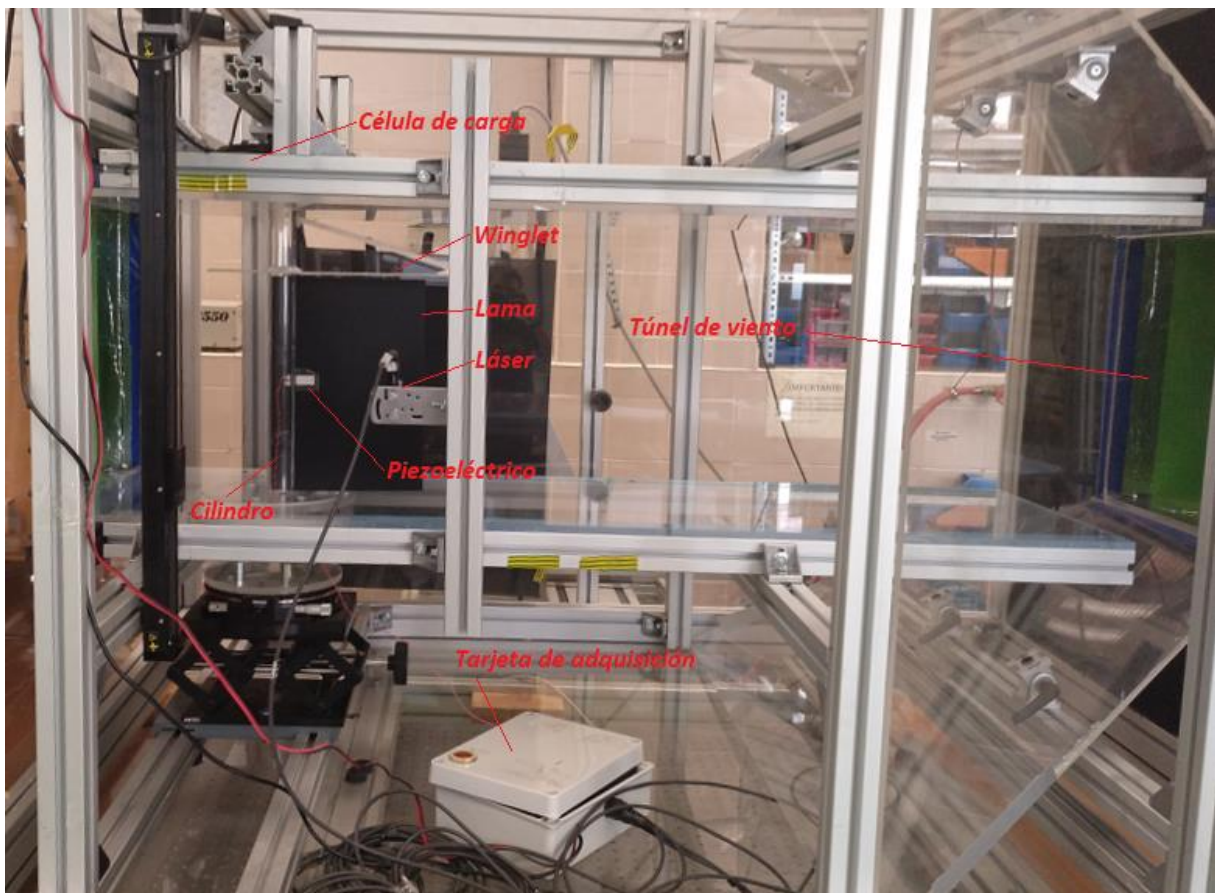


Figura 28. Montaje real completo.

3.4.2 Procedimiento de medida

En primer lugar, destacar que se tuvieron que configurar todos los dispositivos para poder usarlos con el ordenador personal y así poder realizar los ensayos con mayor facilidad.

Para realizar los ensayos, con el cuerpo ya montado, se debía encender la fuente de alimentación a una tensión de 29 V, teniendo en cuenta no sobrepasar los 30 V. La fuente suministra tensión tanto a la célula de carga, como al láser. A continuación, se realizaba un primer encendido del túnel hasta la frecuencia a ensayar, ya sea 10 Hz (velocidad 4.07 m/s y Re 10073) o 20 Hz (velocidad 8.76 m/s y Re 21704), se realizaron algunos ensayos a 25 Hz (velocidad 11.11 m/s y Re 27519) y 30 Hz (velocidad 13.46 m/s y Re 33334), y se apaga, esto se realiza para memorizar la frecuencia. Con todo esto listo, ya se podría realizar el ensayo, para ello se debe iniciar la grabación en el programa de la célula de carga y en la aplicación de adquisición de datos en Matlab, además de iniciar el cronómetro. En estos instantes se estaría grabando la primera zona de vacío, a los 30 s se enciende el ventilador, que tarda un cierto tiempo en alcanzar la frecuencia memorizada, según los ensayos realizados a los 50 s, empezaría el tramo de señal útil, que acabaría a los 135 s desde el inicio, para apagar el túnel a los 145 s, quedando de nuevo en vacío a los 160 s y acabando las grabaciones 180 s después de haberlas iniciado. Por tanto, se tienen ensayos de 3 min, con una señal útil de 85 s (1:25 min), un 47.22 %.

Esto se repite dos veces para cada frecuencia y se varía la frecuencia dos veces ($Re = 10073$ y 21704). Además, al finalizar con la lama en cuestión se debe desmontar el cuerpo al completo y desconectar el piezoeléctrico de la tarjeta de adquisición. También, destacar que todos estos ensayos se repiten para cada lama desmontando el láser de su posición, para así poder estudiar cómo afecta al flujo la colocación del láser en ese lugar.

Por último, se presenta la Tabla 3 con el total de ensayos realizados:

Lama	Número de ensayos	Detalles
# 1	8	2 ensayos para 10 y 20, 2 ensayos para 10 y 20 sin el láser
# 2	8	2 ensayos para 10 y 20, 2 ensayos para 10 y 20 Hz sin el láser
# 5	8	2 ensayos para 10 y 20 Hz, 2 ensayos para 10 y 20 Hz sin el láser
# 3	8	2 ensayos para 10 y 20 Hz, 2 ensayos para 10 y 20 Hz sin el láser
# 4	8	2 ensayos para 10 y 20 Hz, 2 ensayos para 10 y 20 Hz sin el láser
Tubo	8	2 ensayos para 10, 20, 25 y 30 Hz
# 4.1	6	2 ensayos para 10 y 20 Hz, 1 ensayos para 10 y 20 Hz sin el láser
TOTAL	54	---

Tabla 3. Total de ensayos completos realizados.

Se han realizado además ensayos adicionales a distintas frecuencias (25 y 30 Hz, es decir a $Re = 27519$ y 33334) para hacer una estimación inicial del potencial conversor de energía a mayores números de Reynolds, y en consecuencia menor rigidez relativa de las lamas. No obstante, problemas de vibraciones estructurales del sistema experimental han hecho limitar el estudio a frecuencias menores de 10 y 20 Hz del túnel, es decir a $Re = 10073$ y 21704 , dejando una posible extensión del estudio para futuros trabajos.

3.4.3 Procesado de datos

Para el procesado de los datos se usan diversos programas generados específicamente para este trabajo, en Matlab. En primer lugar, se van a explicar algunas partes destacables de los mismos y en segundo lugar, se van a realizar los diagramas de bloques de los programas.

De los códigos realizados, se pretende destacar dos cálculos, la amplitud del láser y el cálculo de los diferentes coeficientes transversales, el resto de elementos quedan suficientemente explicados en los posteriores diagramas de bloques.

La amplitud de la vibración medida por el láser, se calcula escalando la señal analógica de la tensión, a una señal de distancia en milímetros.

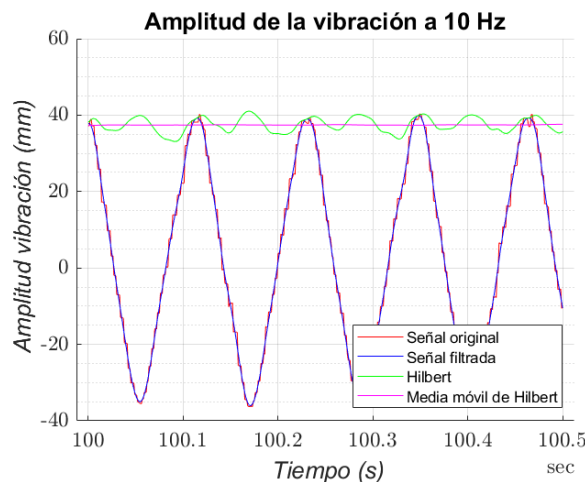
$$Distancia (mm) = \frac{200 mm - 20 mm}{10 V - 1 V} \cdot (Tensión (V) - 1 V) + 20 mm \quad (Fórmula 3.7)$$

Una vez, se tiene la distancia en milímetros, se decide hacer un filtrado con spline de la señal, para reducir el ruido que pueda existir. Para ello en primer lugar, se hace el cero de la señal con los valores iniciales entre 0 y 20 s. A continuación, se introduce la señal en la función creada para hacer spline, teniendo en cuenta que en ella, se realiza un nuevo cero con la media de los valores introducidos. Como resultado se obtiene la señal filtrada, la señal habiéndole aplicado la transformada de Hilbert y calculando el módulo de las amplitudes real y compleja, la media móvil de este último valor y, por último, el cero generado dentro de la función para poder usar los spline y que es necesario si se quiere graficar todos los resultados en la misma figura. La amplitud final será la media de la media móvil, obteniendo un único valor para cada ensayo. Por ejemplo, para la lama # 5 se muestra la Gráfica 3.

$$a_v = spline(a_{vo}) \rightarrow a_{vr} + a_{vi} \cdot j = H(a_v) \rightarrow \widehat{a}_v = \sqrt{a_{vr}^2 + a_{vi}^2} \rightarrow \widehat{A}_v = \overline{\widehat{a}_v} \quad (Fórmula 3.8)$$

donde:

Señal original de la amplitud instantánea de la vibración, a_{vo} , señal filtrada, a_v , resultado de la transformada de Hilbert, $a_{vr} + a_{vi} \cdot j$, módulo de las amplitudes, \widehat{a}_v y media móvil del módulo anterior, \widehat{A}_v .

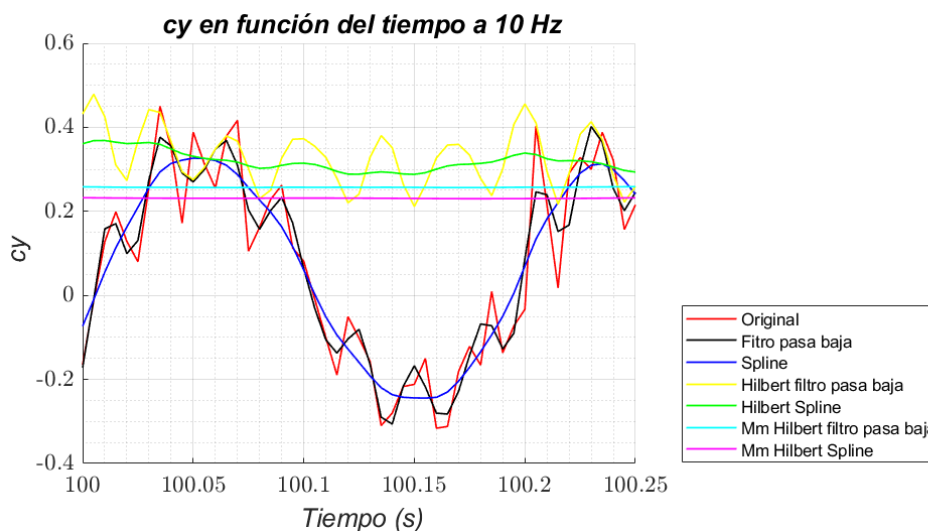


Gráfica 3. Ejemplo del cálculo de la amplitud de la vibración

En cuanto a los coeficientes transversales de fuerza, destacar que se van a calcular los siguientes valores, aplicando el valor RMS a la señal original (habiéndole restado la media) y multiplicando por raíz de dos, aplicando la función de Hilbert a la señal original (en este caso aparte de hacer el cero a la señal hay que aplicar la función de Hilbert, hacer el valor absoluto, la media móvil y, por último, la media), aplicando un filtro pasa baja a 48 Hz y la función de Hilbert (mismo proceso) y aplicando el filtro spline y la función de Hilbert (mismo proceso).

En señales eléctricas, el valor RMS representa el voltaje en corriente continua que produce el mismo efecto de disipación de calor al atravesar una resistencia, que la corriente alterna en cuestión.

Por ejemplo, para la lama # 1 se muestra la Gráfica 4:



Gráfica 4. Ejemplo de cálculo del coeficiente transversal.

A continuación, se presenta el Diagrama 2 correspondiente al código realizado en Matlab para el análisis tanto de las señales provenientes de la tarjeta de adquisición (láser y piezoeléctrico), como de la célula de carga (fuerzas de arrastre y transversal) para obtener los resultados que en el próximo apartado, Resultados, se analizarán.

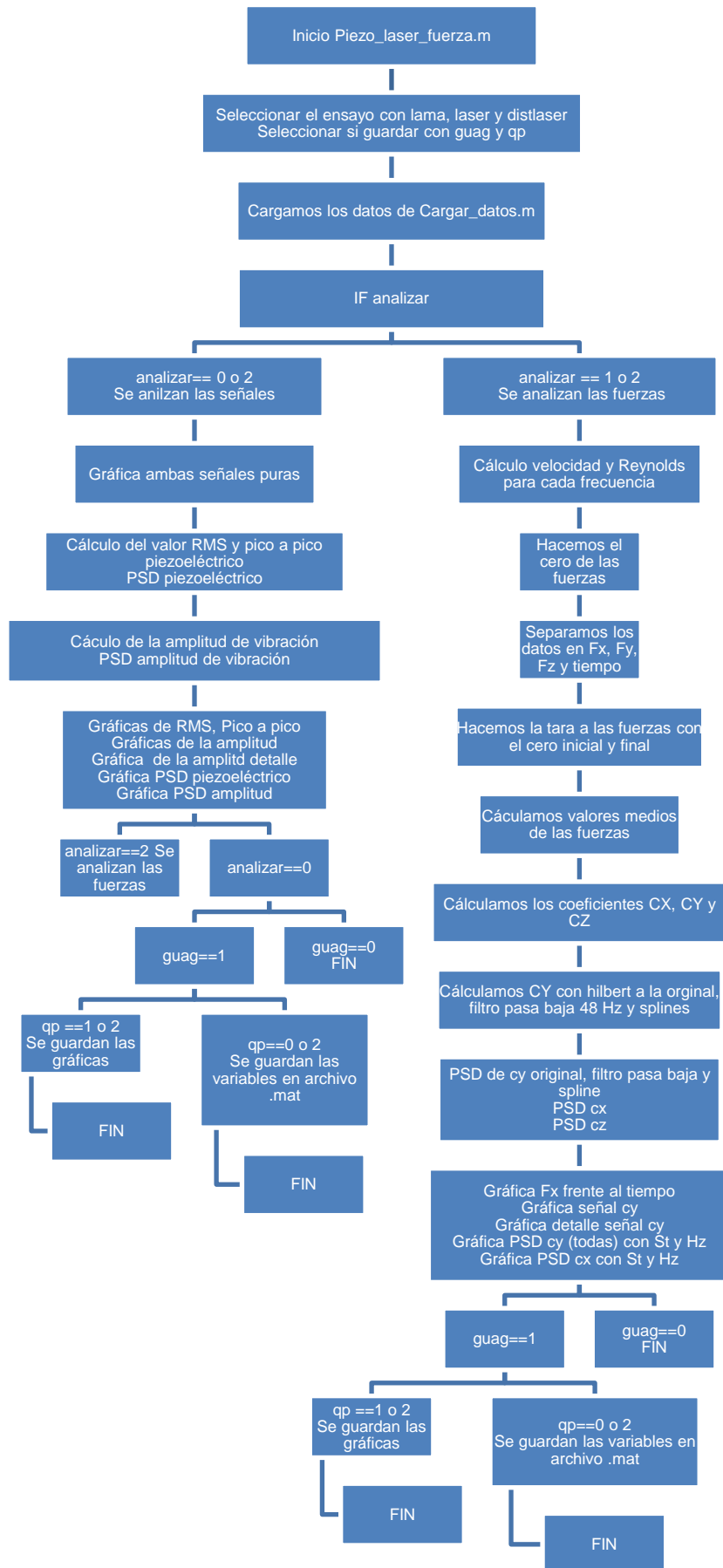


Diagrama 2. Piezo_laser_fuerza.m (Análisis de las señales del láser, piezoeléctrico y fuerzas)

En segundo lugar, se puede observar el Diagrama 3 del código correspondiente al análisis global de los resultados, para su recopilación en variables.

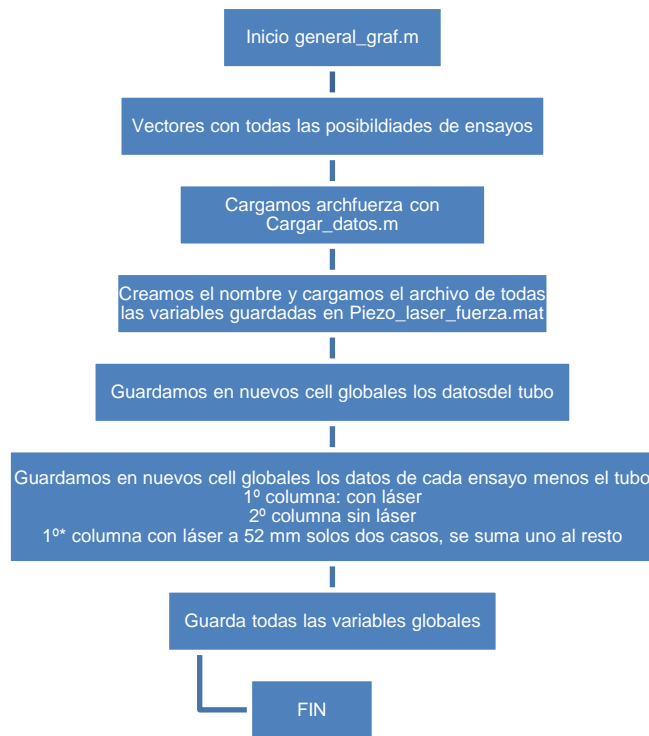


Diagrama 3. general_graf.m (Recopilación y guardado de los resultados globales)

El Diagrama 4 describe la función realizada para cargar de forma fácil todos los archivos de datos y variables de Matlab necesarias en los distintos análisis.

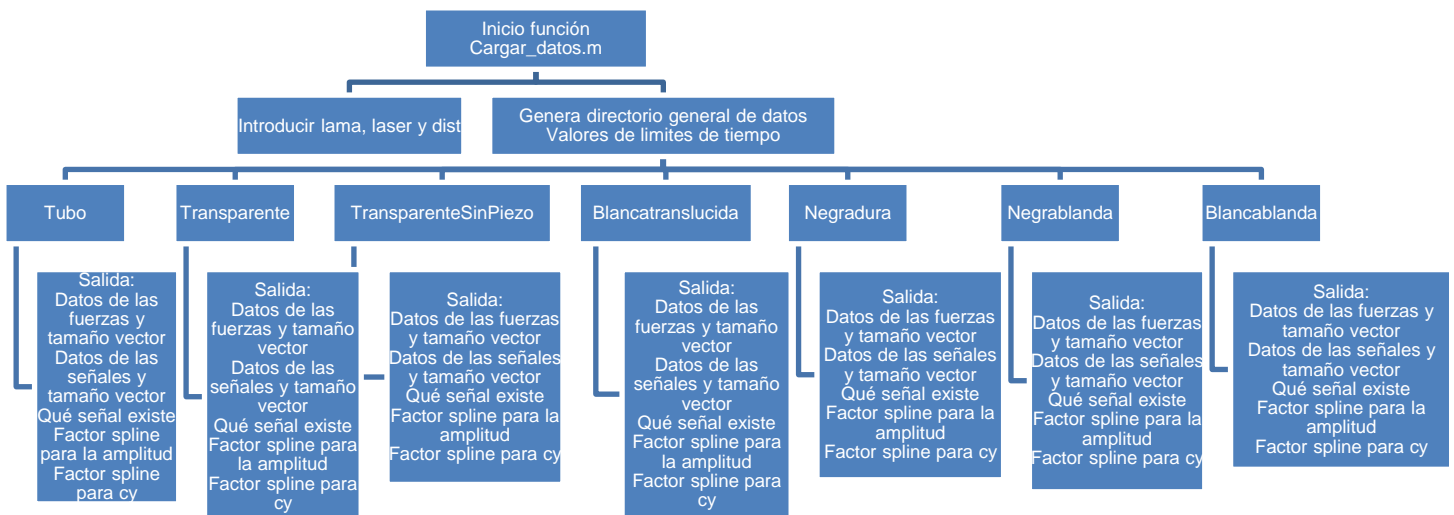


Diagrama 4. Cargar_datos.m (Abrir los archivos y variables de datos)

Los siguientes códigos, Diagrama 5, se corresponden con las funciones de filtrado y obtención de la amplitud, comentadas anteriormente.

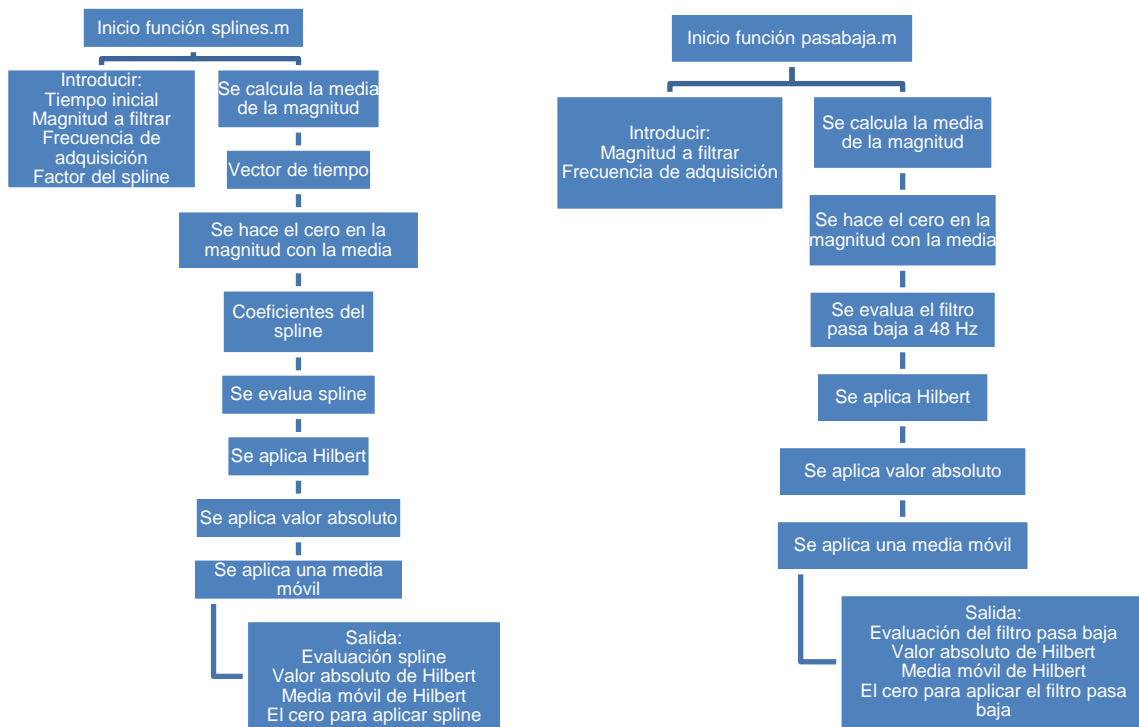


Diagrama 5. splines.m y pasabaja.m (Filtrado de las señales y obtener amplitud)

Por último, se presenta el Diagrama 6 para convertir los archivos de datos ofrecidos por el programa de lectura de la célula de carga a variables de Matlab, lo que reduce en gran medida el tiempo de computación.

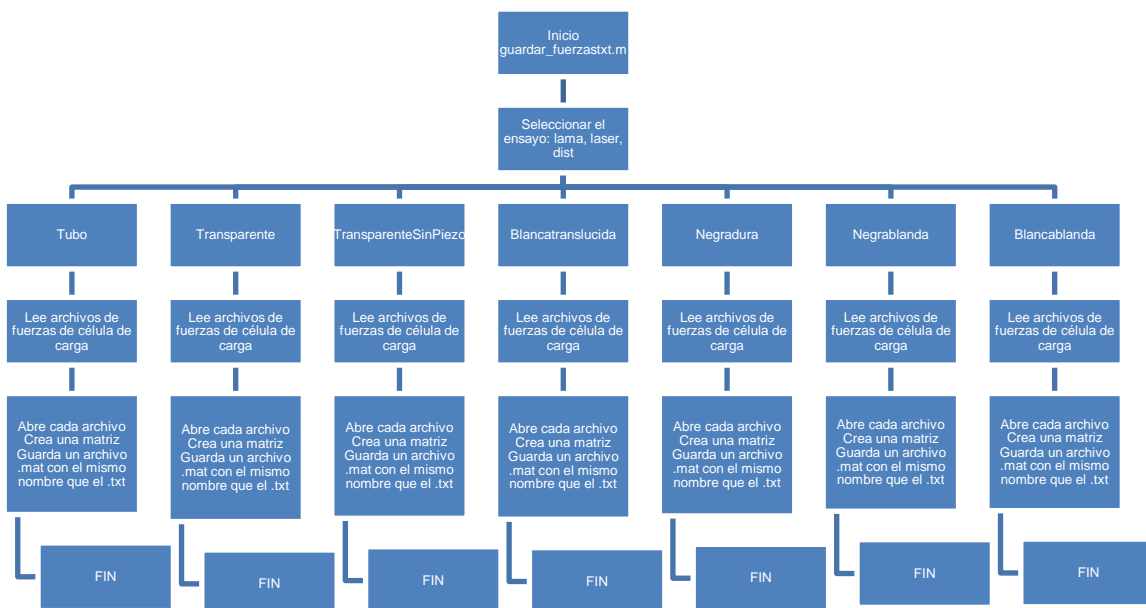


Diagrama 6. guardar_fuerzastxt.m (Convertir de archivos de datos a variables de Matlab)

3.5 Ensayos de estroboscopia

Adicionalmente, al finalizar todos los ensayos completos en el túnel de viento, se realizaron unos nuevos ensayos. Estos consistían en realizar mediciones de la deformada instantánea de las distintas lamas a un $Re = 10073$ (10 Hz), mediante estroboscopia. Esta técnica consiste en la colocación de un foco de luz frente a una cámara y en medio de ambos situar el objeto a estudiar, en este caso la lama vibrando. Debido a las limitaciones de material y tiempo, se han realizado imágenes con un móvil y un panel led de pequeñas dimensiones. A modo de ejemplo, las siguientes figuras:

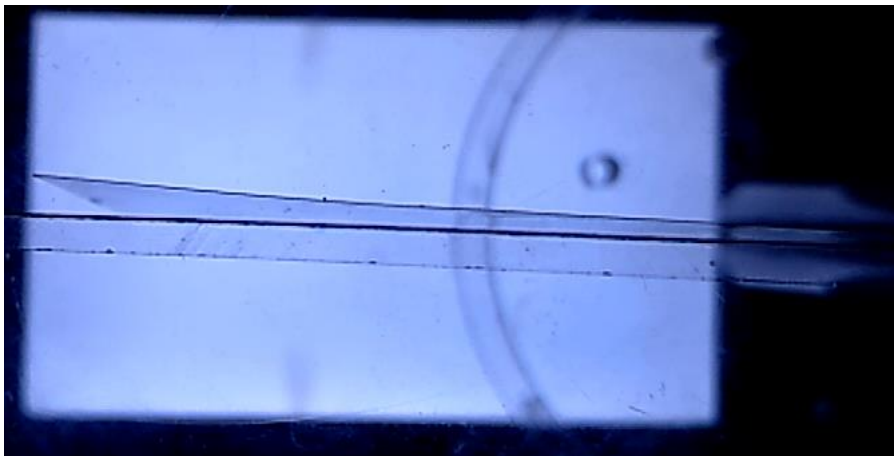


Figura 29. Estroboscopia para la lama # 3.



Figura 30. Estroboscopia para la lama # 5.

Como se observa en la Figura 30, existen limitaciones con la técnica en cuanto a la amplitud focal de la cámara usada y a las dimensiones del panel led, que en caso de grandes deformaciones no era capaz de cubrirlas, por ello tampoco se han realizado ensayos a $Re = 21704$ (20 Hz). Aunque, estas imágenes sí son útiles para justificar el uso de las ecuaciones basadas simplemente en el primer modo de vibración. Esto es no obstante, una aproximación pues la deformación, no es completamente bidimensional, observándose una ligera deformación torsional, que se ha obviado en el análisis.

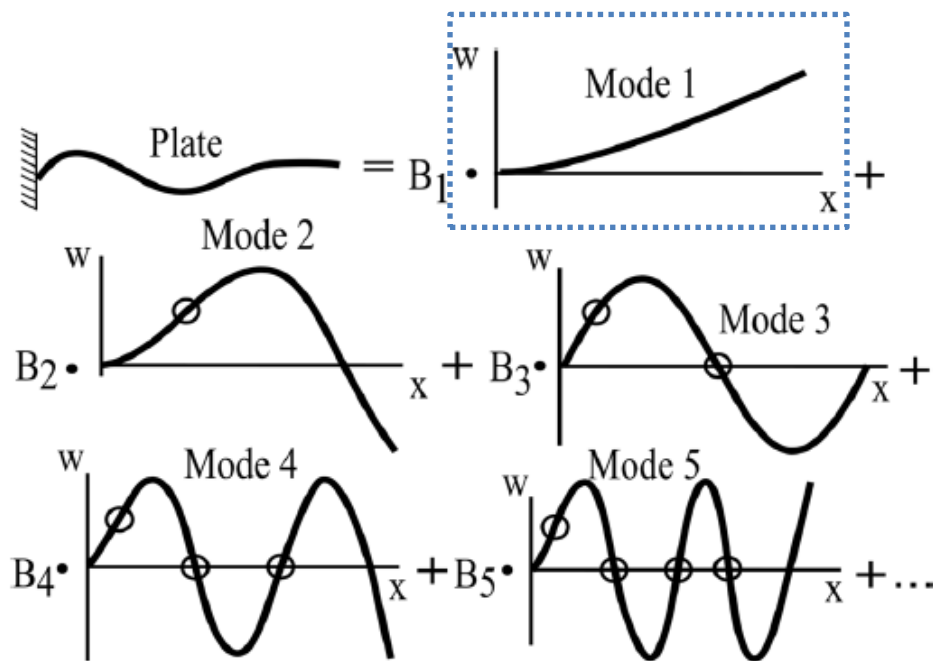


Figura 31. Combinación de modos de vibración en la deformada [9]

3.6 Ensayos Balance de energía

Para calcular el trabajo mecánico desarrollado por la deformación de la lama, se realizan experimentos con la lama # 4 (de amplitud de vibración elevada), incluyendo el láser, pero en vacío (sin flujo incidente). Estos ensayos consisten en sacar la lama del estado de reposo y grabar hasta que vuelva al mismo.

Mediante el procesado en Matlab, se puede obtener la frecuencia natural de vibración de la lama, f_n , el coeficiente de amortiguamiento, c , y la constante elástica, k . Estos coeficientes se introducirían en la Fórmula 2.14.

Además, se obtiene el coeficiente de acoplamiento electromecánico, θ , a partir de la información recogida en la Tabla 1 de Huseyin et al. [13], se sabe que los

piezoeléctricos se corresponden, gracias al dato de la capacitancia de 1.38 nF, que coincide con la ficha de técnica de nuestro producto.

Una vez evaluada la Fórmula 2.14, se puede sustituir la fuerza aplicada, F , en la Fórmula 2.13, calculando así la potencia mecánica, P_m .

Por otro lado, la potencia eléctrica, P_e , se calcula con la tensión eficaz o RMS y asumiendo una resistencia de 100 k Ω , para generalizar, Fórmula 2.16. Como la tensión se mediría en paralelo es útil la tensión de vacío medida en otros ensayos, debido a que se trata de un circuito con una sola resistencia y el piezoeléctrico.

Como ya se introdujo en la Descripción del problema, se calculan dos tipos de rendimientos, el total, η_t , evalúa la potencia eléctrica, P_e , en función de la potencia disponible en el flujo, P_v , y el electromecánico, η_{me} , la potencia eléctrica en función de la potencia mecánica de deformación de la lama, P_m .

Este procesado de datos, se ha realizado mediante un programa de Matlab, descrito en el Diagrama 7:

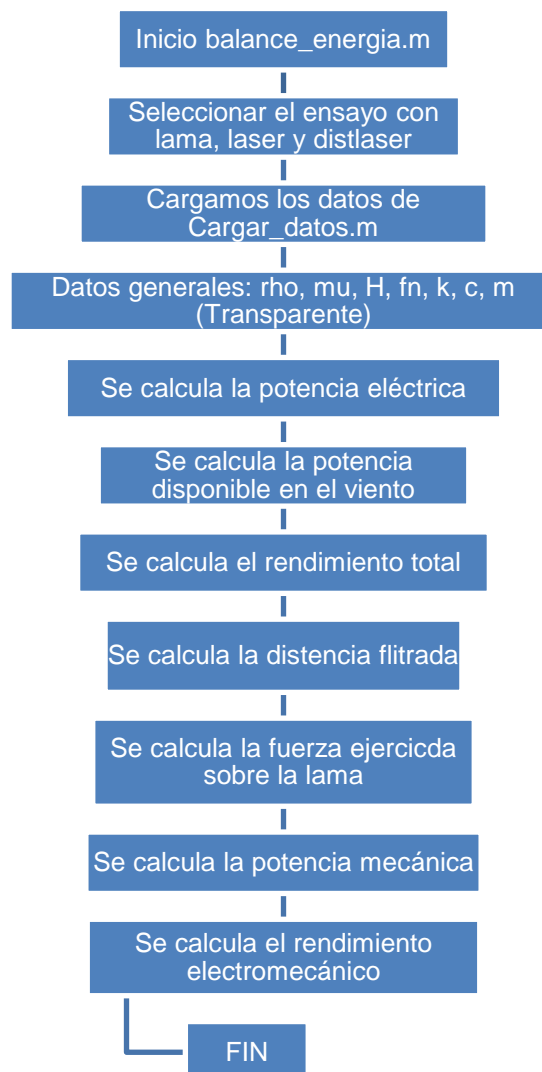


Diagrama 7. Balance_energia.m (Cálculo de los rendimientos total y electromecánico)

4 Resultados

A continuación, se van a comentar los resultados obtenidos del Módulo de elasticidad para caracterizar cada lama, los resultados que se pueden extraer de los ensayos completos, coeficientes de fuerzas, amplitudes y frecuencias de vibración y señal eléctrica de los piezoeléctricos. Por último, se realizará una comprobación de la deformada de las lamas con la estroboscopia y un balance de energía para comprobar la relación entre el recurso mecánico y la obtención de energía eléctrica.

4.1 Módulo de elasticidad

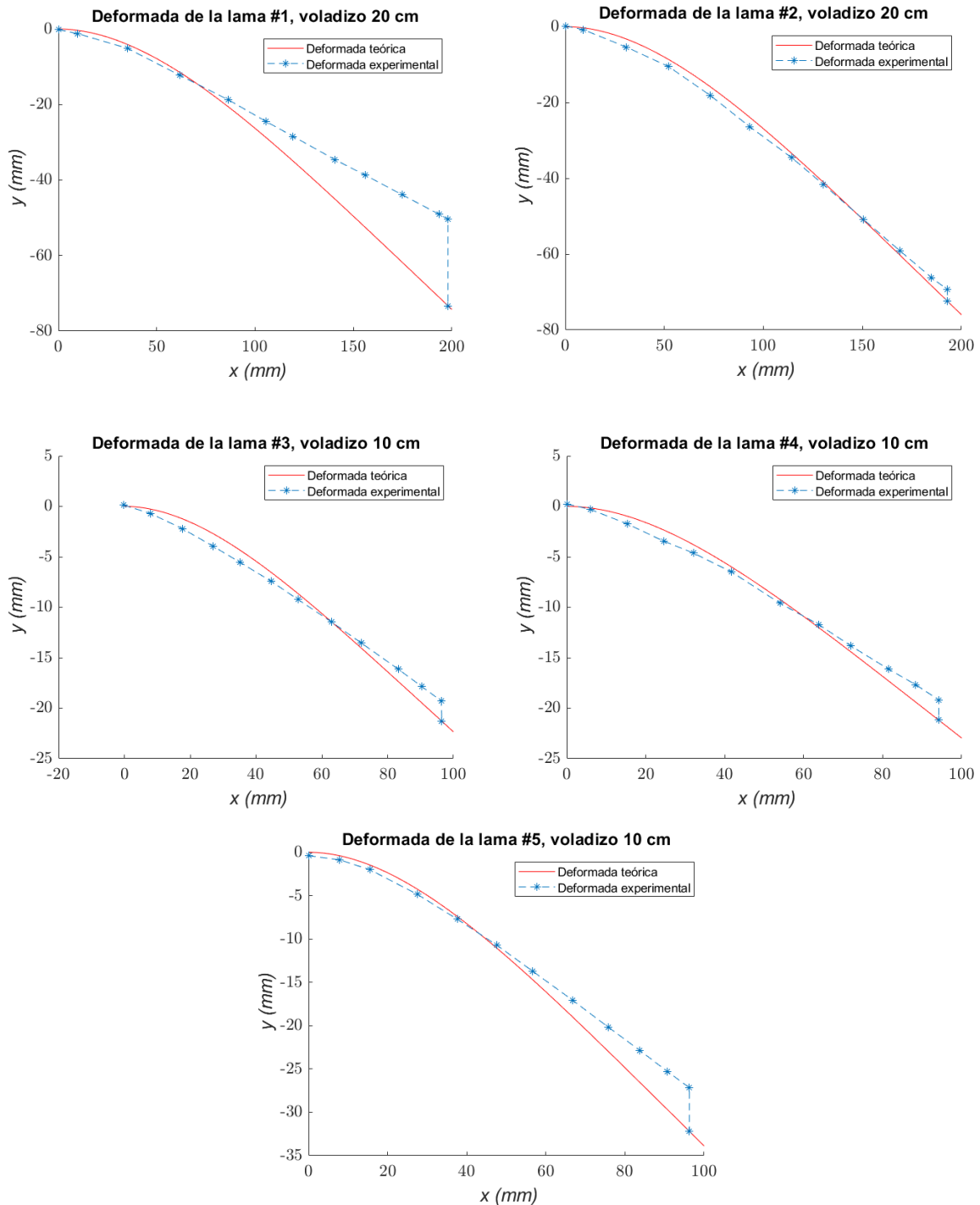
En primer lugar, en la Tabla 4 se recogerán los datos de las mediciones realizadas en el laboratorio de la precarga de cada lama.

Lama	Offset (mm)
# 1	23
# 2	3
# 3	2
# 4	2
# 5	5

Tabla 4. Mediciones realizadas a las lamas.

Puede observarse en la Tabla 4 que la lama # 1 tenía una gran deformación previa a la realización del ensayo, debido a la posición en que se encontraba guardada originalmente.

Con los datos recopilados y los valores de la flecha experimental, se usa el programa correspondiente de Matlab, Diagrama 1, para comprobar el Módulo de elasticidad que tendría cada lama, si se asumen correctos los valores sin añadir la corrección y añadiendo la corrección de la precarga. Esto se realiza de forma manual ajustando la deformada teórica, como puede verse en la Gráfica 5.



Gráfica 5. Gráficas del ajuste de la deformación teórica a la experimental

Una vez obtenidos los valores del Módulo de elasticidad para cada una de las lamas, se recopilan los datos en una tabla y se calcula la rigidez flexural para comprobar la coherencia de los datos, en cuanto a las que a simple vista se consideran más rígidas o más flexibles.

En las Tablas 5 y 6, se realiza la recopilación anteriormente indicada y se ordenan las lamas según su rigidez flexural de menor a mayor. Como se puede ver

los datos obtenidos son muy coherentes con la realidad, ya que se obtiene que la lama más rígida es la # 1, como sucede en la realidad y la lama menos rígida es la # 5, hecho que se demuestra con su comportamiento en el túnel de viento y que se verá en los resultados de esos ensayos.

Sin la corrección			
Lama	E (N/m²)	I (m⁴)	EI (N·m²)
# 5	1.4140E+09	7.1339E-14	1.0087E-04
# 4	1.8580E+09	7.1680E-14	1.3318E-04
# 3	2.1500E+09	7.2363E-14	1.5558E-04
# 2	1.6930E+09	1.1200E-12	1.8962E-03
# 1	1.9430E+09	1.6099E-12	3.1280E-03

Tabla 5. Propiedades de las lamas sin la corrección (Módulo de elasticidad y rigidez flexural)

$$I = \frac{1}{12} \cdot l_v \cdot e^3 \text{ (Fórmula 4.1)}$$

donde,

I es el momento de inercia de la lama

Corrección			
Lama	E (N/m²)	I (m⁴)	EI (N·m²)
# 5	1.1920E+09	7.1339E-14	8.5036E-05
# 4	1.6820E+09	7.1680E-14	1.2057E-04
# 3	1.9510E+09	7.2363E-14	1.4118E-04
# 2	1.6220E+09	1.1200E-12	1.8166E-03
# 1	1.3340E+09	1.6099E-12	2.1476E-03

Tabla 6. Propiedades de las lamas con la corrección (Módulo de elasticidad y rigidez flexural)

Se destaca en la Tabla 6 que, como se indicó en anteriores apartados, la lama # 1 era de polipropileno con un módulo de elasticidad de 1300 MPa, en nuestros resultados se ha obtenido que tiene un valor de 1334 MPa, lo que supone una diferencia relativa de un 2.62 %, por lo que se puede asegurar que la técnica tiene una gran precisión. El resto de lamas pueden ser polietileno, ABS u otros plásticos con diferentes aditivos.

4.2 Resultados de los Ensayos completos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con el montaje completo, cilindro con la lama y el piezoeléctrico montados, así como incluidos todos los instrumentos de medida indicados.

Los resultados obtenidos, se dividen en cuatro partes:

1. Cálculo de los números adimensionales más interesantes en este tipo de problemas.

2. Gráficas de amplitud de la vibración, A^* , y frecuencia de vibración adimensionales, f^* .

3. Gráficas de los coeficientes de arrastre, C_x , y transversal, \widehat{C}_y .

4. Gráficas correspondientes a la tensión RMS, V_{RMS} , y pico a pico, V_{pp} .

Todas estas gráficas se realizan en función del número de Cauchy, Ca , y la rigidez a flexión adimensional, K^* , y para los dos Reynolds estudiados ($Re = 10073$ y 21704). La diferencia, entre las gráficas realizadas frente a las dos magnitudes dimensionales, es que una representa el comportamiento inverso a la otra, por tanto, las gráficas se obtendrán con la misma distribución pero en sentido inverso del eje OX.

Se debe destacar que, respecto a los anteriores ensayos, se introduce un nuevo caso que es el llamado # 4.1, es decir, se ensaya una lama # 4 pero sin colocarle el piezoeléctrico. Este procedimiento se realizó porque se quiso hacer una comprobación del efecto del piezoeléctrico. Como conclusión se obtuvo, que en la mayoría de parámetros no hay diferencias para $Re = 10073$ (10 Hz), pero existen pequeñas diferencias si se aumenta la velocidad a $Re = 21704$ (20 Hz).

Por otro lado, también se debe señalar, que se realizaron ensayos desplazando el soporte del láser y el propio láser a una zona donde no tuviera efecto sobre el flujo, para ver si existían perturbaciones en el coeficiente de arrastre, C_x , y en la amplitud del coeficiente transversal, \widehat{C}_y . Se concluye que no existían variaciones de un caso a otro.

En primer lugar, se ha realizado una tabla con los coeficientes adimensionales de las lamas, tanto para la velocidad correspondiente a un $Re = 10073$, como para $Re = 21704$. Destacar que las Tablas 7 y 8 están ordenadas de menor a mayor según el número de Cauchy, Ca , Fórmula 2.3. Este orden nos puede servir para interpretar mejor los resultados de todas las gráficas posteriores.

Lama	K^*	Ca	f_n	U^*
# 1	0.056318221	17.75624285	2.884574055	37.10572462
# 2	0.049780839	20.08805027	2.931603086	36.51047136
# 3	0.003727241	268.2949453	0.929676419	115.1306071
# 4	0.003303827	302.6792651	0.942900105	113.5159599
# 4.1	0.003303827	302.6792651	0.942900105	113.5159599
# 5	0.002382432	419.7391109	0.787249131	135.9597697

Tabla 7. Coeficientes adimensionales de las lamas a $Re = 10073$ (10 Hz).

Lama	K^*	Ca	f_n	U^*
# 1	0.012131821	82.42785939	2.884574055	79.9470402
# 2	0.010723567	93.25255332	2.931603086	78.66452283
# 3	0.000802906	1245.476209	0.929676419	248.0574458
# 4	0.000711696	1405.094767	0.942900105	244.5785683
# 4.1	0.000711696	1405.094767	0.942900105	244.5785683
# 5	0.000513213	1948.508855	0.787249131	292.9354239

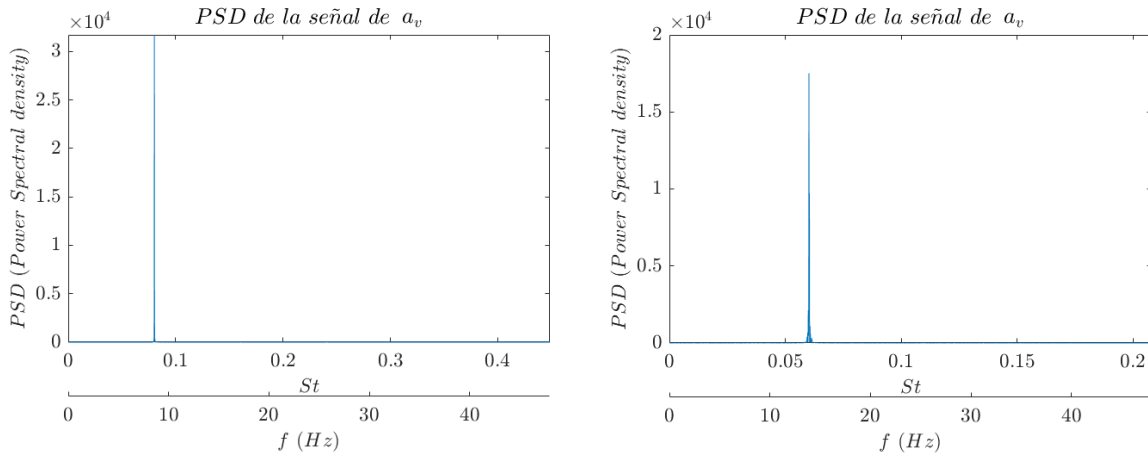
Tabla 8. Coeficientes adimensionales de las lamas a $Re = 21704$ (20 Hz).

Respecto a las Tabla 7 y 8, la frecuencia natural de las lamas, f_n , es baja, obteniéndose por ello una velocidad reducida, U^* , muy alta. Esto puede deberse a que en la caracterización del Módulo de elasticidad se introducen errores.

4.2.1 Amplitud y frecuencia de la vibración

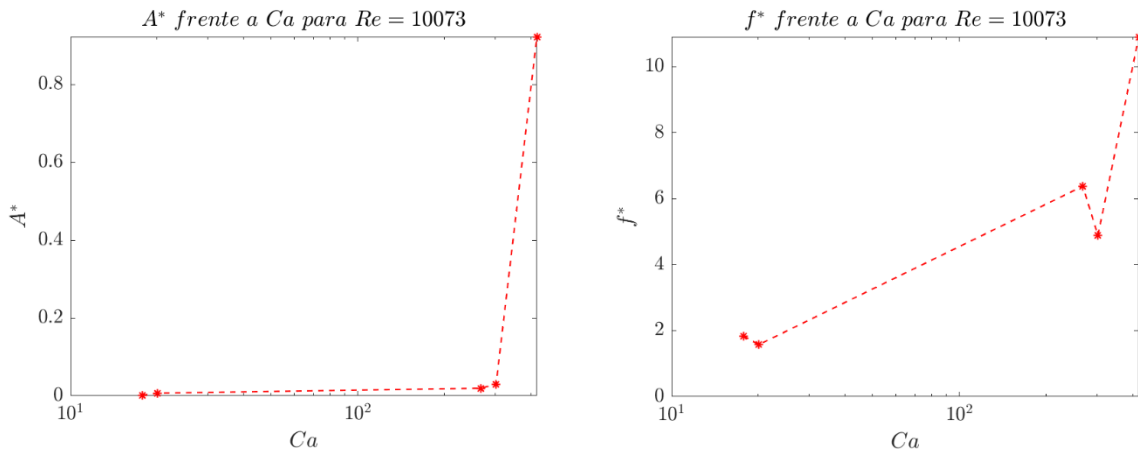
En este primer apartado de gráficas resultado, se presentan las gráficas de la amplitud y frecuencia adimensionales, A^* y f^* , de cada lama frente al número de Cauchy, Ca , y a la rigidez a flexión adimensional, K^* . Teniendo en cuenta las Tablas 7 y 8. se pueden saber los valores correspondientes a cada lama.

Sin embargo, en primer lugar, se muestran, en la Gráfica 6, dos gráficas que ejemplifican el cálculo de la frecuencia de vibración de las lamas. En ellas se ha realizado un PSD (Power Spectral Density) o cálculo de la densidad espectral, que nos proporciona la frecuencia a la que existe mayor potencia en la señal. Destacar, que se muestra en unidades de frecuencia pero también con el número adimensional Strouhal, Fórmula 2.9.

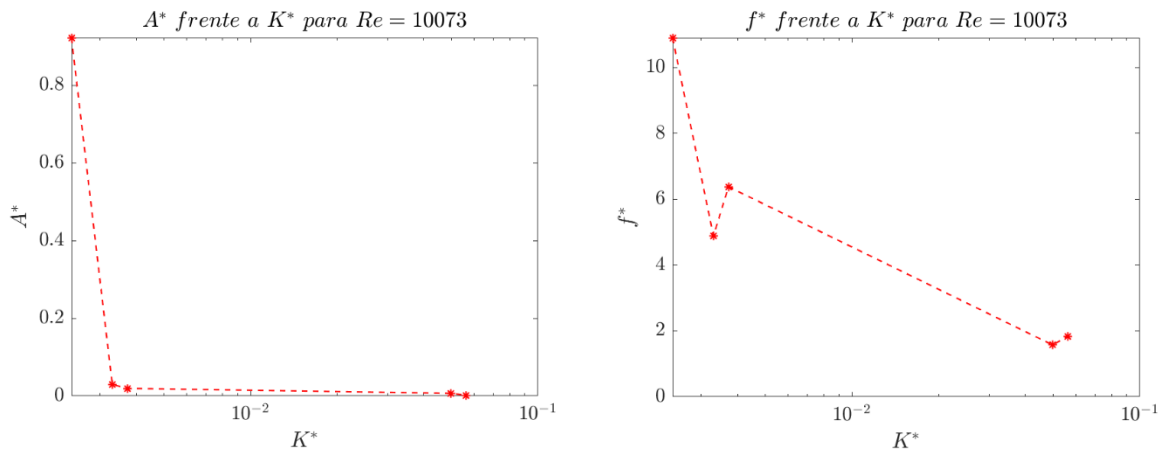


Gráfica 6. PSD para la amplitud de la vibración, a_v , para $Re = 10073$ (10 Hz) y $Re = 21704$ (20 Hz) para la lama # 5.

Se obtiene en la Gráfica 6, una frecuencia dominante de 8.58 Hz para $Re = 10073$ (10 Hz) y 13.89 Hz para $Re = 21704$ (20 Hz).



Gráfica 7. A^* y f^* de la vibración frente al Ca para $Re = 10073$ (10 Hz).



Gráfica 8. A* y f* de la vibración frente a la K* para Re = 10073 (10 Hz).

Como puede observarse en las Gráficas 7 y 8, la mayor amplitud adimensional de vibración, A*, se produce para la lama con menor rigidez flexural, K*, Tabla 7, la # 5. Además, se aprecia una tendencia monótona de la frecuencia adimensional, f*.

En cuanto a la frecuencia adimensional, f*, se deben explicar algunos comportamientos, también vistos en las Gráficas 7 y 8. En primer lugar, los dos primeros puntos, lama # 1 y # 2, se corresponden con un primer modo de vibración, f* ≈ 1, los siguientes dos puntos, lama # 3 y # 4, se comportan según un segundo modo de vibración, f* = 6, por último el tercer punto, lama # 5, tiene un ratio de frecuencia demasiado alto, correspondiente a modos superiores y modos torsionales, f* >> 6. En la estroboscopia se podrá visualizar este comportamiento.

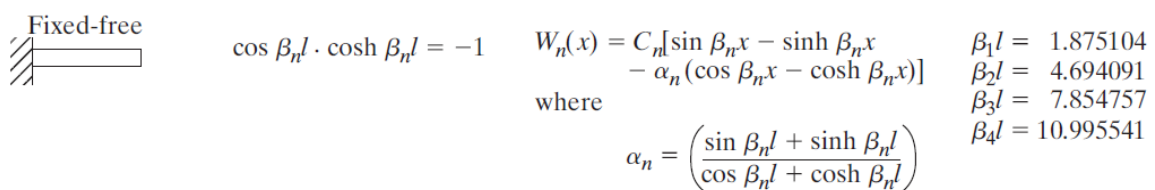
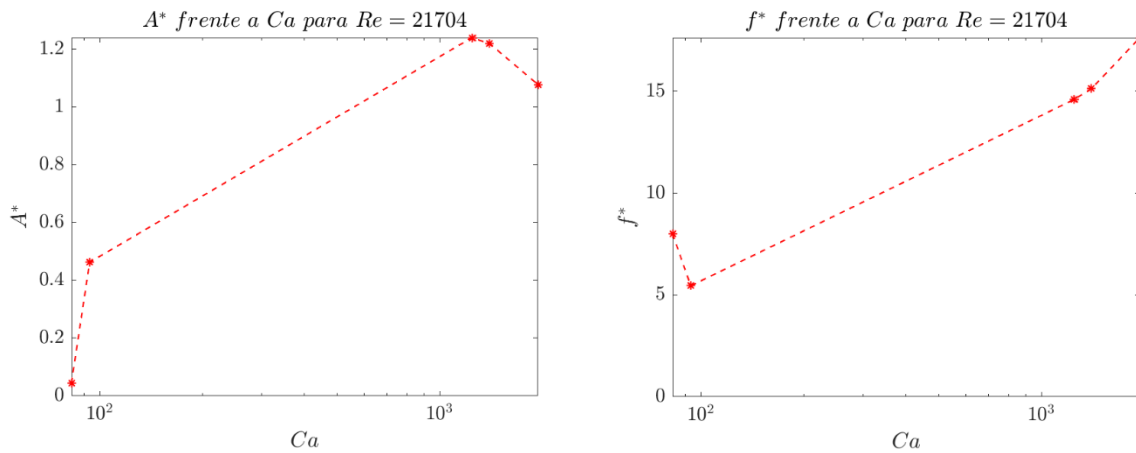


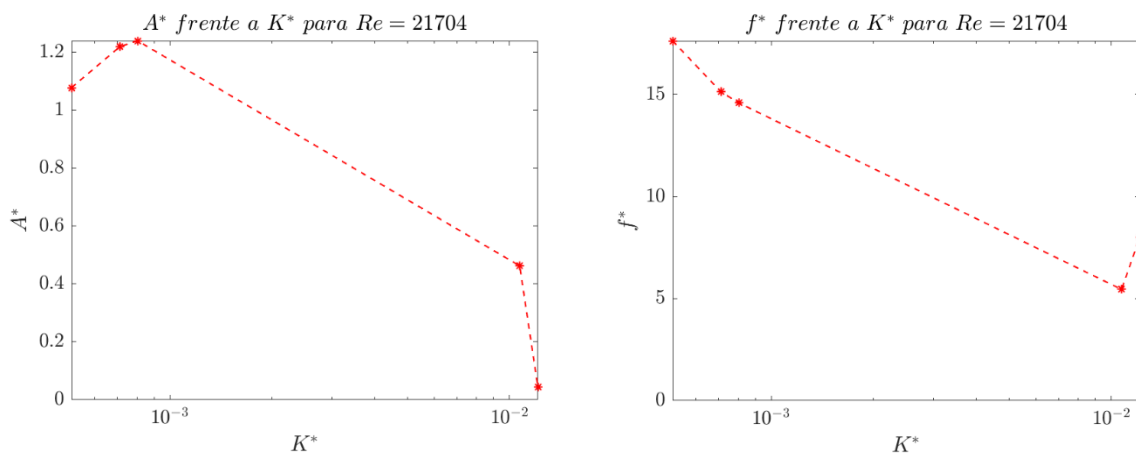
Figura 32. Coeficientes β_nl_c para viga en voladizo [24]

Para comprobar que se trata de un segundo modo de vibración se puede realizar la siguiente operación aproximada, teniendo en cuenta los valores de los coeficientes modelos mostrados en la Figura 32:

$$f^* \sim \frac{(\beta_2 l_c)^2}{(\beta_1 l_c)^2} = \frac{4.694091^2}{1.875104^2} = 6.2669 \text{ (Fórmula 4.2)}$$



Gráfica 9. A^* y f^* de la vibración frente al Ca para $Re = 21704$ (20 Hz).



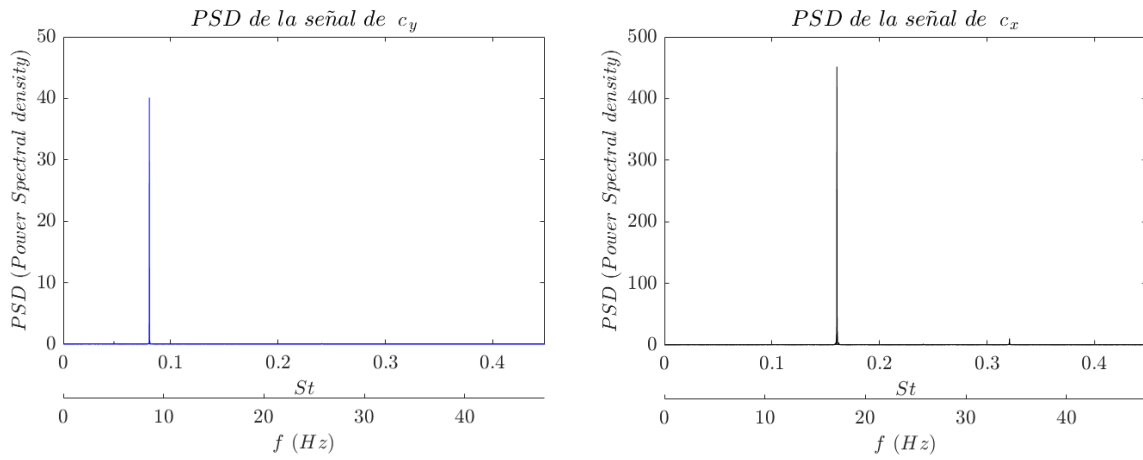
Gráfica 10. A^* y f^* de la vibración frente a la K^* para $Re = 21704$ (20 Hz).

Para $Re = 21704$ (20 Hz) en las Gráficas 9 y 10, la lama con mayor amplitud es la lama # 3, la tercera con menor rigidez flexural.

4.2.2 Coeficientes de fuerzas

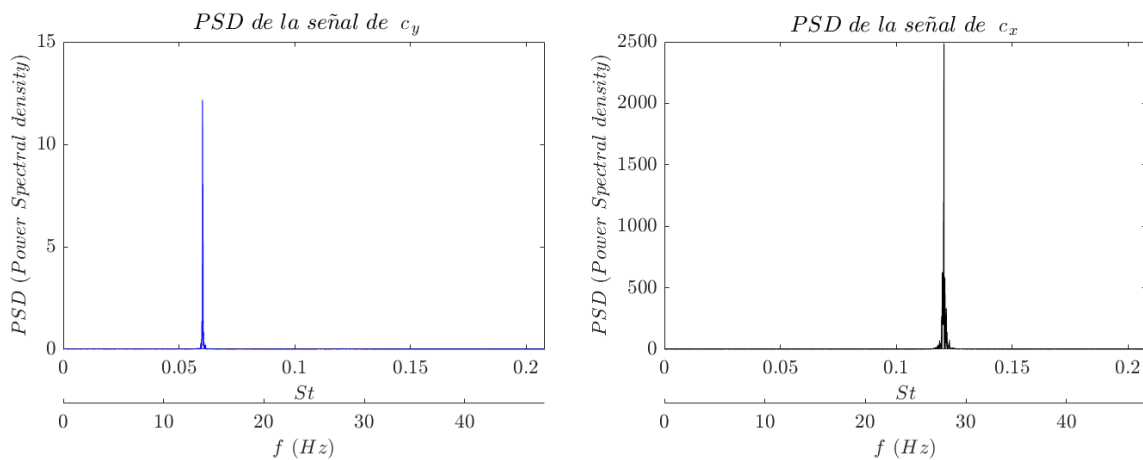
A continuación, se presentan los coeficientes transversal, \widehat{C}_y , y de arrastre, C_x , que representan la fuerza longitudinal que se ejerce sobre el cilindro (dirección del flujo) y la fuerza transversal o lateral. Respecto al título de nuestro Trabajo, se debe tener en cuenta que una mejora aerodinámica del cilindro, supondría que los resultados de los diferentes coeficientes de arrastre, C_x , obtenidos fueran menores al coeficiente de arrastre del cilindro sin ninguna lama. Este cálculo se realizó simplemente realizando ensayos con el cilindro en solitario. En las gráficas siguientes se presenta como una línea horizontal. Las lamas que hayan quedado por debajo supondrán una mejora aerodinámica a cierta velocidad del flujo.

Como para el caso de la amplitud de vibración, en este caso también se ha calculado la densidad espectral de las señales c_x y c_y , en la Gráfica 11.



Gráfica 11. PSD de las señales de los coeficientes de arrastre (c_x) y transversal (c_y) para $Re = 10073$ (10 Hz), para la lama # 5.

En la Gráfica 11, la frecuencia dominante que se observa en la señal del coeficiente transversal, c_y , corresponde a la del desprendimiento de vórtices que se ve modificado por la vibración de la lama, alterando la distribución de presiones a cada lado de la lama de forma alterna. Dicha frecuencia es la mitad de la característica del arrastre, c_x , pues la integración se realiza en la dirección del flujo y es irrelevante desde que lateral se desprenda el vórtice (región de baja presión) en cada ciclo, por lo que no se distingue entre dirección de la vorticidad. Por tanto, la frecuencia predominante del c_y coincide con la frecuencia de vibración de la lama, f_v , se ha obtenido 8.58 Hz, y la frecuencia predominante del c_x debe ser el doble de las anteriores, se ha obtenido 17.16 Hz.

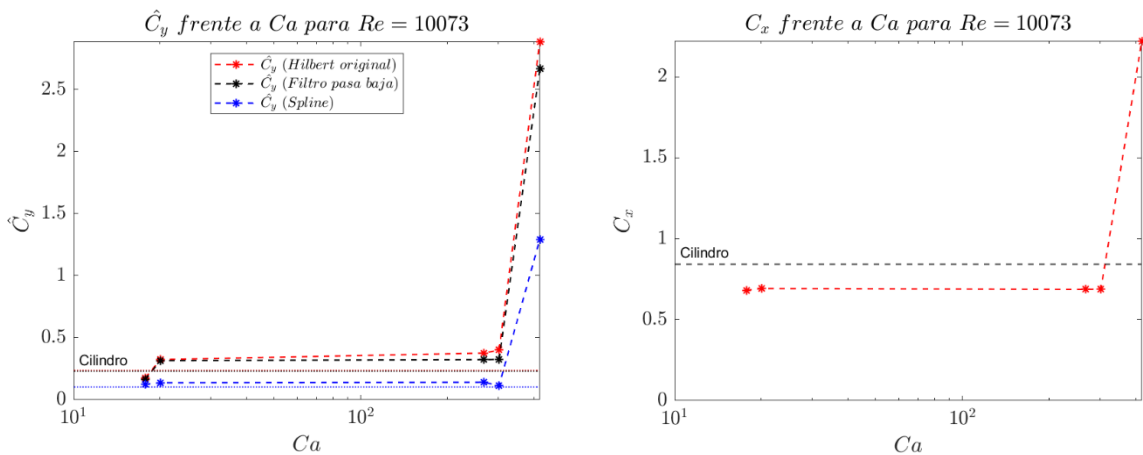


Gráfica 12. PSD de las señales de los coeficientes de arrastre (c_x) y transversal (c_y) para $Re = 21704$ (20 Hz), para la lama # 5.

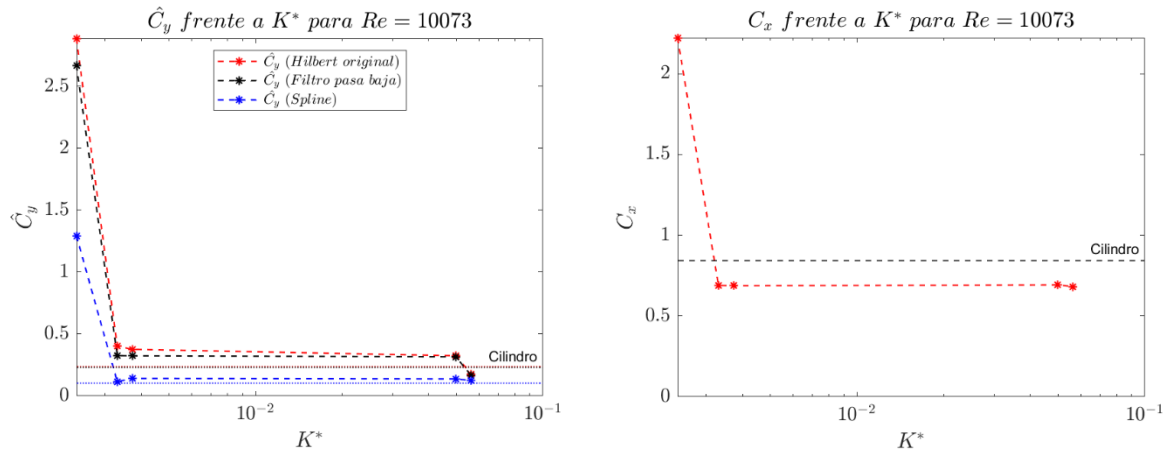
Al igual que antes, para $Re = 21704$ (20 Hz) en la Gráfica 12, la frecuencia predominante del c_y coincide con la frecuencia de vibración de la lama, f_v , se ha obtenido 13.88 Hz, y la frecuencia predominante del c_x debe ser el doble de las anteriores, se ha obtenido 27.82 Hz.

A continuación, se presentan las gráficas de los coeficientes de arrastre y transversal frente al Cauchy y a la rigidez a flexión adimensional, para $Re = 10073$ (10 Hz) y $Re = 21704$ (20 Hz).

Además, como ya se indicó en los Ensayos completos túnel de viento, en el procesado de datos se ha obtenido el coeficiente de transversal, \widehat{C}_y , de cuatro formas distintas, aunque en las siguientes gráficas, Gráficas 13-16, aparecen tres de ellas. Se presenta en las Gráficas 13-16, el cálculo aplicando la función de Hilbert directamente a la señal original (rojo), aplicando un filtro pasa baja y después Hilbert (negro) y, por último, aplicando un spline y después Hilbert (azul), tal y como están ordenadas, también quedan ordenados sus valores, es decir, cuanto mayor es el filtrado menor es el valor resultante. Aunque en todos los casos, el filtro pasa baja se encuentra más cerca de la señal original.

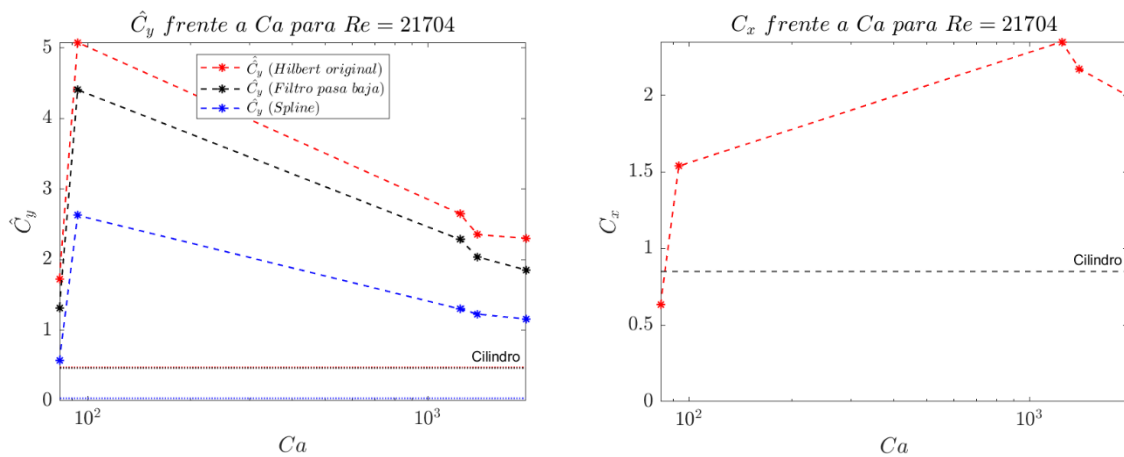


Gráfica 13. Coeficientes de arrastre (C_x) y transversal (\widehat{C}_y) frente al Ca para 10 Hz.

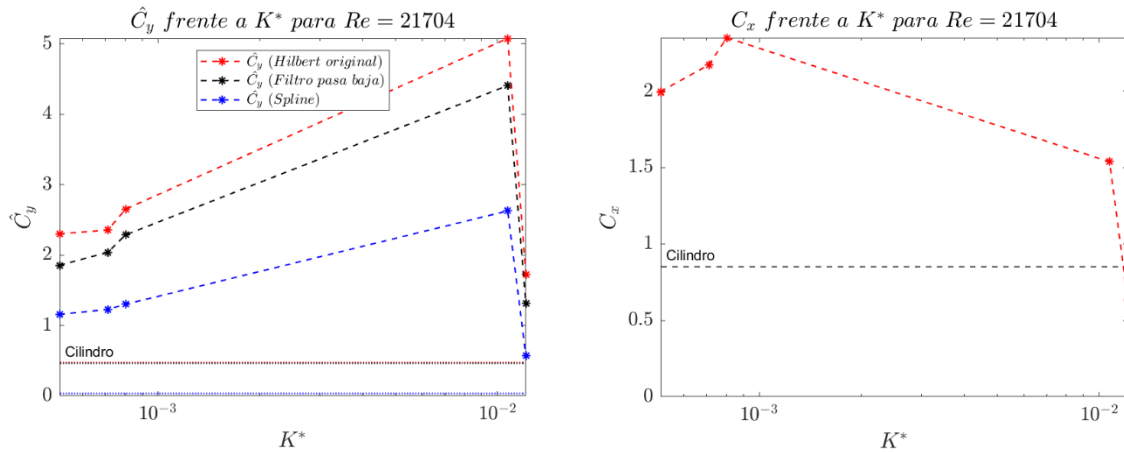


Gráfica 14. Coeficientes de arrastre (C_x) y transversal (\hat{C}_y) frente a la K^* para $Re = 10073$ (10 Hz).

Para $Re = 10073$ (10 Hz), en las Gráficas 13 y 14, existe una clara tendencia en el coeficiente transversal, se observa que para la lama más flexible (# 5) se produce una gran fuerza lateral. Esto, también se pone de manifiesto en el coeficiente de arrastre. Además, se debe destacar que para todas las lamas se produce una mejora aerodinámica (reducción del coeficiente de arrastre), excepto para dicha lama más flexible. Sin embargo, se empeora la situación en cuanto a las fuerzas transversales, al colocar cualquiera de las lamas flexibles, excepto para la lama # 1, donde se produce cierta mejora.



Gráfica 15. Coeficientes de arrastre (C_x) y transversal (\hat{C}_y) frente al Ca para $Re = 21704$ (20 Hz).

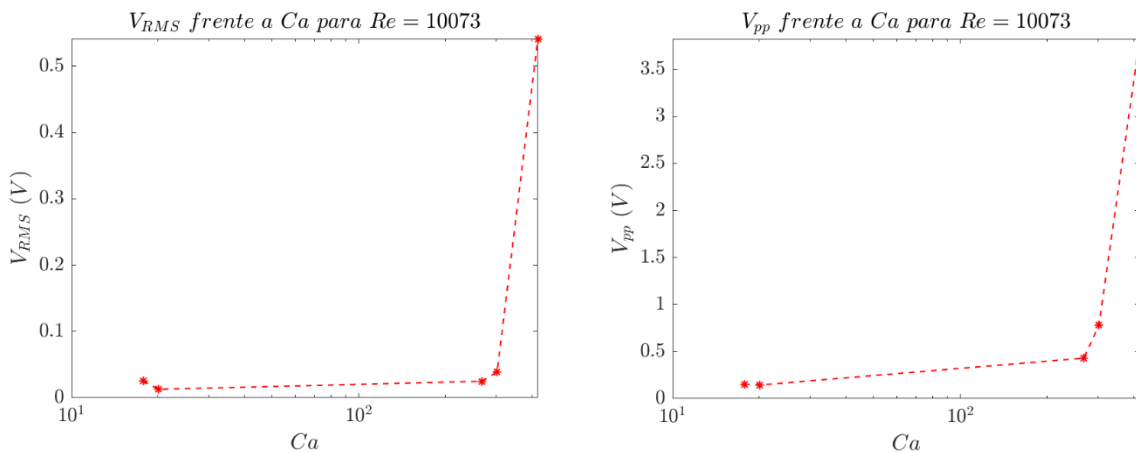


Gráfica 16. Coeficientes de arrastre (C_x) y transversal (\hat{C}_y) frente a la K^* para $Re = 21704$ (20 Hz).

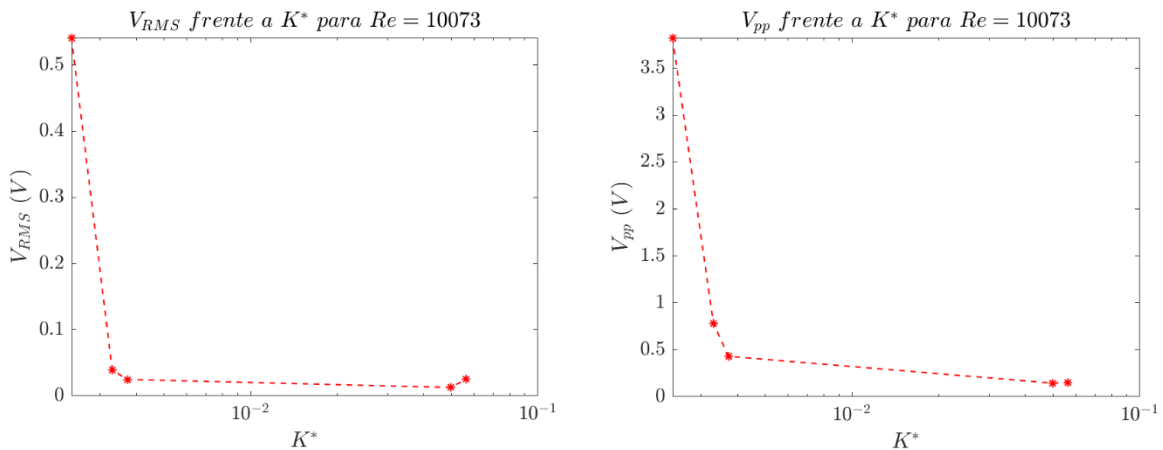
Para $Re = 21704$ (20 Hz), en las Gráficas 15 y 16, se tiene un caso muy distinto, ya que las tendencias no son claras, sin embargo, sí queda de manifiesto que las vibraciones son muy altas, por la excitación de modos de vibración secundarios, y que se estaría perjudicando a las fuerzas sobre el cilindro introduciendo las lamas, excepto con la lama # 1 que existe cierta mejora, aunque posteriormente se verá que la obtención de energía eléctrica es mucho más alta.

4.2.3 Tensión piezoeléctricos

Centrándonos ahora en el otro apartado del título de este Trabajo, ahora se va a mostrar, Gráficas 17-20, la tensión obtenida con cada una de las lamas, en valor eficaz o RMS y de pico a pico, frente al número adimensional de Cauchy, Ca , y a la rigidez a flexión adimensional, K^* .

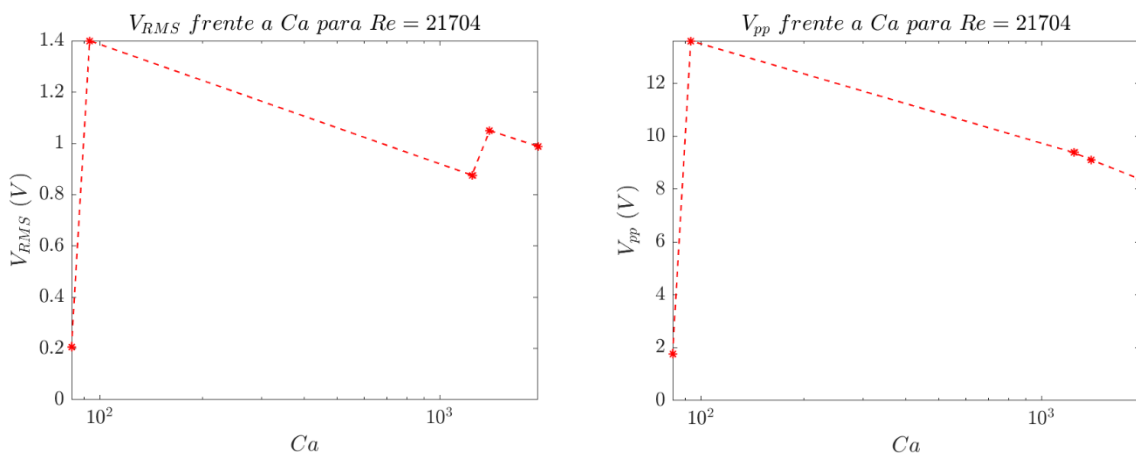


Gráfica 17. Tensión RMS y pico a pico frente al Ca a $Re = 10073$ (10 Hz).

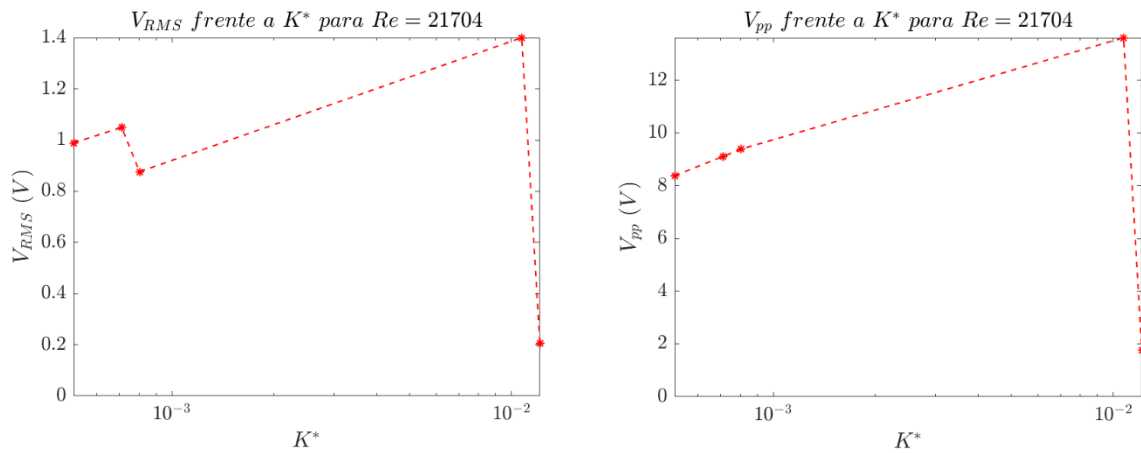


Gráfica 18. Tensión RMS y pico a pico frente a la K^* a $Re = 10073$ (10 Hz).

Como era predecible, se puede observar en las Gráficas 17 y 18, que en la lama que se han encontrado mayores fuerzas transversales, se produce un mayor aprovechamiento de energía residual, 541.6 mV de tensión eficaz y 3.825 V de pico a pico, siendo casi insignificante para los casos en que el coeficiente de arrastre mejoraba respecto al cilindro en solitario, se obtiene como máximo 38.8 mV de tensión RMS y 780.5 mV de pico a pico. Esta situación denota la necesidad de realizar el estudio del balance de energía para comprobar si al final este comportamiento resulta positivo.



Gráfica 19. Gráficas de la tensión RMS y pico a pico frente al Ca a $Re = 21704$ (20 Hz).



Gráfica 20. Gráficas de la tensión RMS y pico a pico frente al K^* a $Re = 21704$ (20 Hz).

Aunque para el resto de parámetros, el caso de $Re = 21704$ (20 Hz) resulta poco estable y sin uniformidad, en cuanto a los piezoeléctricos son muy útiles las Gráficas 19 y 20 para presentar las grandes capacidades de estos dispositivos, ya que para una velocidad del aire de 8.76 m/s, excitando una lama flexible, se pueden conseguir valores de tensión eficaz de 1.4 V y 13.61 V de pico a pico.

4.3 Estroboscopia

Los resultados de estos ensayos, después de realizar un acoplamiento de imágenes con el programa *GIMP*, son las imágenes siguientes ordenadas según el número de Cauchy de menor a mayor:

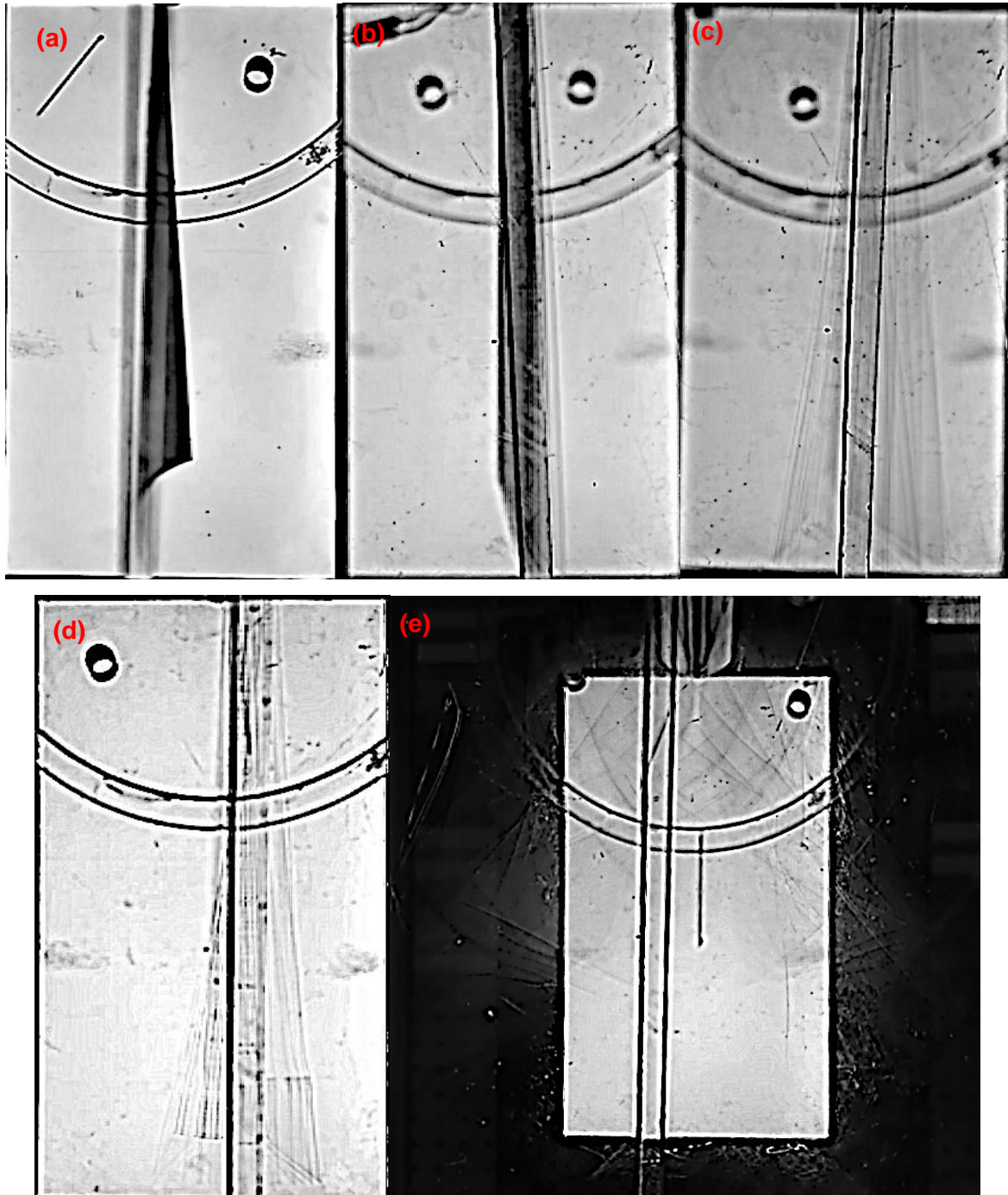


Figura 33. Ensayo estroboscopia lama (a) # 1, (b) # 2, (c) # 3, (d) # 4 y (e) # 5.

En la Figura 33, se puede observar, que casi todas las lamas se deforman según el primer modo de vibración transversal, junto con cierta deformación torsional. Así

pues, en primera aproximación, se pueden usar las expresiones simplificadas. Aunque también es cierto, que según los resultados obtenidos en las gráficas del ratio de frecuencias, f^* , como las Gráficas 7-10, las lamas c y d (# 3 y # 4) deberían describir un segundo modo de vibración, apareciendo cuellos en la deformada. No se observan segundos modos de vibración, pero sí se pueden apreciar modos torsionales que, aparte de lo anteriormente indicado, también afecten a los resultados.

Además, se ponen de manifiesto las diferencias de amplitudes en la vibración de cada lama, siendo notable el caso de la lama # 5. En este caso, la amplitud es tan grande que el ensayo ha sido infructuoso, aunque en la Figura 34 se muestra el resultado. Se ha indicado que se trata de un primer modo de vibración, aunque podría ser una combinación de modos superiores y modos torsionales. Para mostrar más información de esta lama, se presenta una imagen con un ciclo completo:

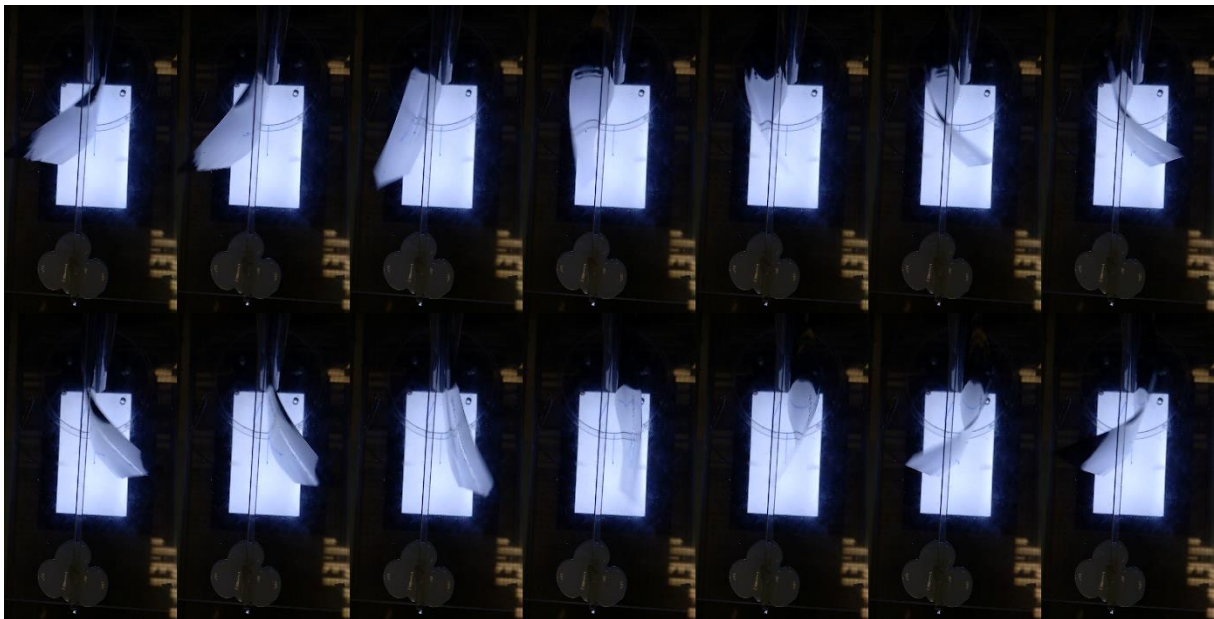


Figura 34. Lama # 5, deformada en un ciclo.

4.4 Balance de energía

Los resultados del balance de energía de las lamas, se pueden dividir en dos partes, el rendimiento total, que se calcula para todas las lamas y el rendimiento electromecánico que se calcula solo para la lama # 4.

La potencia eléctrica, P_e , se presenta en microvatios, obteniendo valores muy pequeños debido a la resistencia asumida, sin embargo, la potencia disponible en el flujo, P_v , se introduce en vatios. Por ello, se obtienen rendimientos, η_t , ínfimos tanto para $Re = 10073$ (10 Hz), como para $Re = 21704$ (20 Hz), según se aprecia en las Tablas 9 y 10.

Esto sucede debido a que la potencia del flujo, P_v , depende de la velocidad del fluido al cubo, y es muy elevada, siendo la aprovechada por un único piezoeléctrico muy pequeña.

Lama	P_e (μ W)	P_v (W)	η_t (%)
# 1	0.0065	1.5406	4.2210E-07
# 2	0.0016	1.5406	1.0465E-07
# 3	0.0062	1.5406	4.0167E-07
# 4	0.0151	1.5406	9.7882E-07
# 5	2.9462	1.5406	1.9124E-04

Tabla 9. Potencia eléctrica y del flujo y rendimiento total para $Re = 10073$ (10 Hz).

Lama	P_e (μ W)	P_v (W)	η_t (%)
# 1	0.4200	15.4092	2.7255E-06
# 2	19.6210	15.4092	1.2733E-04
# 3	7.6783	15.4092	4.9829E-05
# 4	11.0238	15.4092	7.1541E-05
# 5	10.5147	15.4092	6.8237E-05

Tabla 10. Potencia eléctrica y del flujo y rendimiento total para $Re = 21704$ (20 Hz).

En segundo lugar, se estudia al eficiencia entre la potencia mecánica producida por la deformación de la lama, P_m , y la potencia eléctrica, P_e , que el piezoeléctrico es capaz de generar a partir de esa potencia de deformación, para un $Re = 10073$ (10 Hz). Solo se realiza a este Reynolds porque se conoce la deformada de la lama y podría aproximarse a un primer modo de vibración, Figura 33 (d).

Para ello se necesitan una serie de coeficientes (c y k), que se calculan con el ensayo en vacío de la lama, como ya se comentó en los Ensayos y resultados experimentales. A modo ilustrativo se realiza para la lama # 4.

Los parámetros necesarios son la masa de la lama, m , su frecuencia natural, f_n , coeficiente amortiguamiento, c , constante elástica, k , y coeficiente de acoplamiento electromecánico, θ , obtenido como ya se indicó de la Tabla 1 de Huseyin et al. [13]. Estos parámetros son los coeficientes de la Fórmula 2.14, que es evaluada en el programa de Matlab.

m (kg)	0.01408
f_n (Hz)	1.31475
c (Ns/m)	0.04492
k (N/m)	0.96084
Θ (C/m)	3.69E-6

Tabla 11. Coeficientes de la Fórmula 2.3, para la lama # 4.

Los resultados de la Tabla 11 en este caso, proporcionan algo más de información, ya que los valores de potencia no difieren en tantos órdenes, obteniéndose una eficiencia del 1.73 %, según la Tabla 12.

P_e (μW)	P_m (μW)	η_{em} (%)
0.0151	0.8704	1.7371

Tabla 12. Potencia eléctrica y mecánica y rendimiento electromecánico, para la lama # 4.

Este rendimiento, expresado en la Tabla 12, es pequeño en vista de la energía vibratoria del filamento, aunque esto se puede ver incrementado si se colocan más elementos piezoeléctricos, que no alteren de forma global las propiedades mecánicas del sistema c , m y k .

Además, hay que tener en cuenta su carácter residual, por lo que aunque bajo el rendimiento, esta producción contribuiría de forma sencilla a la mejora del balance energético global (que en algunos casos es incluso mayor pues como se ha visto anteriormente, las lamas flexibles consiguen reducir el coeficiente de arrastre).

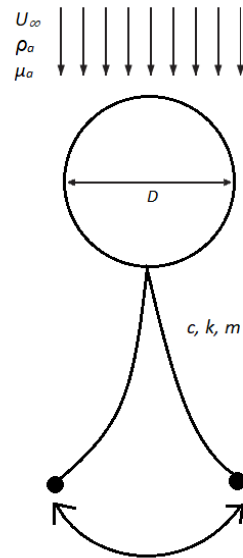


Figura 35. Esquema de la vibración de la lana aproximada.

Los valores, como ya se ha comentado, se han calculado mediante una aproximación de un grado de libertad, asumiendo la masa concentrada en el extremo, se muestra en la Figura 35, donde se mide el desplazamiento y extrapolando al piezoeléctrico para poder realizar el acoplamiento de los modelos de forma adecuada, Fórmula 2.14.

5 Conclusiones y trabajo futuro

En la presente memoria del Trabajo Fin de Máster titulado “Estudio experimental de sistemas flexibles de mejora aerodinámica y captación de energía”, se ha puesto de manifiesto en primer lugar, la importancia de la introducción de nuevos sistemas de recuperación de la energía residual, que se perdería en el ambiente, como medio para reducir las emisiones y contaminación emitida al medioambiente. Se han indicado desde sistemas vibratorios basados en el movimiento de los árboles y sus hojas, pasando por calles y centros comerciales con baldosas que recuperan la energía del movimiento de las personas, hasta aplicaciones en la medicina, como por ejemplo, hacer funcionar un marcapasos y evitar la sustitución de baterías en posteriores cirugías.

En segundo lugar, se debe tener en cuenta que la rama de investigación en la que está centrado el grupo donde se ha desarrollado el trabajo, es el estudio aerodinámico de los cuerpos y la posible reducción del coeficiente de arrastre. Es por ello que el trabajo se centra en el uso de piezoeléctricos, pero aplicado a la recuperación de energía de las vibraciones producidas por un elemento flexible. Teniendo esto en cuenta, el estudio del problema se ha tenido que realizar en dos ámbitos, los piezoeléctricos, materiales, tipos, usos, formas reales de usar la electricidad generada y ensayos necesarios para la calibración de estos dispositivos, como es el uso de agitadores, pero también, se ha tenido que desarrollar la investigación de los estudios que tienen que ver con la forma en que actúa un flujo incidente sobre un cuerpo, recopilando información sobre los distintos coeficientes que interpretan el problema, así como el estudio de la deformación que se produce en lamas flexibles al introducirlas en la estela de un cuerpo, en general y de un cilindro, en particular.

Sin embargo, toda la investigación realizada no solo se ha quedado en una búsqueda bibliográfica, sino que se han realizado numerosos ensayos para estudiar el comportamiento del problema en la realidad, por ello, en tercer lugar, se debe destacar, los numerosos estudios experimentales realizados. Estos ensayos se llevaron a cabo de una forma secuencial, es decir, primero se experimenta de forma casera con los piezoeléctricos, en general, usando piezoeléctricos de diafragma circular, que son más comunes por su uso en los instrumentos de percusión, esta

experimentación sirve, además, para diseñar un circuito rectificador con el que se tuvo la capacidad encender dos leds de forma constante a una tensión de 4.66 V. El siguiente paso, fue realizar experimentos, también preliminares, pero en este caso con el cuerpo con el que posteriormente se pretendía ensayar y, además, con los piezoeléctricos que se iban a usar. Con este tipo de experimento tan simple, se consiguió obtener hasta 717 mV de tensión eficaz, mucho mayor a la de la mayoría de estudios revisados [12]. Sin embargo, el objetivo es que la secuencia de experimentos acabase en la realización de experimentos en el túnel de viento, con el cilindro pero incorporándole lamas flexibles y a éstas los piezoeléctricos. Se eligió esta forma porque existe en muchas estructuras sometidas a un flujo y, además, es un caso ampliamente estudiado en el ámbito de la investigación aerodinámica. El problema que se encontró, previo a la relación de los mismos, es que no se conocían las propiedades de las lamas, por tanto, se realizó la caracterización de las mismas aplicando una técnica de corrección de la precarga, que para una lama que se sabía que estaba fabricada en polipropileno, se obtuvo un error del 2.62 %. Además, a simple vista los resultados fueron certeros, en cuanto al ordenamiento respecto a su rigidez flexural.

Una vez se han caracterizado las lamas de material plástico, se pasan a realizar los ensayos anteriormente mencionados, en los que se va a medir las fuerzas ejercidas sobre el cilindro, las amplitudes de vibración de la lama y la energía eléctrica generada por el piezoeléctrico. Se realizan un total de 54 ensayos, sobre los que se extrajo algún tipo de información. Por tanto, con estos experimentos se ha hecho uso desde una célula de carga, hasta una tarjeta de adquisición, que mide tensión. De estos ensayos se pudieron extraer datos interesantes, como que a $Re = 10073$ (10 Hz), el coeficiente transversal tiene cierta monotonía y se puede mejorar el coeficiente de arrastre con todas las lamas, excepto con la de menor rigidez flexural, al mismo tiempo se obtiene que con esta lama se produce la mayor recuperación de energía eléctrica. Sin embargo, para $Re = 21704$ (20 Hz), los datos son poco uniformes, aunque es muy importante destacar que se ha conseguido obtener 1.4 V de tensión eficaz, dato que es considerable comparado con estudios del mismo ámbito [12].

Adicionalmente a todos estos ensayos, se han realizados grabaciones estroboscópicas de la deformada de la lama, para así tener ejemplos que clarifiquen

el modo de vibración y el comportamiento general de la lama. Se ha podido ver en las imágenes, que la deformada se ajusta a un primer modo de vibración, justificando así el uso de las ecuaciones simplificadas. Aunque ciertos resultados inducen a pensar que existen modos superiores de vibración y modos torsionales en combinación al primer modo.

Por último, como trabajo adicional, mediante un modelo de orden reducido de un grado de libertad, se ha realizado un balance de energía, entre la potencia mecánica resultado de la deformación de la lama y la potencia eléctrica obtenida del piezoeléctrico, así como un rendimiento total entre dicha potencia eléctrica y la potencia disponible en el flujo. Tratando de entender o estudiar si no reducir el coeficiente de arrastre o incluso empeorarlo, estaría justificado con el hecho de obtener mayor energía eléctrica. Los resultados proponen una eficiencia del 1.73 %. Este valor es bajo, pero se debe tener en cuenta, que este aprovechamiento en sí mismo es un éxito, ya que normalmente sería energía que se disiparía en el ambiente.

Como trabajo futuro, es reseñable el hecho de que estos experimentos y procesado, constituyen un estudio inicial, abriendo un nuevo camino de investigación con mucho potencial. Por ello, sería recomendable que, en base a estos datos, se realicen nuevos ensayos de forma mucho más controlada, se propongan sincronizaciones de la señales para justificar el comportamiento en cada momento, incluyendo las imágenes de una cámara de alta velocidad para asignar cada dato a un estado de la deformada de la lama flexible. Por otro lado, sería interesante usar este tipo de piezoeléctricos en vehículos donde se han instalado lamas flexibles, para aprovechar las vibraciones residuales. Además, se podrían realizar ensayos reales con postes de tipo cilíndricos en carretas o antenas de comunicación elevadas y sometidas a un flujo de aire considerable, intentando recrear los ensayos realizados.

6 Bibliografía

[1] M^a Cruz Acero, Jaume Esteve, Energía ambiental (energy harvesting), Instituto de Microelectrónica de Barcelona, IMB-CNM, CSIC.

[2] Corina Covaci and Aurel Gontean, Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review, *Rev. Sensors*, 20, 12, 3512, 2020

[3] Maoying Zhou, Qinzhong Chen, Zhenlong Xu, Wen Wan, Piezoelectric wind energy harvesting device based on the inverted cantilever beam with leaf-inspired extensions, *Rev. AIP Advances* 9, 035213, 2019

[4] E. Maghsoudi Nia, N.A. Wan Abdullah Zawawi, B.S. Mahinder Singh, Design of a pavement using piezoelectric materials, *Rev. Materialwiss. Werkstofftech*, 50, 320–328, 2019.

[5] Unas baldosas generan energía con nuestras pisadas, 23 de mayo de 2012, National Geographic. Acceso: 12 de julio de 2021. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/unas-baldosas-generan-energia-con-nuestras-pisadas>.

[6] Lin Dong, Xiaomin Han, Zhe Xu, Andrew B. Closson, Yin Liu, Chunsheng Wen, Xi Liu, Gladys Patricia Escobar, Meagan Oglesby, Marc Feldman, Zi Chen, and John X. J. Zhang, Flexible Porous Piezoelectric Cantilever on a Pacemaker Lead for Compact Energy Harvesting, *Rev. Advanced Materials Technologies*, Volume 4, Issue 1, 1800148, 2018

[7] Emmanuel Binyet, Chih-Yung Huang, Jen-Yuan (James) Chang, Polymeric flexible plate in the wake of a bluff body for energy harvesting, *Rev. ScienceDirect*, Volume 199, Pages 1296-1301, 2017.

[8] Emmanuel Binyet, Chih-Yung Huang, Jen-Yuan (James) Chang, Characterization of a vortex-induced vibrating thin plate energy harvester with particle image velocimetry, *Rev. Microsystem Technologies*, 24, pages 4569–4576, 2018.

[9] Emmanuel Binyet, Chih-Yung Huang, Jen-Yuan (James) Chang, Water tunnel study of a cantilever flexible plate in the wake of a square cylinder, *Rev. Microsystem Technologies*, 26, 3435–3449, 2020.

[10] Emmanuel Binyet, Chih-Yung Huang, Jen-Yuan (James) Chang, Flexible Plate in the Wake of a Square Cylinder for Piezoelectric Energy Harvesting-Parametric Study Using Fluid–Structure Interaction Modeling, *Rev. Energies*, 13, 2645, 2020.

[11] Ansys (2021), Ansys, Acceso: 21 de agosto de 2021. <https://www.ansys.com>.

[12] Usman Latif, Emad Uddin, Chaudhary Abdullah, Zaib Ali, Muhammad Sajid, Khalid Akhtar, and Samiur Rehman Shah, Experimental investigation of energy harvesting behind a bluff body, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 12, 033301, 2020.

[13] Huseyin Dogus Akaydin, Niell Elvin and Yiannis Andreopoulos, Energy Harvesting from Highly Unsteady Fluid Flows using Piezoelectric Materials, *Rev. SAGE*, Volume: 21 issue: 13, page(s): 1263-1278, 2010.

[14] Rita T. Aljadiri, Luay Y. Taha, and Paul Ivey, Electrostatic Energy Harvesting Systems: A Better Understanding of Their Sustainability. *Rev. Journal of Clean Energy Technologies*, Vol. 5, No. 5, September, 2017.

[15] D.-A. Wangn, K.-H.Chang, Electromagnetic energy harvesting from flow induced vibration, *Rev. MicroelectronicsJournal*, 41, 356–364, 2010.

[16] Hao Wang and Abbas Jasim, Piezoelectric energy harvesting from pavement, *Rev. Ferroelectrics*, 535:1, 8-17, 2018.

[17] Mahidur R. Sarker, Azah Mohamed & Ramizi Mohamed, Vibration Based Piezoelectric Energy Harvesting Utilizing Bridgeless Rectifier Circuit. *Rev. Jurnal Kejuruteraan* 28: 87-94, 2016.

[18] Gljušić, P.; Zelenika, S.; Blažević, D.; Kamenar, E. Kinetic Energy Harvesting for Wearable Medical Sensors, *Rev. Sensors*, 19, 4922, 2019.

[19] C. García-Baena, J. I. Jiménez-González, and C. Martínez-Bazán, *Rev. AIP Physics of Fluids*, 33, 045102, 2021.

[20] S. Shukla, R.N. Govardhan, J.H. Arakeri, Dynamics of a flexible splitter plate in the wake of a circular cylinder, *Rev. Journal of Fluids and Structures*, Volume 41, Pages 127-134, 2013.

[21] Jinmo Lee and Donghyun You., Study of vortex-shedding-induced vibration of a flexible splitter plate behind a cylinder, *Rev. Physics of Fluids* 25, 110811, 2013.

[22] STEVEN VOGEL, Drag and Reconfiguration of Broad Leaves in High Winds, *Journal of Experimental Botany*, Volume 40, Issue 8, Pages 941–948, 1989.

[23] Motter, Daniel, Jairo Vinícius LavardaFelipe Aguiar DiasSamuel da Silva, Vibration energy harvesting using piezoelectric transducer and non-controlled rectifiers circuits. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. v. 34, n. spe [Accessed 20 July 2021, pp. 378-385, 2012.

[24] Singiresu S. Rao, (2011), *Mechanical Vibrations*, Fifth Edition, Prentice Hall.

7 Anexos

7.1 carga.m

```

clear all
close all

ensayo=7;
% total=[1:negradura_4_1, NO VÁLIDO
% 2:negradura_20_1,
% 3:blancatranslucida_4_1, NO VÁLIDO
% 4:blancatranslucida_20_1,
% 5:blancablanda_10_1,
% 6:negrablanda_10_1,
% 7:transparente_10_1.
% 8:blancablanda_20_1]

ept=[0.45,0.45,0.4,0.4,0.16,0.16,0.16,0.16];
bt=[212,212,210,210,212,209,210,212];
lt=[(297-40),200,(297-40),200,100,100,100,200];
zexpt={ [0.403561695 25.67671392 50.94986615 73.86419084 90.03900827
114.3012344 133.8458055 158.7819823 180.3484056 200.229952 220.4484738
235.6123651 235.6123651]...
, [0.093457944 9.878069835 35.11838641 61.6530782 86.24620717
105.6618353 119.252775 140.6099659 156.1424685 174.910909 193.6793495
198.0373832 198.0373832]...
, [0 17.51412429 33.70253162 50.00410264 67.21131649 86.22981601
110.6821725 134.2288862 156.8699571 175.8884566 193.0956705 215.8819837
215.8819837]...
, [0.101761252 9.173446989 30.88289465 52.08747144 73.29204823
92.98201239 114.1865892 130.3424572 150.5372922 168.7126438 184.8685118
192.853229 192.853229]...
, [-0.181687693 7.945014859 17.57348022 26.94940477 35.11348799
44.68931757 52.79899199 62.93608502 72.05946875 83.21027108 90.45527847
96.29480789 96.46365422]...
, [0 7.863352529 15.50101476 27.54719457 37.58567775 47.62416092
56.65879578 66.83801429 75.82573737 83.76270035 90.78963857 96.30350195
96.30350195]...
, [0.010871929 5.980446244 15.42759222 24.51526798 32.08833112
41.68087776 53.98262433 63.89519631 71.97313032 81.40055386 88.32334545
94.18895412 94.18895412]...
, [0 14.55399061 30.75117371 43.66197183 53.75586854 64.78873239
76.05633803 84.62441315 92.48826291 101.4084507 110.5633803 118.028169]};

uexpt={ [0.190839695 -3.898582334 -11.73664122 -21.96019629 -
30.82061069 -45.47437296 -57.74263904 -73.41875682 -87.39094875
-100 -113.2906216 -122.4918212 -122.4918212-15]...
, [-0.140186916 -1.21541878 -5.098544407 -12.21760806 -18.6894841
-24.51417254 -28.39729817 -34.58880038 -38.75229984 -
43.92980068 -49.10730151 -50.3271028 -50.3271028-23]...
, [-5.68E-14 -2.873563218 -7.68370022 -14.13250178 -23.34507544
-35.3214212 -53.74656852 -74.01423057 -94.28189262 -111.7857826
-128.3684152 -149.4173052 -149.4173052-14]...
, [0.213861386 -0.794306966 -5.392131042 -10.50082446 -
18.16386459 -26.33777405 -34.51168352 -41.66385431 -50.85950246
-59.03341193 -66.18558271 -69.36237624 -69.36237624-3]...
, [0.124273297 -0.708281758 -2.200274524 -3.946531858 -
5.539870904 -7.439046525 -9.238673604 -11.44907901 -13.5563404
-16.12774987 -17.8740072 -19.28743063 -19.28743063-2]...

```

```

    , [-0.393700787 -0.872314961 -2.002171364 -4.859422325 -
7.716673286 -10.71632181 -13.71597034 -17.0953457 -20.18992594
-22.85731348 -25.31591576 -27.16535433 -27.16535433-5]...
    , [0.235126859 -0.298167979 -1.753374338 -3.44302977 -
4.624832805 -6.490144151 -9.59605169 -11.73476636 -13.83452678
-16.10994311 -17.66289688 -19.17650919 -19.17650919-2]...
    , [-0.286532951 -4.250238777 -13.08500478 -24.30754537 -
35.76886342 -51.28939828 -70.86914995 -87.82234957 -104.2979943
-123.400191 -143.6962751 -159.8853868]];
pesoespt=[0.406475658,0.406475658,0.351878574,0.351878574,0.257251635,0.234
884732,0.225749559,0.257251635];

n = 0;
h = 1; % m

b = bt(ensayo)*1e-3; % m
e = ept(ensayo)*1e-3;

l=lt(ensayo)*1e-3;

%qo= 25.59333333e-3*9.81/212e-3;% % N %Carga con la masa dividida por
la longitud mínima
qo=pesoespt(ensayo)*9.81*1;

E = 1682000000; % Pa
I = (1/12)*(e^3*b); % m^4

zexp=zexpt{ensayo}*1e-3;
uexp=uexpt{ensayo}*1e-3;

%z = linspace(zexp(1),zexp(end),1000);
z = linspace(0,l,1000);
u = -((qo*l^4)/(E*I*(n+1)*(n+2)*(n+3)*(n+4))*((1-z./l).^(n+4) - (1-
z./l)*(n+4)+(n+3)));

q = qo*(1-z./l).^n;

%figure(1000), hold on, plot(-z./h,u./h+0.425,'r-')
figure(1000)
hold on
plot(z*1e3,u*1e3,'-r')
plot(zexp*1e3,uexp*1e3,'--*')
legend('Deformada teórica','Deformada experimental','FontSize',10)
ylabel('\it y (mm)','FontSize', 14);
xlabel('\it x (mm)','FontSize', 14);
set(gcf,'color','w');
set(gca,'FontSize',14);
set(gca,'TickLabelInterpreter','Latex')
title('Deformada de la lama "Transparente", voladizo 20 cm','FontSize', 14)

```

7.2 Piezo_laser_fuerza.m

```

clear all
close all
tic
analizar=2; % todo = 2 ; fuerza = 1 ; señales = 0 ;
lama='Negrablanda';
laser='con';
distlaser='72 mm';
guag=0; % guardar (1) o no (0)
qg=1; % todo = 2 ; archivo(.mat) = 1 ; gráficas = 0 ;

[ensayo, fv, ex, fr, arch, archfuerza, senal, frf, exf, limit, nfiltd, nfiltdfs] =
Cargar_datos(lama, laser, distlaser);

%% DATOS ENSAYOS

%%% Características de los ensayos y generalidades
Ff = 200; %Frecuencia de adquisición de la celula (Hz)
Fs = 1000; %Frecuencia de muestreo de las señales
limitS=limit*1000+1;
contgraf=1;
ini=limit(3);

%%% Propiedades del fluido con el que trabajamos
rho=1.2051; % Densidad del fluido kg/m^3
mu=1.849e-5; %Viscosidad del fluido

%%% Propiedades geométricas del cuerpo
H=0.038; %Longitud característica del cuerpo
A=0.4*H+0.2*3e-3; %Área frontal del cuerpo

%% SEÑALES ELÉCTRICAS (PIEZOELÉCTRICO Y LÁSER)

if (analizar==0 && sum(senal)>=1) || (analizar==2 && sum(senal)>=1)
    Tper = 1/Fs;
    distancia=cell(fr,ex);
    distancia0=cell(fr,ex);
    fftensayop=cell(fr,ex);
    fftensayod=cell(fr,ex);
    RMS=zeros(fr,ex);
    pico=zeros(fr,ex);
    Ad=cell(fr,ex);
    Amd=cell(fr,ex);
    offsetd=cell(fr,ex);
    Adist=cell(fr,ex);
    Ud=cell(fr,ex);

    for i=1:fr
        for j=1:ex
            figure(contgraf)
            plot(ensayo{i,j}.Time, ensayo{i,j}.Variables)
            title(['Señales medidas ', num2str(fv(i)), ' Hz'])
            xlabel('Time (s)')
            ylabel('Amplitude (V)')
            contgraf=contgraf+1;
        end
    end

    if senal(2)==1
        for i=1:fr
            for j=1:ex

```

```

        RMS(i,j)=rms(ensayo{i,j}.ai1(limitS(3):limitS(4)));
        pico(i,j)=peak2peak(ensayo{i,j}.ai1(limitS(3):limitS(4)));
        [Pp,fp]=pwelch(ensayo{i,j}.ai1(limitS(3):limitS(4))-
mean(ensayo{i,j}.ai1(limitS(3):limitS(4))),length(ensayo{i,j}.ai1(limitS(3)
:limitS(4))),[],[],Fs);
        fftensayop{i,j}=[fp,Pp];
    end
end
end
%LÁSER DE INTENSIDAD
% % for i=1:fr
% %     for j=1:ex
% %         tension=ensayo{i,j}.ai0;
% %         intensidad=tension/250; %R de 250 ohm
% %         distancia{i,j}=(500-20)/(20e-3-4e-3)*(intensidad-4e-3)+20;
%(20 mA, 500 mm) (4 mA, 20 mm)
% %     end
% % end
if senal(1)==1
    for i=1:fr
        for j=1:ex
            tension=ensayo{i,j}.ai0;
            distancia0{i,j}=(200-20)/(10-1)*(tension-1)+20; %(10 V, 200
mm) ( 1 V, 20 mm)
            distancia0{i,j}=distancia0{i,j}-
mean(distancia0{i,j}(limitS(1):limitS(2))); %ponemos la distancia a cero
respecto de la posición inicial de la lama

[dist,ad,amd,otd]=splines(ini,distancia0{i,j}(limitS(3):limitS(4)),Fs,nfilt
d{i,j});

            distancia{i,j}=dist;
            Ad{i,j}=ad;
            Amd{i,j}=amd;
            offsetd{i,j}=otd;
            Adist{i,j}=mean(Amd{i,j});

[Pd,fd]=pwelch(distancia{i,j},length(distancia{i,j}),[],[],Fs);
            fftensayod{i,j}=[fd,Pd];
        end
    end
end

if senal(2)==1
    x=1:ex;
    figure(contgraf)
    hold on
    for i=1:fr
        plot(x,RMS(i,:), '-*');
    end
    hold off
    title('Valores RMS')
    xlabel('Ensayo')
    ylabel('RMS (V)')
    contgraf=contgraf+1;

    figure(contgraf)
    hold on
    for i=1:fr
        plot(x,pico(i,:), '-*');
    end
    hold off

```

```

        title('Valores pico a pico')
        xlabel('Ensayo')
        ylabel('Pico a Pico (V)')
        contgraf=contgraf+1;
    end

    if senal(1)==1
        for i=1:fr
            for j=1:ex
                figure(contgraf)
                hold on
                plot(ensayo{i,j}.Time,distancia0{i,j},'r')

plot(ensayo{i,j}.Time(limitS(3):limitS(4)),distancia{i,j}+offsetd{i,j},'b')

plot(ensayo{i,j}.Time(limitS(3):limitS(4)),Ad{i,j}+offsetd{i,j},'g')

plot(ensayo{i,j}.Time(limitS(3):limitS(4)),Amd{i,j}+offsetd{i,j},'m')
        title(['Distancia media por el láser ',num2str(fv(i)), '
Hz'])
            ylabel('Distancia (mm)')
            xlabel('Tiempo (s)')
            contgraf=contgraf+1;
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
            figure(contgraf)
            hold on

plot(ensayo{i,j}.Time(100*1000+1:100.5*1000+1),distancia0{i,j}(100*1000+1:1
00.5*1000+1),'r')

plot(ensayo{i,j}.Time(100*1000+1:100.5*1000+1),distancia{i,j}(-(limitS(3)-
1)+(100*1000+1:100.5*1000+1))+offsetd{i,j},'b')
            plot(ensayo{i,j}.Time(100*1000+1:100.5*1000+1),Ad{i,j}(-
(limitS(3)-1)+(100*1000+1:100.5*1000+1))+offsetd{i,j},'g')
            plot(ensayo{i,j}.Time(100*1000+1:100.5*1000+1),Amd{i,j}(-
(limitS(3)-1)+(100*1000+1:100.5*1000+1))+offsetd{i,j},'m')
            grid on
            grid minor
            legend('Señal original','Señal filtrada','Hilbert','Media
móvil de Hilbert','FontSize',10,'Location','southeast')
            title(['Amplitud de la vibración a ',num2str(fv(i)), '
Hz'],'FontSize',14)
            ylabel('\it Amplitud vibración (mm)','FontSize',14)
            xlabel('\it Tiempo (s)','FontSize',14)
            set(gcf,'color','w');
            set(gca,'FontSize',14);
            set(gca,'TickLabelInterpreter','Latex')
            contgraf=contgraf+1;
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        end
    end
end
for i=1:fr
    for j=1:ex
        Ud{i,j}=0.4696*fv(i)-0.6287;
    end
end
for i=1:fr
    for j=1:ex
        %Ud=0.4696*fv(i)-0.6287;
        if senal(2)==1

```

```

figure(contgraf)
plot(fftensayop{i,j}(:,1),fftensayop{i,j}(:,2))*H/U
xlim([0 50])
title(['PSD Señal Piezoeléctrico ',num2str(fv(i)), ' Hz'])
grid on
grid minor
xlabel('f (Hz)')
ylabel('PSD')
contgraf=contgraf+1;
end
if senal(1)==1
% %
% %
figure(contgraf)
hold on
% %
% %
plot(fftensayod{i,j}(:,1),fftensayod{i,j}(:,2))*H/U
% %
% %
title(['PSD Señal Láser ',num2str(fv(i)), ' Hz'])
% %
% %
xlabel('St')
% %
% %
ylabel('PSD')
% %
% %
contgraf=contgraf+1;
% %
% %
figure(contgraf)
hold on
% %
% %
plot(fftensayod{i,j}(:,1),fftensayod{i,j}(:,2))*H/U
% %
% %
title(['PSD Señal Láser ',num2str(fv(i)), ' Hz'])
% %
% %
xlabel('St')
% %
% %
ylabel('PSD')
% %
% %
contgraf=contgraf+1;
% %
% %
figure(contgraf)
subplot_tight(2,1,1,[0.075 0.07])
hold on
% %
% %
plot(fftensayod{i,j}(:,1),fftensayod{i,j}(:,2))*H/U
% %
% %
xlim([0 48])
% %
% %
grid on
% %
% %
grid minor
% %
% %
title(['PSD Señal Láser ',num2str(fv(i)), ' Hz'])
% %
% %
set(gca,'FontSize',8);
% %
% %
xlabel('f (Hz)')
% %
% %
ylabel('PSD')
% %
% %
subplot_tight(2,1,2,[0.075 0.07])
hold on
% %
% %
plot(fftensayod{i,j}(:,1)*H/Ud{i,j},fftensayod{i,j}(:,2))*
% %
% %
xlim([0 48*H/Ud{i,j}])
% %
% %
grid on
% %
% %
grid minor
% %
% %
set(gca,'FontSize',8);
% %
% %
xlabel('St')
% %
% %
ylabel('PSD')
% %
% %
contgraf=contgraf+1;

figure(contgraf)
b=axes('Position',[.13 .13 .8 1e-12]);
a=axes('Position',[.13 .25 .8 .68]);

plot(a,fftensayod{i,j}(:,1).*H/Ud{i,j},fftensayod{i,j}(:,2))
set(a,'xlim',[0 48*H/Ud{i,j}]);
set(b,'xlim',[0 48]);
set(gcf,'color','w');
set(a,'FontSize',14);
set(b,'FontSize',14);
set(a,'TickLabelInterpreter','Latex')
set(b,'TickLabelInterpreter','Latex')

```

```

        xlabel(a, '$St$', 'interpreter',
'Latex', 'fontweight', 'bold', 'FontSize', 14)
        xlabel(b, '$f~(Hz)$', 'interpreter',
'Latex', 'fontweight', 'bold', 'FontSize', 14)
        ylabel(a, '$PSD~(Power~Spectral~density)$', 'interpreter',
'Latex', 'fontweight', 'bold', 'FontSize', 14);
        title(a, '$PSD~de~la~se\tilde{n}al~de~A_v$', 'interpreter',
'Latex');
        contgraf=contgraf+1;

    end
end
end
disp('Ya se han analizado las señales especificadas')
else
    disp('No se analizan las señales adquiridas porque no se ha pedido o
porque no existen.')
end

%% FUERZAS
if analizar==1 || analizar==2

    TARE=cell(frf,exf);
    T=cell(frf,exf);
    T_AFT=cell(frf,exf);
    T_BEF=cell(frf,exf);
    F_T=cell(frf,exf);
    Fx_t=cell(frf,exf);
    Fy_t=cell(frf,exf);
    Fz_t=cell(frf,exf);
    Brazo=cell(frf,exf);
    Mx=cell(frf,exf);
    cx=cell(frf,exf);
    cy=cell(frf,exf);
    cz=cell(frf,exf);
    CX=cell(frf,exf);
    CYrms=cell(frf,exf);
    CY=cell(frf,exf);
    CYs=cell(frf,exf);
    CYf=cell(frf,exf);
    CZ=cell(frf,exf);
    CYp=cell(frf,exf);
    fftPxx=cell(frf,exf);
    fftPxx1=cell(frf,exf);
    fftPxx2=cell(frf,exf);
    fftPxxf=cell(frf,exf);
    fftPxxorig=cell(frf,exf);
    cys=cell(frf,exf);
    Acy=cell(frf,exf);
    Acym=cell(frf,exf);
    offsetf=cell(frf,exf);
    cyf=cell(frf,exf);
    Acyf=cell(frf,exf);
    Acymf=cell(frf,exf);
    offsetff=cell(frf,exf);
    %filt1f=cell(frf,exf);
    Uf=cell(frf,exf);
    Re=cell(frf,exf);
    CYhilb=cell(frf,exf);

    for i=1:frf

```

```

for j=1:exf
    Uf{i,j}=0.4696*fv(i)-0.6287;
    Re{i,j}=rho*Uf{i,j}*H/mu;
end
end
for i=1:frf
    for j=1:exf
        disp(['Analizando la frecuencia ', num2str(fv(i)), ' Hz y el
ensayo ', num2str(j)])
        %%% Cálculo de la velocidad
        load(archfuerza{i,j})
        FM = data(:, [2:7]);
        FM = FM-mean(FM(1:500,:)); %AQUÍ HACE EL CERO PERO SOLO CON 500
DATOS SE PODRÍA HACER HASTA LIMIT(2)*200
        Cn = 1;
        forces = Calibration_SRI_M3706B_sn3790 ( FM, Cn )/1000;
        Fx=-forces(:,1); %dos negativos bien???
        Fy=-forces(:,2);
        Fz = forces(:,3);
        time = data(:,1)/Ff;
        m=find(time>=limit(3) & time<=limit(4));

        PDFY_total=[];

        bef=find(time>limit(1) & time<limit(2));
        BEF=[mean(Fx(bef)) mean(Fy(bef)) mean(Fz(bef))];
        aft=find(time>limit(5) & time<limit(6));
        AFT=[mean(Fx(aft)) mean(Fy(aft)) mean(Fz(aft))];
        TARE{i,j}=mean([BEF; AFT])';
        T{i,j}=(BEF-AFT)/(0.5*1.2*Uf{i,j}^2*A);
        T_AFT{i,j}=AFT/(0.5*1.2*Uf{i,j}^2*A);
        T_BEF{i,j}=BEF/(0.5*1.2*Uf{i,j}^2*A);
        %AQUÍ ESTÁ RESTANDO ALGO
        F_T{i,j}=mean(forces(m,1:3),1)'-TARE{i,j};%
        Fx_t{i,j}=- (forces(m,1)-TARE{i,j}(1,1)); % %% FACTOR A CALCULAR
CON LOS PDF DE LA SIDE FORCE
        Fy_t{i,j}=- (forces(m,2)-TARE{i,j}(2,1));%
        Fz_t{i,j}=forces(m,3)-TARE{i,j}(3,1);%
        Brazo{i,j}=mean(forces(m,4))/mean(forces(m,2));
        Mx{i,j}=mean(forces(m,4));

        cx{i,j}=Fx_t{i,j}/(0.5*1.2*Uf{i,j}^2*A);
        cy{i,j}=Fy_t{i,j}/(0.5*1.2*Uf{i,j}^2*A);
        cz{i,j}=Fz_t{i,j}/(0.5*1.2*Uf{i,j}^2*A);
        CX{i,j}=-F_T{i,j}(1,1)/(0.5*1.2*Uf{i,j}^2*A);
        CY{i,j}=-F_T{i,j}(2,1)/(0.5*1.2*Uf{i,j}^2*A);
        CZ{i,j}=F_T{i,j}(3,1)/(0.5*1.2*Uf{i,j}^2*A);
        CYP{i,j}=sqrt(2)*rms(cy{i,j}-CY{i,j});

        %CYrms{i,j}=sqrt(2)*rms(cy{i,j}); NO ESTÁ BIEN PORQUE NO ESTÁ
%REFENCIADA IGUAL QUE EL RESTO PERO ES IGUAL CYP
        CYhilb{i,j}=mean(movmean(abs(hilbert(cy{i,j})-
mean(cy{i,j})),1000));

    %[cyfilt,acy,acym,otf,fil]=splinesf(ini,cy{i,j},Ff,nfiltff{i,j});
        [cyfilt,acy,acym,otf]=pasabaja(cy{i,j},Ff);
        cyf{i,j}=cyfilt;
        Acyf{i,j}=acy;
        Acymf{i,j}=acym;
        offsetff{i,j}=otf;
    end
end
end

```

```

CYf{i,j}=mean(Acymf{i,j});
%filt1f{i,j}=fil;

[cyfilt,acy,acym,otf]=splines(ini,cy{i,j},Ff,nfiltfs{i,j});
cys{i,j}=cyfilt;
Acy{i,j}=acy;
Acym{i,j}=acym;
offsetf{i,j}=otf;
CYs{i,j}=mean(Acym{i,j});

u10D=cy{i,j};
um10D=u10D-mean(u10D);

%señal,window,noverlap,nfft,frecuencia muestreo
[Pxxorig,Fworig]=pwelch(cy{i,j}-
mean(cy{i,j}),length(cy{i,j}),[],[],Ff); %Señal original cy
fftPxxorig{i,j}=[Pxxorig,Fworig];
[Pxx,Fw]=pwelch(cys{i,j},length(cys{i,j}),[],[],Ff); % Señal
spline cy
fftPxx{i,j}=[Pxx,Fw];
[Pxxf,Fwf]=pwelch(cyf{i,j},length(cyf{i,j}),[],[],Ff); %Señal
filtrada pasa baja
fftPxxf{i,j}=[Pxxf,Fwf];
[Pxx1,Fw1]=pwelch(cx{i,j}-
mean(cx{i,j}),length(cx{i,j}),[],[],Ff); %Señal original cx
fftPxx1{i,j}=[Pxx1,Fw1];
[Pxx2,Fw2]=pwelch(cz{i,j},length(cz{i,j}),[],[],Ff); %Señal
original cz
fftPxx2{i,j}=[Pxx2,Fw2];
end
end
for i=1:frf
    for j=1:exf
        figure(contgraf)
        hold on
        plot(time,movingmean(Fx,150),'k')
        ylabel('$F_x(N)$','interpreter',
'Latex','fontweight','bold','FontSize',14);
        xlabel('$t(s)$','interpreter',
'Latex','fontweight','bold','FontSize',14);
        set(gcf,'color','w');
        set(gca,'FontSize',14);
        set(gca,'TickLabelInterpreter','Latex')
        title(['Re = ',num2str(Re{i,j}),' ',num2str(fv(i)),'
Hz'],'interpreter','Latex')
        off2=0;
        plot([limit(1) limit(1)],[-0.8 0.8]-off2,'k-')
        plot([limit(2) limit(2)],[-0.8 0.8]-off2,'k-')
        plot([limit(3) limit(3)],[-0.8 0.8]-off2,'k-')
        plot([limit(4) limit(4)],[-0.8 0.8]-off2,'k-')
        plot([limit(5) limit(5)],[-0.8 0.8]-off2,'k-')
        plot([limit(6) limit(6)],[-0.8 0.8]-off2,'k-')
        contgraf=contgraf+1;

        figure(contgraf)
        hold on
        plot(time(m),cy{i,j},'r')
        plot(time(m),cyf{i,j}+offsetff{i,j},'k')
        plot(time(m),cys{i,j}+offsetf{i,j},'b')
        plot(time(m),Acyf{i,j}+offsetff{i,j},'y')
        plot(time(m),Acy{i,j}+offsetf{i,j},'g')

```

```

plot(time(m),Acymf{i,j}+offsetff{i,j},'c')
plot(time(m),Acym{i,j}+offsetf{i,j},'m')
title(['cy en función del tiempo ',num2str(fv(i)),' Hz'])
contgraf=contgraf+1;

tc=time(m);
mm1=find(tc>=100,1,'first');
mm2=find(tc>=100.4,1,'first');
figure(contgraf)
hold on
plot(tc(mm1:mm2),cy{i,j}(mm1:mm2),'r','linewidth',1)

plot(tc(mm1:mm2),cyf{i,j}(mm1:mm2)+offsetff{i,j},'k','linewidth',1)
plot(tc(mm1:mm2),cys{i,j}(mm1:mm2)+offsetf{i,j},'b','linewidth',1)
plot(tc(mm1:mm2),Acyf{i,j}(mm1:mm2)+offsetff{i,j},'y','linewidth',1)
plot(tc(mm1:mm2),Acy{i,j}(mm1:mm2)+offsetf{i,j},'g','linewidth',1)
plot(tc(mm1:mm2),Acymf{i,j}(mm1:mm2)+offsetff{i,j},'c','linewidth',1)
plot(tc(mm1:mm2),Acym{i,j}(mm1:mm2)+offsetf{i,j},'m','linewidth',1)
grid on
grid minor
legend('Original','Fitro pasa baja','Spline','Hilbert filtro
pasa baja','Hilbert Spline','Mm Hilbert filtro pasa baja','Mm Hilbert
Spline','FontSize',10,'Location','southeast')
title(['\it cy en función del tiempo a ',num2str(fv(i)),'
Hz'],'FontSize',14)
ylabel('\it cy','FontSize',14)
xlabel('\it Tiempo (s)','FontSize',14)
set(gcf,'color','w');
set(gca,'FontSize',14);
set(gca,'TickLabelInterpreter','Latex')
contgraf=contgraf+1;

% %          figure(contgraf)
% %          subplot_tight(2,1,1,[0.075 0.07])
% %          hold on
% %          plot(fftPxxorig{i,j}(:,2),fftPxxorig{i,j}(:,1),'-r')
% %          plot(fftPxxf{i,j}(:,2),fftPxxf{i,j}(:,1),'-k')
% %          plot(fftPxx{i,j}(:,2),fftPxx{i,j}(:,1),'-b')
% %          xlim([0 48])
% %          grid on
% %          grid minor
% %          title(['$PSD\sim de\ la\ se\tilde{n}\ al\ de\ C_y$ ',num2str(fv(i)),'
Hz'],'interpreter','Latex')
% %          set(gca,'FontSize',8);
% %          ylabel('$PSD\sim (Power\ Spectral\ density)$','interpreter',
'Latex','fontweight','bold');
% %          xlabel('$St$', 'interpreter','Latex','fontweight','bold');
% %          subplot_tight(2,1,2,[0.075 0.07])
% %          hold on
% %          plot(fftPxxorig{i,j}(:,2)*H/Uf{i,j},fftPxxorig{i,j}(:,1),'-
r')
% %          plot(fftPxxf{i,j}(:,2)*H/Uf{i,j},fftPxxf{i,j}(:,1),'-k')
% %          plot(fftPxx{i,j}(:,2)*H/Uf{i,j},fftPxx{i,j}(:,1),'-b')
% %          xlim([0 48*H/Uf{i,j}])
% %          grid on
% %          grid minor

```

```

% %           set(gca,'FontSize',8);
% %           ylabel('$PSD~(Power~Spectral~density)$', 'interpreter',
'Latex','fontweight','bold');
% %           xlabel('$St$', 'interpreter', 'Latex','fontweight','bold');
% %           contgraf=contgraf+1;
% %
% %           figure(contgraf)
% %           subplot_tight(2,1,1,[0.075 0.075])
% %           hold on
% %           plot(fftPxx1{i,j}(:,2),fftPxx1{i,j}(:,1),'-k')
% %           xlim([0 48])
% %           grid on
% %           grid minor
% %           set(gca,'FontSize',8);
% %           ylabel('$PSD~(Power~Spectral~density)$', 'interpreter',
'Latex','fontweight','bold');
% %           xlabel('$St$', 'interpreter', 'Latex','fontweight','bold');
% %           title(['$PSD~de~la~se\tilde{n}al~de~C_x$ ',num2str(fv(i)),
Hz'],'interpreter', 'Latex')
% %           subplot_tight(2,1,2,[0.075 0.075])
% %           hold on
% %           plot(fftPxx1{i,j}(:,2)*H/Uf{i,j},fftPxx1{i,j}(:,1),'-k')
% %           xlim([0 48*H/Uf{i,j}])
% %           grid on
% %           grid minor
% %           set(gca,'FontSize',8);
% %           ylabel('$PSD~(Power~Spectral~density)$', 'interpreter',
'Latex','fontweight','bold');
% %           xlabel('$St$', 'interpreter', 'Latex','fontweight','bold');
% %           contgraf=contgraf+1;

figure(contgraf)
b=axes('Position',[.13 .13 .8 1e-12]);
a=axes('Position',[.13 .25 .8 .68]);
plot(a,fftPxxorig{i,j}(:,2).*H/Ud{i,j},fftPxxorig{i,j}(:,1),'-
r')

plot(a,fftPxxf{i,j}(:,2).*H/Ud{i,j},fftPxxf{i,j}(:,1),'-k')
plot(a,fftPxx{i,j}(:,2).*H/Ud{i,j},fftPxx{i,j}(:,1),'-b')
set(a,'xlim',[0 48*H/Ud{i,j}]);
set(b,'xlim',[0 48]);
set(gcf,'color','w');
set(a,'FontSize',14);
set(b,'FontSize',14);
set(a,'TickLabelInterpreter','Latex')
set(b,'TickLabelInterpreter','Latex')
xlabel(a,'$St$', 'interpreter',
'Latex','fontweight','bold','FontSize', 14)
xlabel(b,'$f~(Hz)$', 'interpreter',
'Latex','fontweight','bold','FontSize', 14)
ylabel(a,'$PSD~(Power~Spectral~density)$', 'interpreter',
'Latex','fontweight','bold','FontSize', 14);
title(a,'$PSD~de~la~se\tilde{n}al~de~C_y$', 'interpreter',
'Latex');

contgraf=contgraf+1;

figure(contgraf)
b=axes('Position',[.13 .13 .8 1e-12]);
a=axes('Position',[.13 .25 .8 .68]);
plot(a,fftPxx1{i,j}(:,2).*H/Ud{i,j},fftPxx1{i,j}(:,1),'-k')
set(a,'xlim',[0 48*H/Ud{i,j}]);
set(b,'xlim',[0 48]);

```

```

        set(gcf,'color','w');
        set(a,'FontSize',14);
        set(b,'FontSize',14);
        set(a,'TickLabelInterpreter','Latex');
        set(b,'TickLabelInterpreter','Latex');
        xlabel(a,'$St$', 'interpreter',
'Latex','fontweight','bold','FontSize', 14)
        xlabel(b,'$f\sim$(Hz)$', 'interpreter',
'Latex','fontweight','bold','FontSize', 14)
        ylabel(a,'$PSD\sim$(Power\simSpectral\simdensity)$', 'interpreter',
'Latex','fontweight','bold','FontSize', 14);
        title(a,'$PSD\sim de\sim la\sim se\tilde{n}al\sim de\sim C_x$', 'interpreter',
'Latex');
        contgraf=contgraf+1;
        %         figure(contgraf)
        %         plot(fftPxx2{i,j}(:,2),fftPxx2{i,j}(:,1),'-k')%*H/Uf{i,j}
        %         hold on
        %         ylabel('$PSD\sim$(Power\simSpectral\simdensity)$', 'interpreter',
'Latex','fontweight','bold','FontSize', 14);
        %         xlabel('$St$', 'interpreter',
'Latex','fontweight','bold','FontSize', 14);
        %         xlim([0 0.3])
        %         set(gcf,'color','w');
        %         set(gca,'FontSize',14);
        %         set(gca,'TickLabelInterpreter','Latex')
        %         title(['$PSD\sim de\sim la\sim se\tilde{n}al\sim de\sim C_z$ ',num2str(fv(i)),
Hz'],'interpreter', 'Latex')
        %         [~,no2]=max(fftPxx2{i,j}(:,1));
        %         txt = ['f=' num2str(fftPxx2{i,j}(no2,2)) ' St'];
        text(4,0.5,txt,'interpreter', 'Latex','FontSize', 14)
        %         contgraf=contgraf+1;

    end
end
else
    disp('No se analizan las fuerzas adquiridas porque se ha pedido o
porque no existen.')
end
toc

%% GUARDAR GRÁFICAS Y VARIABLES
if guag==1
    % %         contgraf=contgraf-1;
    % %         guardar(qg,contgraf,lama,laser,distlaser,archfuerza)
    if qg==0 || qg==2
        carpg=['G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\',lama,'\Resultados','\'];

        for i=1:contgraf-1
            filename=[carpg,lama,'_',laser,'
laser_',distlaser,'_',num2str(i)];
            saveas(figure(i),filename);
            saveas(figure(i),filename,'tiffn');
        end
    end

    if qg==1 || qg==2
        barra=find(archfuerza{1,1}=='\');
        cg1='G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos completos\';
        cg2=lama;
        cg3=archfuerza{1,1}(barra(7)+1:end-4);
    end
end

```

```
barrab=find(CG3=='_');  
CG4=CG3(1:barrab(2)-1);  
fname=[CG1,CG2,'\',CG4,'_',laser,'laser','_todovar.mat'];  
save(fname);  
end  
end
```

7.3 general_graf.m

```

clear all
close all

ens={'Tubo';'Transparente';'TransparenteSinPiezo';'Blancatranslucida';'Negra-
adura';'Negrablanda';'Blancablanda'};
[ereal,~]=size(ens);
ls={'con','sin'};
dt={'52 mm','72 mm'};

CXglobal=cell(ereal,3);
CYhilbglobal=cell(ereal,3);
CYglobal=cell(ereal,3);
CYfglobal=cell(ereal,3);
CYpglobal=cell(ereal,3);
CYrmsglobal=cell(ereal,3);
CYsglobal=cell(ereal,3);
CZglobal=cell(ereal,3);
Adistglobal=cell(ereal,3);
RMSglobal=cell(ereal,3);
picoglobal=cell(ereal,3);
fftensayopglobal=cell(ereal,3);
Uglobal=cell(ereal,3);
Reglobal=cell(ereal,3);
fftPxxglobal=cell(ereal,3);
fftPxx1global=cell(ereal,3);
fftPxx2global=cell(ereal,3);
fftPxxfglobal=cell(ereal,3);
fftPxxorigglobal=cell(ereal,3);

[~,~,~,~,~,archfuerza] = Cargar_datos(ens{1},'sin','nada');
barra=find(archfuerza{1,1}=='\');
cg1='G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos completos\';
cg2=ens{1};
cg3=archfuerza{1,1}(barra(7)+1:end-4);
barrab=find(cg3=='_');
cg4=cg3(1:barrab(2)-1);
fname=[cg1,cg2,'\',cg4,'_', 'sin','laser','_todovar.mat'];
load(fname)
CXglobal{1,1}=CX;
CYhilbglobal{1,1}=CYhilb;
CYglobal{1,1}=CY;
CYfglobal{1,1}=CYf;
CYpglobal{1,1}=CYp;
CYrmsglobal{1,1}=CYrms;
CYsglobal{1,1}=CYs;
CZglobal{1,1}=CZ;
Uglobal{1,1}=Uf;
Reglobal{1,1}=Re;
fftPxxglobal{1,1}=fftPxx;
fftPxx1global{1,1}=fftPxx1;
fftPxx2global{1,1}=fftPxx2;
fftPxxfglobal{1,1}=fftPxx;
fftPxxorigglobal{1,1}=fftPxxorig;
if exist('Adist')==1
    Adistglobal{1,1}=Adist;
    RMSglobal{1,1}=RMS;
    picoglobal{1,1}=pico;
    fftensayopglobal{1,1}=fftensayop;
end

```

```

for ig=2:ereal

    cont=1;

    if strcmp(ens{ig},'Negradura') || strcmp(ens{ig},'Blancatranslucida')
        [~,~,~,~,~,archfuerza] = Cargar_datos(ens{ig},ls{1},dt{1}); %con
láser y 52 mm solo para Blancatranslucida y Negradura
        barra=find(archfuerza{1,1}=='\');
        cg1='G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos completos\';
        cg2=ens{ig};
        cg3=archfuerza{1,1}(barra(7)+1:end-4);
        barrab=find(cg3=='_');
        cg4=cg3(1:barrab(2)-1);
        fname=[cg1,cg2,'\ ',cg4,'_',ls{1},'laser','_todovar.mat'];
        load(fname)
        CXglobal{ig,cont}=CX;
        CYhilbglobal{ig,cont}=CYhilb;
        CYglobal{ig,cont}=CY;
        CYfglobal{ig,cont}=CYf;
        CYpglobal{ig,cont}=CYp;
        CYrmsglobal{ig,cont}=CYrms;
        CYsglobal{ig,cont}=CYs;
        CZglobal{ig,cont}=CZ;
        Uglobal{ig,cont}=Uf;
        Reglobal{ig,cont}=Re;
        fftPxxglobal{ig,cont}=fftPxx;
        fftPxx1global{ig,cont}=fftPxx1;
        fftPxx2global{ig,cont}=fftPxx2;
        fftPxxfglobal{ig,cont}=fftPxx;
        fftPxxorigglobal{ig,cont}=fftPxxorig;
        if exist('Adist')==1
            Adistglobal{ig,cont}=Adist;
            RMSglobal{ig,cont}=RMS;
            picoglobal{ig,cont}=pico;
            fftensayopglobal{ig,cont}=fftensayop;
        end
        cont=cont+1;
        clear 'Adist' 'RMS' 'pico' 'fftensayop';
    end

    [~,~,~,~,~,archfuerza] = Cargar_datos(ens{ig},ls{1},dt{2}); %con láser
y 72 mm
    barra=find(archfuerza{1,1}=='\');
    cg1='G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos completos\';
    cg2=ens{ig};
    cg3=archfuerza{1,1}(barra(7)+1:end-4);
    barrab=find(cg3=='_');
    cg4=cg3(1:barrab(2)-1);
    fname=[cg1,cg2,'\ ',cg4,'_',ls{1},'laser','_todovar.mat'];
    load(fname)
    CXglobal{ig,cont}=CX;
    CYhilbglobal{ig,cont}=CYhilb;
    CYglobal{ig,cont}=CY;
    CYfglobal{ig,cont}=CYf;
    CYpglobal{ig,cont}=CYp;
    CYrmsglobal{ig,cont}=CYrms;
    CYsglobal{ig,cont}=CYs;
    CZglobal{ig,cont}=CZ;
    Uglobal{ig,cont}=Uf;
    Reglobal{ig,cont}=Re;
    fftPxxglobal{ig,cont}=fftPxx;

```

```

fftPxx1global{ig,cont}=fftPxx1;
fftPxx2global{ig,cont}=fftPxx2;
fftPxxfglobal{ig,cont}=fftPxx;
fftPxxorigglobal{ig,cont}=fftPxxorig;
if exist('Adist')==1
    Adistglobal{ig,cont}=Adist;
    RMSglobal{ig,cont}=RMS;
    picoglobal{ig,cont}=pico;
    fftensayopglobal{ig,cont}=fftensayop;
end
cont=cont+1;
clear 'Adist' 'RMS' 'pico' 'fftensayop';
[~,~,~,~,~,archfuerza] = Cargar_datos(ens{ig},ls{2},'nada'); %sin láser
y 72 mm
barra=find(archfuerza{1,1}=='\');
cg1='G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos completos\';
cg2=ens{ig};
cg3=archfuerza{1,1}(barra(7)+1:end-4);
barrab=find(cg3=='_');
cg4=cg3(1:barrab(2)-1);
fname=[cg1,cg2,'\ ',cg4,'_',ls{2},'laser','_todovar.mat'];
load(fname)
CXglobal{ig,cont}=CX;
CYhilbglobal{ig,cont}=CYhilb;
CYglobal{ig,cont}=CY;
CYfglobal{ig,cont}=CYf;
CYpglobal{ig,cont}=CYp;
CYrmsglobal{ig,cont}=CYrms;
CYsglobal{ig,cont}=CYs;
CZglobal{ig,cont}=CZ;
Uglobal{ig,cont}=Uf;
Reglobal{ig,cont}=Re;
fftPxxglobal{ig,cont}=fftPxx;
fftPxx1global{ig,cont}=fftPxx1;
fftPxx2global{ig,cont}=fftPxx2;
fftPxxfglobal{ig,cont}=fftPxx;
fftPxxorigglobal{ig,cont}=fftPxxorig;
if exist('Adist')==1
    Adistglobal{ig,cont}=Adist;
    RMSglobal{ig,cont}=RMS;
    picoglobal{ig,cont}=pico;
    fftensayopglobal{ig,cont}=fftensayop;
end
clear 'Adist' 'RMS' 'pico' 'fftensayop';
end

save('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\Global\Ensayos_global.mat','CXglobal',...

'CYhilbglobal','CYglobal','CYfglobal','CYpglobal','CYrmsglobal','CYsglobal'
,'CZglobal',...

'Adistglobal','RMSglobal','picoglobal','fftensayopglobal','Uglobal','Reglob
al','fftPxxglobal',...
'fftPxx1global','fftPxx2global','fftPxxfglobal','fftPxxorigglobal')

```

7.4 Cargar_datos.m

```

function
[ensayo, fv, ex, fr, arch, archfuerza, senal, frf, exf, limit, nfiltd, nfiltdfs] =
Cargar_datos(lama, laser, dist)

%senal=[laser piezoeléctrico];
arch='G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos completos\';
limit=[0 20 50 135 160 180];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama, 'Tubo')

archfuerza={ [arch, lama, '\Ensayo_tubo_10_1.mat'], [arch, lama, '\Ensayo_tubo_10_2.mat']; ...

[arch, lama, '\Ensayo_tubo_20_1.mat'], [arch, lama, '\Ensayo_tubo_20_2.mat'];
...

[arch, lama, '\Ensayo_tubo_25_1.mat'], [arch, lama, '\Ensayo_tubo_25_2.mat'];
...

[arch, lama, '\Ensayo_tubo_30_1.mat'], [arch, lama, '\Ensayo_tubo_30_2.mat']};
    ensayo=[];
    [fr, ex]=size(ensayo);
    [frf, exf]=size(archfuerza);
    fv=[10, 20, 25, 30];
    senal=[0, 0];
    nfiltd={};
    nfiltdfs={0.99995, 0.99995; ...
              0.999995, 0.999995; ...
              0.999995, 0.999995; ...
              0.999999, 0.999999};
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama, 'Transparente')
    if strcmp(laser, 'con')
        load('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\Transparente\Ensayo_transparente_10_20.mat')
        ensayo={Ensayo_transparente_10_1, Ensayo_transparente_10_2; ...
                Ensayo_transparente_20_1, Ensayo_transparente_20_1};
        [fr, ex]=size(ensayo);

archfuerza={ [arch, lama, '\Ensayo_transparente_10_1.mat'], [arch, lama, '\Ensayo_
transparente_10_2.mat']; ...

[arch, lama, '\Ensayo_transparente_20_1.mat'], [arch, lama, '\Ensayo_transparente_20_2.mat']};
        [frf, exf]=size(archfuerza);
        senal=[1, 1];
        nfiltd={0.99995, 0.99995; ...
                0.9999995, 0.9999995};
        nfiltdfs={0.99995, 0.99995; ...
                0.999999, 0.999999};
    end
    if strcmp(laser, 'sin')
        load('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\Transparente\Ensayo_transparente_10_20_sinlaser.mat')

```

```

ensayo={Ensayo_transparente_10_1_sinlaser,Ensayo_transparente_10_2_sinlaser
; ...

Ensayo_transparente_20_1_sinlaser,Ensayo_transparente_20_1_sinlaser};
    [fr,ex]=size(ensayo);

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_transparente_10_1_sinlaser.mat'], [arch,lama
, '\Ensayo_transparente_10_2_sinlaser.mat']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_transparente_20_1_sinlaser.mat'], [arch,lama, '\Ensayo_tr
ansparente_20_2_sinlaser.mat']};
    [frf,exf]=size(archfuerza);
    senal=[0,1];
    nfiltd={};
    nfiltdfs={0.999995,0.999995; ...
              0.999995,0.999995};

    end
    fv=[10,20];
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama, 'TransparenteSinPiezo')
    if strcmp(laser, 'con')
        load('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\TransparenteSinPiezo\Ensayo_transparenteSinPiezo_10_20.mat')

ensayo={Ensayo_transparenteSinpiezo_10_1,Ensayo_transparenteSinpiezo_10_2;
...

Ensayo_transparenteSinpiezo_20_1,Ensayo_transparenteSinpiezo_20_2};
    [fr,ex]=size(ensayo);

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_transparenteSinpiezo_10_1.mat'], [arch,lama,
'\Ensayo_transparenteSinpiezo_10_2.mat']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_transparenteSinpiezo_20_1.mat'], [arch,lama, '\Ensayo_tra
nsparenteSinpiezo_20_2.mat']};
    [frf,exf]=size(archfuerza);
    senal=[1,0];
    nfiltd={0.9999,0.9999; ...
            0.99999999,0.99999999};
    nfiltdfs={0.99995,0.99995; ...
              0.999999,0.999999};

    end
    if strcmp(laser, 'sin')
        ensayo={};
        [fr,ex]=size(ensayo);

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_transparenteSinpiezo_10_1_sinlaser.mat'];
...

[arch,lama, '\Ensayo_transparenteSinpiezo_20_1_sinlaser.mat']};
    [frf,exf]=size(archfuerza);
    senal=[0,0];
    limit=[0 20 50 117 160 180];
    nfiltd={};
    nfiltdfs={0.9999,0.9999; ...
              0.999999,0.999999};

    end
    fv=[10,20];

```

```

end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama, 'Blancatranslucida')
    if strcmp(laser, 'con') && strcmp(dist, '52 mm')
        load('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\Blancatranslucida\Ensayo_blancatranslucida_10_20_25.mat')
ensayo={Ensayo_blancatranslucida_10_1,Ensayo_blancatranslucida_10_2; ...
Ensayo_blancatranslucida_20_1,Ensayo_blancatranslucida_20_2};%...
%Ensayo_blancatranslucida_25_1,Ensayo_blancatranslucida_25_2};
    [fr,ex]=size(ensayo);

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_10_1.mat'], [arch,lama, '\E
nsayo_blancatranslucida_10_2.mat']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_20_1.mat'], [arch,lama, '\Ensayo_blanca
translucida_20_2.mat']};% ...

%[arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_25_1.mat'], [arch,lama, '\Ensayo_blanca
atranslucida_25_2.mat']};
    [frf,exf]=size(archfuerza);
    fv=[10,20,25];
    senal=[1,1];
    nfiltd={0.99999,0.99999; ...
            0.9999995,0.9999995};
    nfiltdfs={0.999999,0.999999; ...
            0.999999,0.999999};%999
    end
    if strcmp(laser, 'sin') %&& strcmp(dist, '52 mm')
        load('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\Blancatranslucida\Ensayo_blancatranslucida_10_20_25_30_sinlaser.m
at')
ensayo={Ensayo_blancatranslucida_10_1_sinlaser,Ensayo_blancatranslucida_10_
2_sinlaser; ...
Ensayo_blancatranslucida_20_1_sinlaser,Ensayo_blancatranslucida_20_2_sinlas
er};%...
%Ensayo_blancatranslucida_25_1_sinlaser,Ensayo_blancatranslucida_25_1_sinla
ser;%...
    %
Ensayo_blancatranslucida_30_1_sinlaser,Ensayo_blancatranslucida_30_1_sinlas
er};
        disp('Advertencia para 25 Hz y 30 Hz es el mismo ensayo repetido')
        [fr,ex]=size(ensayo);

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_10_1_sinlaser.mat'], [arch
,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_10_2_sinlaser.mat']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_20_1_sinlaser.mat'], [arch,lama, '\Ensa
yo_blancatranslucida_20_2_sinlaser.mat']}; %...

%[arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_25_1_sinlaser.mat'], [arch,lama, '\Ens
ayo_blancatranslucida_25_1_sinlaser.mat']; ...

%[arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_30_1_sinlaser.mat'], [arch,lama, '\Ens
ayo_blancatranslucida_30_1_sinlaser.mat']};

```

```

disp('Advertencia para 25 Hz y 30 Hz es el mismo ensayo repetido')
[frf,exf]=size(archfuerza);
fv=[10,20,25,30];
senal=[0,1];
nfiltd={};
nfiltdfs={0.999999,0.999999; ...
           0.999999,0.999999};%999
end
if strcmp(laser,'con') && strcmp(dist, '72 mm')
    load('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\Blancatranslucida\Ensayo_blanccatranslucida72_10_20_25.mat')
    ensayo={Ensayo_blanccatranslucida72_10_1; ...
            Ensayo_blanccatranslucida72_20_1};%...
            %Ensayo_blanccatranslucida72_25_1};
    [fr,ex]=size(ensayo);
    archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_blanccatranslucida72_10_1.mat']; ...
                 [arch,lama, '\Ensayo_blanccatranslucida72_20_1.mat'] };%
    ...
                %[arch,lama, '\Ensayo_blanccatranslucida72_25_1.mat'] };
    [frf,exf]=size(archfuerza);
    fv=[10,20,25];
    senal=[1,1];
    nfiltd={0.999999995; ...
            0.999999999};
    nfiltdfs={0.99999,0.99999; ...
              0.999999,0.999999};
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama,'Negradura')
    if strcmp(laser,'con')&& strcmp(dist, '52 mm')
        load('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\Negradura\Ensayo_negradura_10_20_30.mat')
        ensayo={Ensayo_negradura_10_1,Ensayo_negradura_10_2; ...
                Ensayo_negradura_20_1,Ensayo_negradura_20_2};%...
                %Ensayo_negradura_30_1,Ensayo_negradura_30_2};
        [fr,ex]=size(ensayo);

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_negradura_10_1.mat'], [arch,lama, '\Ensayo_ne
gradura_10_2.mat']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_negradura_20_1.mat'], [arch,lama, '\Ensayo_negradura_20_2
.mat'] };% ...

%[arch,lama, '\Ensayo_negradura_30_1.mat'], [arch,lama, '\Ensayo_negradura_30_
1.mat'] };
        [frf,exf]=size(archfuerza);
        fv=[10,20,30];
        senal=[1,1];
        nfiltd={0.99999,0.99999; ...
                0.999995,0.999995};
        nfiltdfs={0.999999,0.999999; ...
                  0.999999,0.999999};
    end
    if strcmp(laser,'sin') %&& strcmp(dist, '52 mm')
        load('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\Negradura\Ensayo_negradura_10_20_30_sinlaser.mat')
        ensayo={Ensayo_negradura_10_1_sinlaser,Ensayo_negradura_10_2_sinlaser; ...

```

```

Ensayo_negradura_20_1_sinlaser,Ensayo_negradura_20_2_sinlaser};%...

%Ensayo_negradura_30_1_sinlaser,Ensayo_negradura_30_2_sinlaser};
    [fr,ex]=size(ensayo);

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_negradura_10_1_sinlaser.mat'], [arch,lama, '\
Ensayo_negradura_10_2_sinlaser.mat']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_negradura_20_1_sinlaser.mat'], [arch,lama, '\Ensayo_negra
dura_20_2_sinlaser.mat']}; %...

%[arch,lama, '\Ensayo_negradura_30_1_sinlaser.mat'], [arch,lama, '\Ensayo_negr
adura_30_1_sinlaser.mat']};
    [frf,exf]=size(archfuerza);
    fv=[10,20,30];
    senal=[0,1];
    nfiltd={};
    nfiltdfs={0.99999,0.99999; ...
              0.99999,0.99999};
    end
    if strcmp(laser, 'con') && strcmp(dist, '72 mm')
        load('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\Negradura\Ensayo_negradura72_10_20_25_30.mat')
        ensayo={Ensayo_negradura72_10_1; ...
                Ensayo_negradura72_20_1};%...
                % Ensayo_negradura72_25_1;...
                %Ensayo_negradura72_30_1};
        [fr,ex]=size(ensayo);
        archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_negradura72_10_1.mat']; ...
                    [arch,lama, '\Ensayo_negradura72_20_1.mat']}; %...
                    %[arch,lama, '\Ensayo_negradura72_25_1.mat']; ...
                    %[arch,lama, '\Ensayo_negradura72_30_1.mat']};
        limit=[0 20 61 135 160 180];
        [frf,exf]=size(archfuerza);
        fv=[10,20,25,30];
        senal=[1,1];
        nfiltd={0.99999; ...
                0.999995};
        nfiltdfs={0.999995; ...
                  0.999995};
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama, 'Negrablanda')
    if strcmp(laser, 'con')
        load('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\Negrablanda\Ensayo_negrablanda_10_20.mat')
        ensayo={Ensayo_negrablanda_10_1,Ensayo_negrablanda_10_2; ...
                Ensayo_negrablanda_20_1,Ensayo_negrablanda_20_2};
        [fr,ex]=size(ensayo);

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_negrablanda_10_1.mat'], [arch,lama, '\Ensayo_
negrablanda_10_2.mat']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_negrablanda_20_1.mat'], [arch,lama, '\Ensayo_negrablanda_
20_2.mat']};
        limit=[0 20 60 135 160 180];
        [frf,exf]=size(archfuerza);
        senal=[1,1];

```

```

nfiltd={0.9999999,0.9999999; ...
        0.9999995,0.9999995};%con un 9 en vez de 5 se ajusta mejor
pero en los picos hacia abajo se mete el spline
nfiltdfs={0.999995,0.999995; ...
          0.999999,0.999999};

end
if strcmp(laser,'sin')
    load('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\Negrablанда\Ensayo_negrablанда_10_20_sinlaser.mat')

ensayo={Ensayo_negrablанда_10_1_sinlaser,Ensayo_negrablанда_10_2_sinlaser;
...

Ensayo_negrablанда_20_1_sinlaser,Ensayo_negrablанда_20_2_sinlaser};
[fr,ex]=size(ensayo);

archfuerza={ [arch,lama,'\Ensayo_negrablанда_10_1_sinlaser.mat'], [arch,lama,
'\Ensayo_negrablанда_10_2_sinlaser.mat']; ...

[arch,lama,'\Ensayo_negrablанда_20_1_sinlaser.mat'], [arch,lama,'\Ensayo_neg
rablанда_20_2_sinlaser.mat']};
[frf,exf]=size(archfuerza);
senal=[0,1];
nfiltd={};
nfiltdfs={0.999995,0.999995; ...
          0.999995,0.999995};

end
fv=[10,20];
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama,'Blancablанда')
    if strcmp(laser,'con')
        load('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\Blancablанда\Ensayo_blancablанда_10_20.mat')
        ensayo={Ensayo_blancablанда_10_1,Ensayo_blancablанда_10_2; ...
                Ensayo_blancablанда_20_1,Ensayo_blancablанда_20_2};
        [fr,ex]=size(ensayo);

archfuerza={ [arch,lama,'\Ensayo_blancablанда_10_1.mat'], [arch,lama,'\Ensayo
_blancablанда_10_2.mat']; ...

[arch,lama,'\Ensayo_blancablанда_20_1.mat'], [arch,lama,'\Ensayo_blancablанд
a_20_2.mat']};
[frf,exf]=size(archfuerza);
senal=[1,1];
nfiltd={0.9999,0.9999; ...
        0.99999995,0.99999995};
nfiltdfs={0.99999,0.99999; ...
          0.999999,0.999999};

end
if strcmp(laser,'sin')
    load('G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos
completos\Blancablанда\Ensayo_blancablанда_10_20_sinlaser.mat')

ensayo={Ensayo_blancablанда_10_1_sinlaser,Ensayo_blancablанда_10_2_sinlaser
; ...

Ensayo_blancablанда_20_1_sinlaser,Ensayo_blancablанда_20_2_sinlaser};
[fr,ex]=size(ensayo);

```

```
archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_blancablanda_10_1_sinlaser.mat'], [arch,lama, '\Ensayo_blancablanda_10_2_sinlaser.mat']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_blancablanda_20_1_sinlaser.mat'], [arch,lama, '\Ensayo_blancablanda_20_2_sinlaser.mat']};
    limit=[0 20 58 135 160 180];
    [frf,exf]=size(archfuerza);
    senal=[0,1];
    nfiltd={};
    nfiltdfs={0.99999,0.99999; ...
              0.999995,0.999995};
end
fv=[10,20];
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

7.5 splines.m

```
function [dist,Am,Amm,offset]=splines (ini,mag,Fs,nf)

%nf=0.999999;%999

offset=mean (mag) ;
tiempo=linspace (ini, ((length (mag)-1)/Fs+ini), length (mag)) ;
magnitud=mag-offset;
ps=csaps (tiempo,magnitud,nf) ;
dist=fnval (ps,tiempo) ;

Ac=hilbert (dist) ;

Am=abs (Ac) ;
Amm=movmean (Am,1000) ;
```

7.6 pasabaja.m

```
function [magnitud1,Am,Amm,offset]=pasabaja (mag,Fs)

offset=mean (mag) ;
magnitud=mag-offset;
magnitud1=lowpass (magnitud,48,Fs) ;

Ac=hilbert (magnitud1) ;

Am=abs (Ac) ;
Amm=movmean (Am,1000) ;
```

7.7 guardar_fuerzastxt.m

```

clear all
close all

lama='Blancablanda';
laser='sin';
dist='72 mm';
tic
arch='G:\Mi unidad\Universidad\TFM\Matlab\Ensayos completos\';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama, 'Tubo')

archfuerza={ [arch, lama, '\Ensayo_tubo_10_1.txt'], [arch, lama, '\Ensayo_tubo_10_2.txt']; ...

[arch, lama, '\Ensayo_tubo_20_1.txt'], [arch, lama, '\Ensayo_tubo_20_2.txt'];
...

[arch, lama, '\Ensayo_tubo_25_1.txt'], [arch, lama, '\Ensayo_tubo_25_2.txt'];
...

[arch, lama, '\Ensayo_tubo_30_1.txt'], [arch, lama, '\Ensayo_tubo_30_2.txt']};
    [frf, exf]=size(archfuerza);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama, 'Transparente')
    if strcmp(laser, 'con')

archfuerza={ [arch, lama, '\Ensayo_transparente_10_1.txt'], [arch, lama, '\Ensayo_transparente_10_2.txt']; ...

[arch, lama, '\Ensayo_transparente_20_1.txt'], [arch, lama, '\Ensayo_transparente_20_2.txt']};
    [frf, exf]=size(archfuerza);
    end
    if strcmp(laser, 'sin')

archfuerza={ [arch, lama, '\Ensayo_transparente_10_1_sinlaser.txt'], [arch, lama, '\Ensayo_transparente_10_2_sinlaser.txt']; ...

[arch, lama, '\Ensayo_transparente_20_1_sinlaser.txt'], [arch, lama, '\Ensayo_transparente_20_2_sinlaser.txt']};
    [frf, exf]=size(archfuerza);
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama, 'TransparenteSinPiezo')
    if strcmp(laser, 'con')

archfuerza={ [arch, lama, '\Ensayo_transparenteSinpiezo_10_1.txt'], [arch, lama, '\Ensayo_transparenteSinpiezo_10_2.txt']; ...

[arch, lama, '\Ensayo_transparenteSinpiezo_20_1.txt'], [arch, lama, '\Ensayo_transparenteSinpiezo_20_2.txt']};
    [frf, exf]=size(archfuerza);
    end
    if strcmp(laser, 'sin')

```

```

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_transparenteSinpiezo_10_1_sinlaser.txt'];
...

[arch,lama, '\Ensayo_transparenteSinpiezo_20_1_sinlaser.txt'];
    [frf,exf]=size(archfuerza);
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama, 'Blancatranslucida')
    if strcmp(laser, 'con') && strcmp(dist, '52 mm')

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_10_1.txt'], [arch,lama, '\E
nsayo_blancatranslucida_10_2.txt']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_20_1.txt'], [arch,lama, '\Ensayo_blanca
translucida_20_2.txt'];% ...

%[arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_25_1.txt'], [arch,lama, '\Ensayo_blanca
atranslucida_25_2.txt'];
    [frf,exf]=size(archfuerza);
    end
    if strcmp(laser, 'sin') && strcmp(dist, '52 mm')

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_10_1_sinlaser.txt'], [arch
,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_10_2_sinlaser.txt']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_20_1_sinlaser.txt'], [arch,lama, '\Ensa
yo_blancatranslucida_20_2_sinlaser.txt']; %...

%[arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_25_1_sinlaser.txt'], [arch,lama, '\Ens
ayo_blancatranslucida_25_1_sinlaser.txt']; ...

%[arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida_30_1_sinlaser.txt'], [arch,lama, '\Ens
ayo_blancatranslucida_30_1_sinlaser.txt'];
    disp('Advertencia para 25 Hz y 30 Hz es el mismo ensayo repetido')
    [frf,exf]=size(archfuerza);
    end
    if strcmp(laser, 'con') && strcmp(dist, '72 mm')
        archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida72_10_1.txt']; ...
            [arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida72_20_1.txt'];%
...
                %[arch,lama, '\Ensayo_blancatranslucida72_25_1.txt'];
            [frf,exf]=size(archfuerza);
        end
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama, 'Negradura')
    if strcmp(laser, 'con') && strcmp(dist, '52 mm')

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_negradura_10_1.txt'], [arch,lama, '\Ensayo_ne
gradura_10_2.txt']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_negradura_20_1.txt'], [arch,lama, '\Ensayo_negradura_20_2
.txt'];% ...

%[arch,lama, '\Ensayo_negradura_30_1.txt'], [arch,lama, '\Ensayo_negradura_30_
1.txt'];
    [frf,exf]=size(archfuerza);

```

```

end
if strcmp(laser, 'sin') && strcmp(dist, '52 mm')

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_negradura_10_1_sinlaser.txt'], [arch,lama, '\
Ensayo_negradura_10_2_sinlaser.txt']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_negradura_20_1_sinlaser.txt'], [arch,lama, '\Ensayo_negra
dura_20_2_sinlaser.txt']; %...

%[arch,lama, '\Ensayo_negradura_30_1_sinlaser.txt'], [arch,lama, '\Ensayo_negr
adura_30_1_sinlaser.txt'];
    [frf,exf]=size(archfuerza);
end
if strcmp(laser, 'con') && strcmp(dist, '72 mm')
    archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_negradura72_10_1.txt']; ...
                [arch,lama, '\Ensayo_negradura72_20_1.txt']; %...
                %[arch,lama, '\Ensayo_negradura72_25_1.txt']; ...
                %[arch,lama, '\Ensayo_negradura72_30_1.txt'];
    [frf,exf]=size(archfuerza);
end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama, 'Negrablanda')
    if strcmp(laser, 'con')

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_negrablanda_10_1.txt'], [arch,lama, '\Ensayo_
negrablanda_10_2.txt']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_negrablanda_20_1.txt'], [arch,lama, '\Ensayo_negrablanda_
20_2.txt'];
    [frf,exf]=size(archfuerza);
end
    if strcmp(laser, 'sin')

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_negrablanda_10_1_sinlaser.txt'], [arch,lama,
'\Ensayo_negrablanda_10_2_sinlaser.txt']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_negrablanda_20_1_sinlaser.txt'], [arch,lama, '\Ensayo_neg
rablanda_20_2_sinlaser.txt'];
    [frf,exf]=size(archfuerza);
end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if strcmp(lama, 'Blancablanda')
    if strcmp(laser, 'con')

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_blancablanda_10_1.txt'], [arch,lama, '\Ensayo
_blancablanda_10_2.txt']; ...

[arch,lama, '\Ensayo_blancablanda_20_1.txt'], [arch,lama, '\Ensayo_blancabland
a_20_2.txt'];
    [frf,exf]=size(archfuerza);
end
    if strcmp(laser, 'sin')

archfuerza={ [arch,lama, '\Ensayo_blancablanda_10_1_sinlaser.txt'], [arch,lama
, '\Ensayo_blancablanda_10_2_sinlaser.txt']; ...

```

```
[arch,lama, '\Ensayo_blancablanda_20_1_sinlaser.txt'], [arch,lama, '\Ensayo_blancablanda_20_2_sinlaser.txt']};
    [frf,exf]=size(archfuerza);
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i=1:frf
    for j=1:exf
        disp(['Analizando ', num2str(i), '_', num2str(j)])
        fid = fopen(archfuerza{i,j});
        fgetl(fid);
        M = fscanf(fid, '%f=%f,%f,%f,%f,%f,%f\n');
        data = [];
        for ii=1:7:length(M)
            data=[data;M(ii:ii+6)'];
        end
        fclose(fid);
        save([archfuerza{i,j}(1:end-4), '.mat'], 'data')
    end
end
toc
```

7.8 balance_energia.m

```

clear all
close all

tic

lama='Transparente';
laser='con';
distlaser='72 mm';

[ensayo, fv, ex, fr, arch, archfuerza, senal, frf, exf, limit, nfiltd, nfiltdfs] =
Cargar_datos(lama, laser, distlaser);

%% DATOS ENSAYOS

%%% Características de los ensayos y generalidades
Ff = 200; %Frecuencia de adquisición de la celula (Hz)
Fs = 1000; %Frecuencia de muestreo de las señales
limitS=limit*1000+1;
contgraf=1;
ini=limit(3);

%%% Propiedades del fluido con el que trabajamos
rho=1.2051; % Densidad del fluido kg/m^3
mu=1.849e-5; %Viscosidad del fluido

%%% Propiedades geométricas del cuerpo
H=0.038; %Longitud característica del cuerpo
A=0.4*H+0.2*3e-3; %Área frontal del cuerpo

%%% PROPIEDADES DE LA VIBRACIÓN DE LA LAMA TRANSPARENTE
fn=1.31474638180103;
c=0.0449212507974140;
k=0.960835797242096;
m=14.08e-3;

%%% PROPIEDADES PIEZOELÉCTRICO
Cpi=1.38e-9; %F
O=3.69e-6; %C/m

distancia=cell(fr, ex);
distancia0=cell(fr, ex);
RMS=zeros(fr, ex);
Ad=cell(fr, ex);
Amd=cell(fr, ex);
Adist=cell(fr, ex);
Pe=zeros(fr, ex);
Pv=zeros(fr, ex);
rendtot=zeros(fr, ex);
Uf=cell(frf, exf);
Re=cell(frf, exf);
distancia1=cell(frf, exf);
distancia2=cell(frf, exf);
F=cell(frf, exf);
Pm=zeros(fr, ex);
rendem=zeros(fr, ex);
Op=zeros(fr, ex);
for i=1:fr
    for j=1:ex
        Uf{i, j}=0.4696*fv(i)-0.6287;
        Re{i, j}=rho*Uf{i, j}*H/mu;
    end
end

```

```

Pv(i,j)=0.5*rho*H*Uf{i,j}^3;
time=ensayo{i,j}.Time(limitS(3):limitS(4));
tiempo=linspace(limit(3),((length(time)-1)/Fs+ini),length(time));
Pe(i,j)=rms(ensayo{i,j}.ai1(limitS(3):limitS(4)))^2/100e3;
RMS(i,j)=rms(ensayo{i,j}.ai1(limitS(3):limitS(4)));
rendtot(i,j)=Pe(i,j)/Pv(i,j)*100;
    end
end

if strcmp(lama,'Transparente')
    for i=1:fr
        for j=1:ex
            tension=ensayo{i,j}.ai0;
            distancia0{i,j}=(200-20)/(10-1)*(tension-1)+20; %(10 V, 200 mm)
            ( 1 V, 20 mm)
            distancia0{i,j}=distancia0{i,j}-
            mean(distancia0{i,j}(limitS(1):limitS(2))); %ponemos la distancia a cero
            respecto de la posición inicial de la lama

[dist,ad,amd,otd]=splines(ini,distancia0{i,j}(limitS(3):limitS(4)),Fs,nfilt
d{i,j});
            distancia{i,j}=30/173*dist*1e-3;
            Ad{i,j}=ad;
            Amd{i,j}=amd;
            distancia1{i,j} = diff1CentO2(distancia{i,j}, 1/Fs);
            distancia2{i,j}= diff2CentO2(distancia{i,j}, 1/Fs);
            F{i,j}=m*distancia2{i,j}+c*distancia1{i,j}+k*distancia{i,j}'-
            O*ensayo{i,j}.ai1(limitS(3):limitS(4));
            Pm(i,j)=1/(limit(4)-
            limit(3))*trapz(tiempo,(F{i,j}.*distancia1{i,j}));%
            rendem(i,j)=Pe(i,j)/Pm(i,j)*100;

pend=polyfit(ensayo{i,j}.ai1(limitS(3):limitS(4)),distancia{i,j}',1);
            Op(i,j)=-Cpi/pend(1);
        end
    end
end

Pe=Pe';
Pv=Pv';
rendtot=rendtot';
Pm=Pm';
rendem=rendem';

M10=[mean(Pe(:,1)),mean(Pm(:,1)),mean(rendem(:,1))];
M20=[mean(Pe(:,2)),mean(Pm(:,2)),mean(rendem(:,2))];
toc

```