

# Proyecto Fin de Carrera

## Ingeniería Mecánica y Fabricación

Análisis de las vibraciones de un cuadro de bicicleta.

Autor: Miguel Angel Pérez Ortiz

Tutor: Jose Luis Escalona Franco

Dep. Ingeniería mecánica y fabricación  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla. 2016





Proyecto Fin de Carrera  
Ingeniería mecánica y fabricación

# **Análisis de las vibraciones de un cuadro de bicicleta.**

Autor:

Miguel Angel Pérez Ortiz

Tutor:

Jose Luis Escalona Franco

Profesor titular

Dep. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Carrera: Análisis de las vibraciones de un cuadro de bicicleta.

Autor: Miguel Angel Pérez Ortiz

Tutor: Jose Luis Escalona Franco

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*





# Agradecimientos

---

Agradecer a mis padres, amigos y pareja por estar siempre apoyandome en mis nuevos proyectos .

Agradecer también a Jose Luis Escalona y Juan Manuel por su apoyo en el proyecto ya que sin ellos no hubiera sido posible .

*Miguel Angel Pérez Ortiz*

*Sevilla, 2016*



# Resumen

---

El estudio de las vibraciones tiene como propósito principal cuantificar las vibraciones para valorar la influencia de estas en la salud y bienestar de las personas por lo que se ha decidido cuantificar las vibraciones que se producen en una bicicleta ya que hay muchos ciclistas que se llevan un promedio de 4 horas al día montando en bicicleta.

Para este proyecto se usará una bancada que simulará las vibraciones del asfalto y se procederá a evaluar las vibraciones que es capaz de atenuar el conjunto cuadro-ciclista usando tijas (componente de unión cuadro-sillín) de diferente material.

Así podremos saber que material es el adecuado para este componente sabiendo las vibraciones que es capaz de atenuar cada uno.

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Notación</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Cuadro de bicicleta fabricado con fibra de basalto.</i>	1
1.2 <i>Vibraciones expuestas a la bicicleta</i>	2
1.3 <i>Material de la estructura y componentes</i>	3
1.3.1 Tija de aluminio	4
1.3.2 Tija de fibra de Carbono	5
1.3.3 Tija de fibra de basalto	6
1.4 <i>Geometría de la estructura</i>	7
1.5 <i>Perfiles de la estructura.</i>	8
1.6 <i>Preocupación por las vibraciones en el ciclismo</i>	8
1.6.1 <i>Úso de elastómeros</i>	9
1.6.2 <i>Úso de geometrías en los perfiles para la búsqueda de flexion</i>	11
<b>2 Fundamentación teórica.</b>	<b>13</b>
2.1 <i>Análisis Dinámico</i>	13
2.1.1 Sistema mecánico	13
2.1.2 Tipos de amortiguamiento	15
2.1.3 <i>Vibarciones mecánicas</i>	17
2.2 <i>Trasmisibilidad</i>	19
<b>3 Introducción a la Insturmentación</b>	<b>23</b>
3.1 <i>Definición de Instrumentación</i>	23
3.2 <i>Componentes de un sistema de medida</i>	24
3.2.1 Transductores	25
3.2.2 Acondicionadores de señales	27
3.2.3 <i>Presentación y toma de datos</i>	28
3.3 <i>Características estáticas de un transductor y de un sistema de medida.</i>	29
3.3.1 Rango	30
3.3.2 Sensibilidad estática	31
3.3.3 Linealidad	32

3.3.4	Resolución y umbral	32
3.3.5	Repetibilidad, histéresis y estabilidad	33
3.4	<i>Instrumentación del ensayo en cuestión</i>	34
3.4.1	Sistema físico	34
3.4.2	Transductor	34
3.4.3	Acondicionador de la señal	35
3.4.4	Toma de datos	36
<b>4</b>	<b>Descripción del ensayo</b>	<b>37</b>
4.1	<i>Descripción del ensayo</i>	37
4.2	<i>Tijas a comparar en el ensayo</i>	40
4.3	<i>Procedimiento a seguir en el ensayo</i>	41
4.4	<i>Movimiento de sólido rígido</i>	42
<b>5</b>	<b>Resultados de los ensayos</b>	<b>45</b>
5.1	<i>Consideraciones</i>	45
5.2	<i>Datos y gráficas obtenidas en el ensayo</i>	46
5.3	<i>Observaciones</i>	60
5.3.1	Señal de pedaleo.	60
5.3.2	Gráfico del tiempo frente a la amplitud.	61
5.3.3	Tablas comparativas.	61
<b>6</b>	<b>Conclusión</b>	<b>65</b>
6.1	<i>Frecuencias en el ensayo</i>	65
6.1.1	Frecuencia de pedaleo	65
6.1.2	Frecuencia de resonancia	66
6.2	<i>Comparación del comportamiento de las tijas</i>	66
6.3	<i>Estudios futuros.</i>	66
	<b>Referencias</b>	<b>69</b>
	<b>Glosario</b>	<b>71</b>
	<b>Anexo</b>	<b>73</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3.1 Tipos de transductores eléctricos.	26
Tabla 4.1 Características de la tija de aluminio	40
Tabla 4.2 Características de la tija de fibra de carbono	40
Tabla 4.3 Características de la tija de fibra de basalto	41
Tabla 4.4 Velocidades de ensayo	41
Tabla 5.1 Magnitudes del ensayo tija aluminio a 4.167 m/s	46
Tabla 5.2 Magnitudes del ensayo tija aluminio a 5.55 m/s	47
Tabla 5.3 Magnitudes del ensayo tija aluminio a 6.94 m/s	48
Tabla 5.4 Magnitudes del ensayo tija aluminio a 8.33 m/s	49
Tabla 5.5 Magnitudes del ensayo tija fibra de carbono a 4.167 m/s	51
Tabla 5.6 Magnitudes del ensayo tija fibra de carbono a 5.55 m/s	52
Tabla 5.7 Magnitudes del ensayo tija fibra de carbono a 6.94 m/s	53
Tabla 5.8 Magnitudes del ensayo tija fibra de carbono a 8.33 m/s	54
Tabla 5.9 Magnitudes del ensayo tija fibra de basalto a 4.167 m/s	56
Tabla 5.10 Magnitudes del ensayo tija fibra de basalto a 5.55 m/s	57
Tabla 5.11 Magnitudes del ensayo tija fibra de basalto a 6.94 m/s	58
Tabla 5.12 Magnitudes del ensayo tija fibra de basalto a 8.33 m/s	59
Tabla 5.13 Transmisibilidad velocidad-material a 23.5 Hz .	61
Tabla 5.14 Transmisibilidad velocidad-material a 30 Hz .	62
Tabla 5.15 Transmisibilidad velocidad-material a 36.5 Hz .	62
Tabla 5.16 Transmisibilidad velocidad-material a 43 Hz .	63





# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1 Bicicleta Statera de Racormance	2
Figura 1.2 Curva Tiempo-Temperatura del Tratamiento T6	5
Figura 1.3 Geometría de la bicicleta	7
Figura 1.4 Tecnología ISO_SPEED	10
Figura 1.5 Tecnología DDS	10
Figura 1.6 Tecnología MTT	11
Figura 1.7 Tecnología SAVE	12
Figura 1.8 Tecnología ERGON	12
Figura 2.1 Simplificación del sistema propio.	14
Figura 2.2 Amortiguador de un vehículo	16
Figura 2.3 Esquema amortiguamiento fluido	16
Figura 2.4 Esquema rozamiento seco	16
Figura 2.5 Vibraciones periódicas	17
Figura 2.6 Vibraciones Aperiódicas	17
Figura 2.7 Vibraciones permanentes	18
Figura 2.8 Vibraciones transitorias.	19
Figura 2.9 Sistema mecánicocon variación del terreno	19
Figura 2.10 Fuerzas que intervienen en la masa del sistema	20
Figura 3.1 Esquema de un sistema de medida.	24
Figura 3.2 Esquema de un acondicionador	28
Figura 3.3 Curva de respuesta estática	29
Figura 3.4 Sensibilidad del transductor	31
Figura 3.5 Linealidad de un transductor	32
Figura 3.6 Histéresis de un transductor.	34
Figura 3.7 Transductor Kionix KXR94	35
Figura 3.8 Mbed	35
Figura 4.1 Bancada	38
Figura 4.2 Detalle del rodillo con su protuberancia	38

Figura 4.3 Medidor de velocidad del rodillo.	39
Figura 4.4 Esquema del montaje del ensayo.	42
Figura 5.1 Montaje en Tija de aluminio.	46
Figura 5.2 Gráficas del ensayo tija aluminio a 4.167 m/s	47
Figura 5.3 Gráficas del ensayo tija aluminio a 5.55 m/s	48
Figura 5.4 Gráficas del ensayo tija aluminio a 6.94 m/s	49
Figura 5.5 Gráficas del ensayo tija aluminio a 8.33 m/s	50
Figura 5.6 Montaje en Tija de fibra de carbono	51
Figura 5.7 Gráficas del ensayo tija fibra de carbono a 4.167 m/s	52
Figura 5.8 Gráficas del ensayo tija fibra de carbono a 5.55 m/s	53
Figura 5.9 Gráficas del ensayo tija fibra de carbono a 6.94 m/s	54
Figura 5.10 Gráficas del ensayo tija fibra de carbono a 8.33 m/s	55
Figura 5.11 Montaje en Tija de fibra de basalto	56
Figura 5.12 Gráficas del ensayo tija fibra de basalto a 4.167 m/s	57
Figura 5.13 Gráficas del ensayo tija fibra de basalto a 5.55 m/s	58
Figura 5.14 Gráficas del ensayo tija fibra de basalto a 6.94 m/s	59
Figura 5.15 Gráficas del ensayo tija fibra de basalto a 8.33 m/s	60
Figura 5.16 Gráfico comparativo a 24 Hz	61
Figura 5.17 Gráfico comparativo a 24 Hz	62
Figura 5.18 Gráfico comparativo a 36.5 Hz	63
Figura 5.19 Gráfico comparativo a 43 Hz	64

# Notación

---

PSD	Densidad espectral de potencia
-	Función resta
+	Función suma
*	Producto
/	División
=	igual
$\leq$	Menor o igual
$\sqrt{\quad}$	Función raíz cuadrada
$\dot{x}$	Primer derivada de la variable x
$\ddot{x}$	Segunda derivada de la variable x



# 1 INTRODUCCIÓN

---

**E**l estudio de las vibraciones mecánicas es una rama de la mecánica, y por lo tanto de la ciencia que estudia los movimientos oscilatorios de los cuerpos, sistemas y de las fuerzas asociadas. El interés de las vibraciones mecánicas llega al ciclismo de la mano del confort, con el interés de hacer más llevaderas las largas rutas.

El interés principal para el confort deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de las vibraciones detectadas en los puntos de contacto ciclista-bicicleta. Estas amplitudes predominantes dependerán del terreno, el cual es la fuente de excitación del conjunto.

Las consecuencias de las vibraciones mecánicas son el aumento de los esfuerzos y las tensiones musculares, pérdidas de energía, desgaste de la estructura muscular, y las más temidas, daños por fatiga. Por estas causas los ciclistas de gran fondo o triatletas buscan la comodidad en la competición.

## 1.1 Cuadro de bicicleta fabricado con fibra de basalto.

En el 2015, la marca de bicicletas Racormance, tras un largo periodo de investigación, ha implementado la fibra de basalto en la fabricación de cuadros de bicicleta.

La línea de investigación que ha seguido esta joven empresa ha sido la de reducir las vibraciones e impactos cuando se practica ciclismo con el objetivo de reducir la fatiga muscular que las vibraciones producen.

Esta bicicleta ha sido diseñada para que sea la más cómoda del mercado, esto se consigue comparando los ensayos a los que se han sometido este cuadro de bicicleta con la base de datos de todas las bicicletas que existe en la web [www.velonews.competitor.com](http://www.velonews.competitor.com).

Para su análisis ha sido necesaria la norma UNE-EN\_14781 de 2006.

En la figura 1.1 se muestra el modelo Statera de Racormance fabricada con fibra de carbono y fibra de basalto.



Figura 1.1 Bicicleta Statera de Racormance

## 1.2 Vibraciones expuestas a la bicicleta

Las vibraciones en cualquier sistema mecánico generalmente no son deseadas. Si nos referimos a una bicicleta, estas pueden resultar problemáticas. Una bicicleta con exceso de vibración la convierte en incómoda y peligrosa. A eso hay que añadir la inseguridad que unas vibraciones excesivas pueden comunicarse al ciclista. No son deseables, y por tanto se busca reducirlas. Provocan fallos mecánicos por desgaste de las piezas. Además, hay que tener en cuenta que puede llevar a una pérdida de control sobre la bicicleta, lo que puede causar un accidente.

La evolución en el comportamiento de las bicicletas ha perseguido el objetivo de reducir estas vibraciones. Poco a poco se han ido introduciendo nuevos materiales en la fabricación de los cuadros de las bicicletas y de ciertos componentes de las mismas, pasando del acero, al aluminio, al material compuesto por resina epoxi y fibra de carbono hasta el material compuesto por resina epoxi y fibra de basalto en la actualidad.

En este Proyecto no se persigue analizar la respuesta ante diferentes situaciones de posición, velocidad, aceleración etc, pero sí que es objetivo de este Proyecto el estudio del comportamiento de la bicicleta ante la excitación producida por el terreno.

Los factores más significativos que intervienen en la vibración de la estructura son:

- Material con el que está construida la estructura.
- Geometría de la estructura.
- Perfiles que conforman la estructura.
- Peso de la estructura, aunque cabe destacar que en realidad es el peso del conjunto bicicleta-ciclista.

### 1.3 Material de la estructura y componentes

La característica más importante del cuadro de una bicicleta en cuanto a análisis de vibraciones se refiere es el material con el que está fabricado el mismo además de los componentes sin quitar importancia a la geometría de la estructura principal.

Dentro del análisis estructural es importante modelizar el comportamiento de los materiales usados para su construcción mediante una ecuación adecuada. Los modelos de materiales más frecuentes son:

- Modelo elástico lineal e isótropo, el más usado, ya que el teorema de Rivlin-Ericksen [1] permite establecer que para deformaciones suficientemente pequeñas todo sólido elástico es asintóticamente lineal e isótropo.
- Modelo elástico lineal ortotrópico, constituye una modificación de modelo isótropo para materiales cuya resistencia y comportamiento depende de: la dirección, laminados, elementos de madera, etc., requieren modelos ortótropos para ser adecuadamente modelizados.
- Modelos de plasticidad y viscoplasticidad. Los metales a partir de ciertos valores de tensión experimentan deformaciones plásticas irreversibles, así como otras no linealidades. El cálculo plástico a costa de complicar las leyes materiales dan una predicción más exacta de las cargas de colapso o fallo de las estructuras, así como un ahorro en material al poder tener en cuenta el rango de trabajo de los materiales en el que estos están experimentando transformaciones irreversibles pero sin alcanzar las cargas de fallo o colapso. Este ahorro de material se obtiene al tener en cuenta este rango irreversible y así no sobredimensionar la estructura con el fin de que no llegue al final del tramo elástico lineal.
- Modelos de daño.

En nuestro estudio vamos a comparar diferentes tijas fabricadas con diferente material, la tija de una bicicleta es el componente que sirve de unión entre el cuadro de la bicicleta y el sillín.

Analizaremos una tija de aluminio, una del compuesto epoxi-fibra de carbono y una del compuesto epoxi-fibra de basalto.

Se prescinde del estudio de diferentes cuadros para tener una comparación más exacta ya que la geometría también influye y podría falsear los datos a comparar.

### 1.3.1 Tija de aluminio

El aluminio puro no se utiliza en la mayoría de las aplicaciones industriales, pues las propiedades mecánicas (dureza y resistencia fundamentalmente) que tiene no son demasiado interesantes. En general, tiene una resistencia mecánica bastante limitada. Lo que se utiliza siempre, son aleaciones de aluminio, por ejemplo al cinc, magnesio, cobre, silicio, etc. Estos elementos se añaden en cantidades normalmente muy pequeñas y dentro de unos márgenes muy estrictos. Sin embargo, son suficientes para que las propiedades (de resistencia, tenacidad, ductilidad, resistencia a la fatiga y a la corrosión) mejoren. Las aleaciones de aluminio se clasifican según el aleante mayoritario, es decir, aquel element que está en mayor cantidad. Según éste, se agrupan las aleaciones en 8 grupos o series, identificadas por cuatro cifras, desde la 1xxx hasta la 8xxx.

Los 1xxx son aluminios de alta pureza, con un mínimo de un 99%. Se usan en aplicaciones en las que las características mecánicas no sean las más importantes, y si otras como resistencia a la corrosión o conductividad eléctrica.

Los 2xxx van aleados con cobre, lo que mejora mucho su resistencia mecánica. En bicicletas no se usan mucho, porque resulta difícil hacer formas complejas.

Los 3xxx están aleados con manganeso entre el 1% al 5% es el principal elemento de aleación de la serie 3xxx. Estas aleaciones son generalmente no tratables térmicamente, pero tienen un 20% más de resistencia que las aleaciones de la serie 1xxx.

Los 4xxx están aleados con silicio, que se puede añadir en cantidades suficientes (hasta 12%). Las aleaciones de aluminio y silicio no son tratables térmicamente, pero cuando se utiliza en soldadura de aleaciones, que si tienen algún tipo de tratamiento térmico, absorben algunos de estos componentes y pueden cambiar sus propiedades mecánicas. Por lo regular, las aleaciones que contienen cantidades apreciables de silicio se vuelven de un color gris oscuro a color carbón, cuando se aplican acabados de óxidos anódicos, razón por la cual son altamente demandados por la industria, para aplicaciones arquitectónicas.

Los 5xxx están aleados con el magnesio, pero raras veces contienen más del 5%, debido a que las propiedades mecánicas de éstas decrecen cuando se exponen por tiempos prolongados a influencia de la temperatura. El magnesio es considerablemente más eficaz que el manganeso como endurecedor y puede ser añadido en cantidades mayores. Las aleaciones de esta serie poseen buenas características de soldadura y buena resistencia a la corrosión en ambientes marinos.

Los 6xxx son con magnesio y silicio. Los más comunes son el 6061 (nuestro caso) y 6063. Básicamente se conforman fácilmente y tienen buenas propiedades mecánicas.

Los 7xxx están aleados mayoritariamente con cinc. En esta serie, el más típico en bicicletas es el 7005. Los aluminios de esta serie tiene magníficas propiedades



mecánicas, aunque el conformado no es, en general, tan bueno como los 6xxx.

También se suelen tratar térmicamente para aumentar sus propiedades mecánicas, el tratamiento más utilizado es el T6 o también llamado tratamiento térmico de solución, temple y sobre-maduración estabilizado. Este requiere de los mismos procesos de disolución y temple del T3 y T4, la diferencia consiste en que en ese tipo de tratamiento se le debe aplicar a la pieza un sobre-envejecimiento. Dicho proceso se realiza volviendo a envejecer el material a temperatura de 175 °C. Aplicaciones: piezas aeronáuticas que no requieren elevada resistencia pero si es crítica la fragilidad, ejemplo 7075-T7.

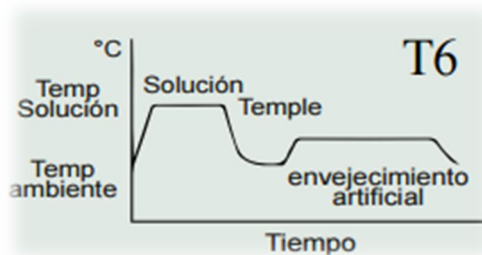


Figura 1.2 Curva Tiempo-Temperatura del Tratamiento T6

En la fabricación de bicicletas y componentes de aluminio de la serie 7xxx estos se suelen pintar o anodizar con el fin de aumentar su ya de por sí buena resistencia a la corrosión.

Las propiedades mecánicas del aluminio que se encuentra en estudio son las siguientes:

- Modulo de Young: 72 *GPa*
- Densidad: 2810 *kg/m<sup>3</sup>*
- Modulo de Poisson: 0.33

### 1.3.2 Tija de fibra de Carbono

El compuesto epoxi-fibra de carbono es el mejor material hasta ahora en cuanto a relación peso-resistencia se refiere. Al ser un material compuesto las propiedades mecánicas de este depende tanto del hilo de carbono utilizado como la resina, además del curado de la misma y de la dirección de las fibras en el cuadro.

En la actualidad la fibra de carbono se usa en muchas aplicaciones e industrias diferentes como puede ser la aeronáutica o la automovilística. Es un material muy estudiado por los profesionales del sector ya que permite optimizar cualquier producto que necesite de unas propiedades mecánicas excelentes.

Vamos a citar las características de la fibra de carbono en sí y no nos vamos a estender en el amplio mundo de los materiales compuestos.

La fibra de carbono es un material formado por fibras de 5-10 micras de diámetro, compuesto principalmente de átomos de carbono. Los átomos de carbono están unidos entre sí en cristales que son más o menos alineados en paralelo al eje longitudinal de la fibra. La alineación de cristal da a la fibra de alta resistencia en función del volumen (lo hace fuerte para su tamaño). Varios miles de fibras de carbono están trenzadas para formar un hilo, que puede ser utilizado por sí mismo o tejido en una tela.

Las propiedades de las fibras de carbono, tales como una alta flexibilidad, alta resistencia, bajo peso, tolerancia a altas temperaturas y baja expansión térmica. Sin embargo, son relativamente caros en comparación con las fibras similares, tales como fibras de vidrio o fibras de plástico, lo que limita en gran medida su uso.

Las fibras de carbono generalmente se combinan con otros materiales para formar un compuesto. Cuando se combina con una resina plástica es moldeada para formar un plástico reforzado con fibra de carbono (a menudo denominado también como fibrocarbono) el cual tiene una muy alta relación resistencia-peso, extremadamente rígido, aunque el material es un tanto frágil. Sin embargo, las fibras de carbono también se combinan con otros materiales, como por ejemplo con el grafito para formar compuestos carbono-carbono, que tienen una tolerancia térmica muy alta.

Las propiedades de la fibra de carbono son las siguientes:

- Módulo de Young: 230  $GPa$
- Densidad: 1.8  $Kg/m^3$

### 1.3.3 Tija de fibra de basalto

El basalto en su estado natural es una roca de origen volcánica, abundante en la naturaleza.

Aunque este material está presente en nuestro planeta desde nuestros orígenes no es hasta el año 2.005 [2] cuando este material se presenta como un material compuesto resina-fibra.

Tiene excelentes propiedades mecánicas como la resistencia a la fatiga, peso similar a la fibra de carbono y una capacidad de absorción de vibraciones e impactos que ni el aluminio ni la fibra de carbono tiene.

Además de estas propiedades éste material posee una elevada resistencia a la corrosión marina y baja conductividad eléctrica y térmica.

Los comienzos del uso de este tipo de fibras se redujeron a la construcción, se uso para proteger las vigas y pilares ante posibles incendios gracias a su propiedad de aislante térmico.

Las propiedades de la fibra de basalto son las siguientes:

- Módulo de Young:  $89 \text{ GPa}$
- Densidad:  $2.75 \text{ Kg/m}^3$

#### 1.4 Geometría de la estructura

En la dinámica de la bicicleta intervienen multitud de factores geométricos que son interesantes de mencionar, estos son el ángulo de dirección ( $ha$ ), ángulo del tubo del sillín ( $sa$ ), distancia entre ejes ( $wb$ ), largo de vainas ( $cs$ ), rake de la horquilla, reach del cuadro y stack del cuadro. En la figura 1.1 podemos ver de manera sobre un plano de la bicicleta cuales son estas medidas.

Por ejemplo una distancia entre ejes grande hace que la bicicleta sea más estable pero menos maniobrable, un largo de vainas corto hace que se transmita mejor la potencia al perder menor energía debido a la flexión de estas.

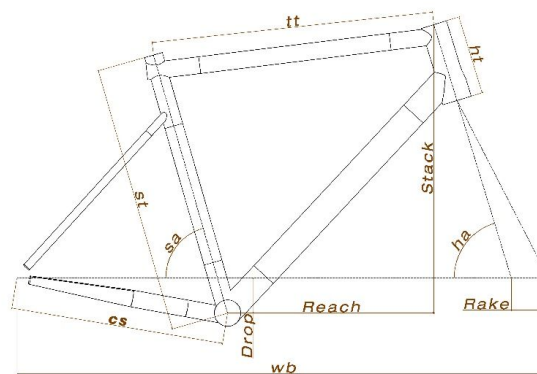


Figura 1.3 Geometría de la bicicleta

En la figura 1.2 podemos ver que el cuadro de una bicicleta es una estructura triangulada que se comportará de una manera u otra dependiendo tanto de los ángulos como de las longitudes y formas de los perfiles que forman en su conjunto esta estructura.

La subestructura más importante a la hora de evaluar el confort es la formada por las vainas o seat stays ( $ss$ ), tubo del sillín o seat tube ( $st$ ) y tubo horizontal o top tube ( $tt$ ). Sobre esta zona trabajan todos los fabricantes para conseguir obtener el mayor confort.

Aunque sea menos importante que el material del que está fabricado el cuadro, es un factor a tener muy en cuenta ya que dependiendo de las triangulaciones se podrá comportar de una manera u otra.

## 1.5 Perfiles de la estructura.

Los perfiles de una estructura también juegan un papel muy importante en el comportamiento de la estructura gracias a su momento de inercia respecto a sus dos ejes transversales.

Un perfil está sometido a movimientos debido a las fuerzas  $F$  y a momentos torsores  $M$ .

La fuerza elástica que se opone al movimiento es:

$$F_E = -\frac{3EI}{l^3} (1)$$

Donde  $I$  es la inercia del perfil en la dirección de la fuerza  $F$ ,  $E$  su módulo de elasticidad,  $l$  la longitud del perfil y  $x$  el desplazamiento del perfil en el sentido de la fuerza aplicada.

El momento torsor o momento elástico recuperador es:

$$M_{Te} = -\frac{GI_p}{l} \theta (2)$$

Donde  $G$  es el módulo de rigidez a cortante,  $I_p$  el momento polar de inercia de la sección de la barra,  $l$  la longitud de la barra y  $\theta$  el ángulo de giro en el sentido del momento sometido.

El momento de inercia refleja la distribución de masa de un cuerpo o de un sistema de partículas en rotación, respecto a un eje de giro. El momento de inercia sólo depende de la geometría del cuerpo y de la posición del eje de giro; pero no depende de las fuerzas que intervienen en el movimiento.

## 1.6 Preocupación por las vibraciones en el ciclismo

Durante años las marcas siempre han intentado diseñar un cuadro rígido y cómodo, sin llegar a una solución en la que se refleje un compendio entre estas dos características se han decidido a diseñar diferentes tipos de bicicletas, clasificándolas en rígidas o cómodas.

Esta preocupación viene por que la mayoría de cicloturistas quieren tener una bicicleta tan rígida en el plano horizontal como la de un profesional pero a su vez cómoda en el plano vertical para que la práctica de este deporte no sea un castigo.

Durante este último año esta búsqueda de la solución mencionada anteriormente se ha acentuado muchísimo por dos motivos, querer que una bicicleta de montaña sin suspensión se comporte como si de una con suspensión se tratara y por la inminente llegada de la modalidad Gravel, que no es más que una bicicleta aparentemente de carretera pero que es posible pedalear con ella tanto en carretera como por senderos.

A continuación se mencionarán las soluciones a las que han llegado, las marcas más conocidas, para crear una bicicleta cómoda.

Desde hace tiempo esta búsqueda de solución ha propuesto dos vertientes, una orientada a la filtración de vibraciones mediante uso de elastómeros y componentes externos y otra orientada a la absorción de impactos, sin recurrir a un amortiguador, mediante geometrías estudiadas en los perfiles que conforman la estructura principal.

### 1.6.1 Uso de elastómeros

Los elastómeros forman una gran familia de polímeros amorfos con una temperatura de transición vítrea baja, tienen una capacidad característica de sufrir grandes deformaciones elásticas sin ruptura, son blandos y tienen un bajo modulo elástico.

El termino elastómero se deriva de las palabras elastic y mero provenientes del latín que significan elástico y sin diluir respectivamente. Se estiran o comprimen pero después regresan a su forma original una vez retirada la carga. El mejor ejemplo de este proceso es la vulcanización a temperatura elevada del hule con el azufre, descubierta por C. Goodyear en 1839 [3], y llamada así en honor a vulcano, el dios romano del fuego.

Se define un elastómero como capaz de recuperarse substancialmente en forma y tamaño una vez eliminada la carga. Un hule se define como capaz de recuperarse con rapidez de grandes deformaciones.

Una propiedad de los elastómeros es su perdida de energía por histéresis al estirarse o comprimirse. Esta propiedad es deseable para absorber energía vibracional (amortiguamiento) y para reducir el nivel del ruido.

La dureza de los elastómeros que se mide utilizando un durométo, se incrementa con el entrelazamiento de las cadenas moleculares. Al igual que en el caso de los plásticos, se pueden agregar una diversidad de aditivos en los elastómeros a fin de impartir propiedades especificas. Los elastómeros tienen una amplia gama de aplicaciones, por ejemplo, superficies antifricción y antiderrapantes, protección contra la corrosión y la abrasión el aislamiento eléctrico y el aislamiento contra choque y vibración, los ejemplos incluyen las llantas, mangueras, burletes de interpie, calzado con suela de hule e industrial, recubrimientos, juntas, sellos, rodillos de imprenta y recubrimiento para pisos.

Las características principales de los elastómeros son las siguientes:

- No se pueden derretir, antes de derretirse pasan a un estado gaseoso como en todos los polímeros, este fenómeno es la llamada transición vítrea
- Se hinchan ante la presencia de ciertos solventes
- Generalmente insolubles
- Son flexibles y elásticos
- Menor resistencia al fenómeno de fluencia que los termoplásticos

El uso de elastómeros tiene sus pros y contras. Su único punto a favor es la absorción de vibraciones que se efectúa a través del elastómero y en sus contras destacamos su aumento de peso al poseer componentes externos al cuadro y posibilidad de fallo ya que no es un elemento simple.

Las marcas que han apostado por esta vertiente son las siguientes:

- Trek con su tecnología ISO-SPEED.

Con esta tecnología Trek quiere eliminar las vibraciones haciendo uso de un elastómero que hace de unión entre el tubo del sillín y la estructura principal.



Figura 1.4 Tecnología ISO\_SPEED

- Pinarello con la tecnología DDS.

Esta marca ha optado por unir el triángulo trasero al triángulo principal con un elastómero con apariencia de un amortiguador convencional.



Figura 1.5 Tecnología DDS

- BMC con su patente MTT.

Como podemos ver en la figura 1.5 el cuadro de la bicicleta posee un elastómero (banda en negra) que une los triangulos traseros al cuadro.



Figura 1.6 Tecnología MTT

### 1.6.2 Úso de geometrías en los perfiles para la búsqueda de flexion

Existen fabricantes que han optado por la búsqueda de esta comodidad usando geometrías ovales que permitan la flexión vertical e impidan la horizontal para obtener confort y rigidez de pedaleo.

La explicación a este apartado ya ha sido descrito anteriormente en el apartado 1.4 "Perfiles de la estructura".

Esta solución al contario de la otra permite mayor amortiguación ante impactos pero peor respuesta ante altas frecuencias además de pesar menos que la opción que nos ocupaba en el apartado anterior.

Las marcas que han apostado por esta vertiente son las siguientes:

- Cannondale con su sistema SAVE.

Sus vainas y tirantes (triángulos traseros) están formados por perfiles ovalados para aportar según Cannondale 10 mm de flexión vertical.



Figura 1.7 Tecnología SAVE

- Ergon con su tija.

Al igual que Cannondale, Ergon ha optado por dos perfiles ovalados para ofrecer esa flexión que aporta comodidad.



Figura 1.8 Tecnología ERGON



## 2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

---

**E**s preciso dar un visión teórica sobre cómo se analizan los sistemas dinámicos, conocer cuáles son las ecuaciones que rigen sus comportamientos en función del tipo de sistema que queramos resolver. Por ello nos centraremos en este apartado en el análisis dinámico y la respuesta en frecuencia. En nuestro caso vamos a reducir el sistema en cuestión a solo un grado de libertad, exactamente el eje z en el punto de contacto bicicleta-ciclista, el punto este es el que hay que estudiar por ser un estudio de comodidad con usuario sentado.

### 2.1. Análisis Dinámico

El análisis dinámico en cuestión puede estructurarse en dos etapas. La primera comienza con una descripción de las características físicas de la estructura, generalmente en términos de propiedades de masa, rigidez y amortiguamiento.

En la segunda etapa se realiza un análisis del comportamiento de la respuesta de la estructura estudiada bajo distintas condiciones de carga. Es el que se denomina modelo de respuesta, y es el que permite generalizar los resultados obtenidos para poder tener una solución para las distintas sollicitaciones que pudieran aparecer.

Describiremos el análisis dinámico con los sistemas de un grado de libertad, por ser los más ilustrativos, pasando después a sistemas con N grados de libertad, que tienen mayor interés en este proyecto al corresponderse con la estructura en estudio.

#### 2.1.1 Sistema mecánico

Nuestro sistema mecánico está compuesto por múltiples componentes como las ruedas, cuadro (estructura principal), manillar, potencia (unión entre manillar y cuadro) e incluso la presión de los neumáticos o la simple cinta de manillar intervienen en este complejo sistema.

Para mayor facilidad del estudio se verá reducido a cuadro más ciclista para la comparación única y exclusivamente de las tijas que son los componentes a estudiar en el cual se comparan las tijas de diferentes marcas y materiales.

Nuestro sistema se podrá modelar de la siguiente manera:

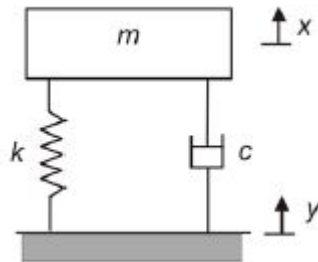


Figura 2.1 Simplificación del sistema propio.

Cuyos **factores que intervienen en el sistema** son los siguientes:

- **Masa m** : La masa es la causante de las fuerzas de inercia. En nuestro caso este factor estará compuesto por la suma de la masa del ciclista y de la bicicleta. Estas fuerzas se oponen al cambio de la velocidad de los sistemas. Así, en una partícula, la fuerza de inercia se define mediante la expresión:

$$F_I = -m\ddot{r} \quad (3)$$

Donde  $m$  es la masa del sistema, y  $\ddot{r}$  es la aceleración de la misma respecto a un sistema inercial de coordenadas.

- **Coefficiente de rigidez k** : Rigidez es la característica por la que un sólido se opone a la deformación, con una fuerza o un momento. En el caso de sistemas elásticos, la energía absorbida en la deformación se devuelve posteriormente cuando deja de actuar la acción perturbadora. La fuerza o momento de reacción que opone el sistema es función de la deformación producida. La fuerza,  $F$ , necesaria para producirle un incremento de longitud,  $\Delta$ , varía linealmente con el incremento producido. Por tanto, el valor de la fuerza necesaria para deformar el resorte puede escribirse mediante la ecuación:

$$F = k\delta \quad (4)$$

Donde la constante de proporcionalidad,  $k$ , se denomina coeficiente de rigidez, constante elástica del resorte.

- **Coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente  $c$**  : Se denomina amortiguamiento al proceso de disipación de energía de un sistema durante la vibración. Si la vibración es el resultado de una perturbación inicial, sin que actúe ninguna fuerza externa posteriormente al instante inicial, es decir, si la vibración es libre, el amortiguamiento provoca la reducción progresiva de la amplitud de la misma hasta la parada final. El amortiguamiento puede ser producido por diversas causas como son la fricción interna de los materiales sujetos a deformación, el rozamiento entre partes con movimiento relativo, la generación de ondas acústicas, el paso de un fluido por unos orificios. Normalmente, en cualquier proceso vibratorio están presentes varios mecanismos de amortiguamiento, aunque unos pueden ser predominantes respecto a los demás, dependiendo del sistema de que se trate. En el siguiente apartado 2.2 nos centraremos en explicar los diferentes tipos de amortiguamiento y cual es el predominante en nuestro sistema.

Los sistemas mecánicos, en nuestro caso el **sistema bicicleta-ciclista o tija-ciclista**, al sufrir un choque o ser sometidos a la acción de fuerzas o movimientos variables como los producidos por el asfalto en el transcurso del tiempo, responden modificando sus estados de equilibrio, con unos cambios de configuración que pueden perturbar su normal funcionamiento. Cuando la excitación tiene determinadas características de variación con el tiempo, la respuesta es de tipo vibratorio y puede alcanzar amplitudes importantes, llegando en algunos casos a ocasionar el fallo estructural del sistema. Este fenómeno puede suceder incluso con intensidades pequeñas de la acción excitadora. Las amplitudes de las vibraciones producidas en cualquier sistema dependen, por un lado, de la ley de variación con el tiempo de la excitación, y por otro, de las características mecánicas del sistema considerado. En el sistema a estudiar el mal funcionamiento se considera el malestar del usuario.

### 2.1.2 Tipos de amortiguamiento

En general, los tipos de amortiguamiento predominantes pueden dividirse en tres grupos: amortiguamiento fluido, amortiguamiento seco o de Coulomb y amortiguamiento estructural o histerético.

- *Amortiguamiento fluido*: Se origina por el paso obligado de un fluido a través de unos orificios o por la interacción de un sistema vibrante con el medio fluido en el que está inmerso. En este último caso, si el medio en que está inmerso el sistema vibrante es un gas, el amortiguamiento producido es muy pequeño; si es un líquido, el amortiguamiento puede ser bastante mayor. El ejemplo más conocido de amortiguamiento fluido es el producido en los amortiguadores de vehículos automóviles.

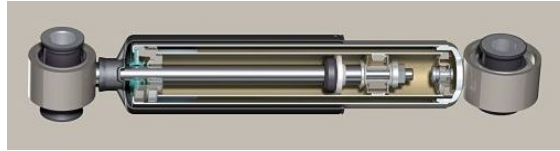


Figura 2.2 Amortiguador de un vehículo

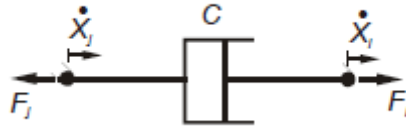


Figura 2.3 Esquema amortiguamiento fluido

La fuerza,  $F_I$ , que debe aplicarse en el extremo  $i$  para producir el movimiento relativo, puede expresarse:

$$F_I = c(\dot{x}_i - \dot{x}_j) \quad (5)$$

Donde el coeficiente de proporcionalidad  $c$  se denomina coeficiente de amortiguamiento y depende de la viscosidad del fluido y de la geometría de los orificios, cilindro y vástago.

- *Amortiguamiento seco o de coulomb*: Este amortiguamiento es el producido por el deslizamiento relativo entre dos superficies sin lubricar sometidas a la acción de una fuerza normal de compresión entre ellas.

La figura 1.16 muestra una masa,  $m$ , con velocidad  $\dot{x}$ , deslizando sobre una superficie fija. Si se considera que la fuerza de rozamiento entre las superficies en contacto sigue la ley de Amontons-Coulomb, su valor puede expresarse:

$$|F_r| = \mu N \quad \text{si } \dot{x} \neq 0 \quad (6)$$

$$|F_r| \leq \mu N \quad \text{si } \dot{x} = 0 \quad (7)$$

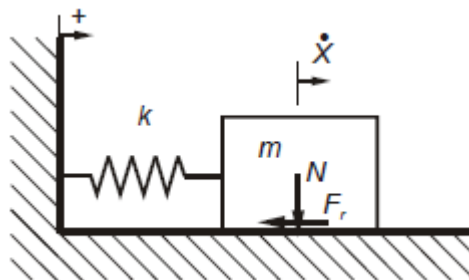


Figura 2.4 Esquema rozamiento seco

- *Amortiguamiento estructural o histerético*: Este amortiguamiento surge como consecuencia de la deformación interna del material. Este fenómeno se presenta en todos los materiales, incluso en los considerados con comportamiento elástico, ya que realmente el comportamiento no es perfectamente elástico. Como consecuencia de ello, si se aplica deformación en un sentido y otro a un elemento elástico, puede comprobarse que la curva fuerza-desplazamiento durante el proceso de carga no es exactamente igual a la obtenida durante la descarga.

Este es el amortiguamiento predominante en nuestro sistema, y además de la mejora de la fibra de basalto respecto a la de carbono, es decir, la energía disipada por la fibra de basalto es mayor que la disipada por el carbono.

### 2.1.3 Vibraciones mecánicas

Un movimiento vibratorio es la variación de la configuración de un sistema con respecto al tiempo alrededor de una posición de referencia. Estos movimientos pueden clasificarse de diversas formas, dependiendo del aspecto considerado.

Hay diferentes clasificaciones de las vibraciones mecánicas:

#### 1. Periódicas o aperiódicas:

- *Periódicas*: son movimientos en los que la configuración del sistema se repite a intervalos iguales de tiempo.

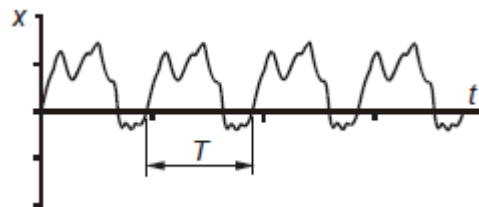


Figura 2.5 Vibraciones periódicas

- *Aperiódicas*: son movimientos en los que no se produce una repetición de la secuencia a intervalos iguales de tiempo.

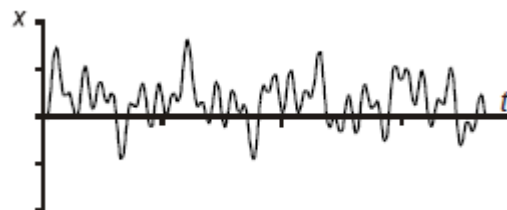


Figura 2.6 Vibraciones Aperiódicas

## 2. Amortiguado, amplificado o constante:

- *Amortiguado*: se produce cuando los valores máximos de los desplazamientos disminuyen progresivamente.
- *Amplificado*: cuando los valores máximos de los desplazamientos aumentan con el tiempo.
- *Constante*: cuando los máximos de los desplazamientos permanecen constantes con el tiempo.

## 3. Libres o forzadas:

- *Libres*: cuando no existen fuerzas exteriores aplicadas durante la vibración. Generalmente se producen cuando se aparta un sistema de su posición de equilibrio, o se le comunica una velocidad o energía (caso del choque).
- *Forzadas*: cuando durante el movimiento existe una fuerza exterior que obliga al sistema a vibrar.

## 4. Permanentes o transitorias:

- *Permanentes*: se considera permanente si su duración es suficientemente larga en el tiempo, manteniendo sus parámetros aproximadamente constantes. Es la que se produce normalmente ante una fuerza externa variable de larga duración. Generalmente es una vibración forzada. Su duración es normalmente igual a la duración del proceso de excitación.

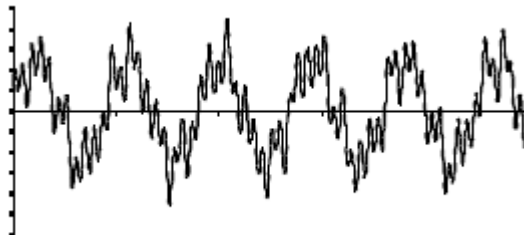


Figura 2.7 Vibraciones permanentes

- *Transitoria*: cuando su duración es corta, reduciendo su amplitud hasta desaparecer a los pocos ciclos de su inicio. Es la vibración que se produce normalmente ante una perturbación momentánea del sistema o ante un desplazamiento de la posición de equilibrio, dejándolo libre posteriormente. Generalmente es una vibración libre amortiguada.

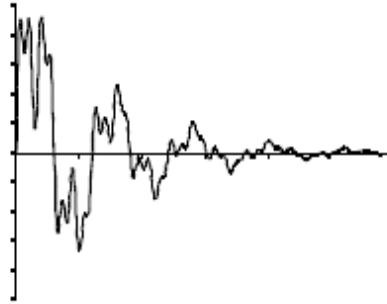


Figura 2.8 Vibraciones transitorias.

### 5. Lineales o no lineales:

- *Lineales*: si la ecuación que define el movimiento es una ecuación lineal. En estos casos, la relación entre la excitación y la respuesta de los sistemas admite el principio de superposición.
- *No lineales*: cuando la ecuación que define el movimiento no es lineal. En estos casos no es aplicable el principio de superposición.

## 2.2 Trasmisibilidad

Ya que hemos visto todas las posibles combinaciones de las vibraciones diremos que la nuestra es un sistema amortiguado con vibración forzada y, en general, con intervalos de periodicidad. La vibración forzada es la producida por el movimiento de la base  $y$ , que en nuestro caso es el producido por el terreno:

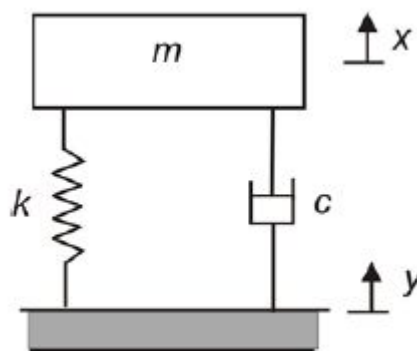


Figura 2.9 Sistema mecánico con variación del terreno

Donde  $y$  es la coordenada que representa al asfalto y  $x$  es la que representa el punto de contacto Ciclista- Bicicleta.

Aislando la masa y planteando la ecuación de equilibrio nos queda como sigue:

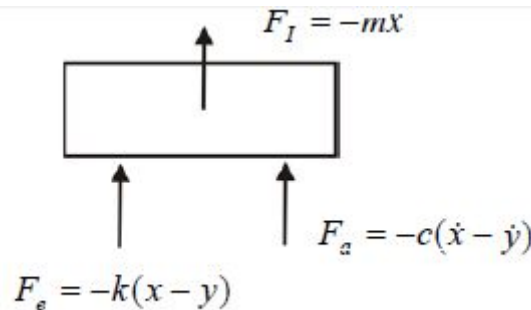


Figura 2.10 Fuerzas que intervienen en la masa del sistema

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (8)$$

Y pasando a la derecha los términos relacionados con la excitación nos queda:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{y} + ky \quad (9)$$

Ensayando una solución del tipo  $x_p(t) = e^{i\omega t}$  en la ecuación anterior nos queda lo siguiente:

$$r(-w^2 + i2\zeta w w_n + w_n^2) = (i2\zeta w w_n + w_n^2)Y \quad (10)$$

Que dividiendo por  $w_n$  y despejando  $r$  queda:

$$r = Y \frac{1 + i2\zeta\tau}{1 - \tau^2 + i2\zeta\tau} \quad (11)$$

La solución particular es por tanto:

$$x_p(t) = r e^{i\omega t} = |r| e^{i(\omega t - \alpha)} = X e^{i(\omega t - \alpha)} \quad (12)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores se puede definir la **transmisibilidad** como el cociente entre la amplitud de la respuesta y la amplitud de la excitación:

$$\frac{X}{Y} = \frac{\sqrt{1 + (2\zeta\tau)^2}}{\sqrt{(1 - \tau^2)^2 + (2\zeta\tau)^2}} \quad (13)$$

Donde el cociente entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural del sistema es una magnitud adimensional que se representará por:

$$\tau = \frac{w}{w_n} \quad (14)$$



Y la relación de amortiguamiento es:

$$\frac{c}{2m} = \zeta \omega_n \quad (15)$$

Para que el confort sea el mayor posible se necesita que la transmisibilidad sea la más pequeña posible.



## 3 INTRODUCCIÓN A LA INSTRUMENTACIÓN

---

**E**s cierto que instrumentos de medida hay en todas partes, el más común es el reloj, pero abundan los termómetros y los salpicaderos de los coches están llenos de indicadores: velocidad, revoluciones, nivel de gasolina, etc.

En general estamos familiarizados con los indicadores que constituyen el extremo visible de la cadena de medida. Poca gente conoce el funcionamiento interno de un sistema o aparato de medida. El usuario ordinario no tiene porqué conocer como funciona por dentro un aparato, siempre que ese conocimiento no sea preciso para poder hacer un uso adecuado del mismo. Este es el caso de aparatos “cerrados”, cuyo correcto funcionamiento está certificado por el fabricante o por una empresa que realiza el mantenimiento y calibrado del mismo. Este es el caso de los instrumentos de un coche, de la balanza electrónica de un supermercado o del medidor de un surtidor de gasolina.

Un ingeniero, igual que otros profesionales, debe conocer algo más acerca de como funcionan los sistemas de medida que se utilizan en la caracterización de los materiales y en los procesos de fabricación de los mismos, tanto para poder juzgar lo adecuado de los sistemas utilizados por otros, como para poder seleccionar un sistema adecuado de medida para un uso particular.

### 3.1 Definición de Instrumentación

Se denomina instrumentación al conjunto de instrumentos que hacen posible la medida de una variable física particular y, por extensión, también al conjunto de instrumentos de medida que permite seguir la evolución de un sistema físico, cualquiera que sea el número de variables físicas involucradas.

Se define también instrumentación a la disciplina que estudia las técnicas de diseñar, construir y utilizar correctamente los sistemas de medida. En este curso introductorio vamos a ceñirnos a los conceptos mínimos necesarios para comprender el funcionamiento de los sistemas eléctricos o electrónicos de medida a efectos, fundamentalmente, de poder utilizarlos correctamente

### 3.2 Componentes de un sistema de medida

La Figura muestra el esquema simplificado de un sistema de medida en forma de bloques funcionales. A la izquierda de la cadena de medida se encuentra el sistema físico, alguna de cuyas magnitudes físicas se quiere medir. En el extremo opuesto se encuentra el sistema que permite al usuario tomar nota o almacenar la medida, es decir el sistema de presentación o toma de datos.

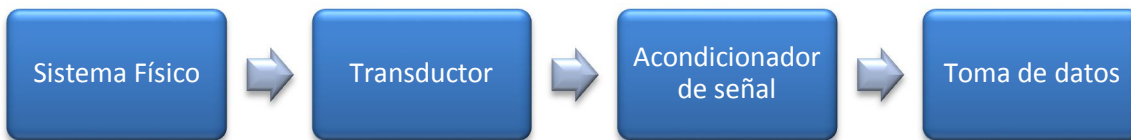


Figura 3.1 Esquema de un sistema de medida.

En los sistemas modernos, la toma de datos se hace de forma electrónica, por lo que la variable física a medir debe transformarse previamente en una señal eléctrica. Aunque en ciertos sistemas la señal eléctrica en cuestión es una intensidad de corriente, supondremos aquí que en general se trata de una tensión eléctrica.

La conversión de la magnitud física en una señal eléctrica para la toma de datos se realiza en dos etapas:

- En la primera etapa dicha magnitud física se convierte, mediante un transductor en otra magnitud de tipo eléctrico (por ejemplo una resistencia eléctrica).
- En la segunda etapa, un acondicionador de señal incluye la circuitería necesaria para convertir la magnitud característica del transductor en una señal eléctrica de nivel adecuado.

En algunos sistemas las tres etapas del sistema de medida están totalmente integradas, de forma que un único aparato realiza las tres funciones de una manera transparente al usuario. Este es el caso, por ejemplo de un termómetro clínico electrónico, en el cual el transductor, el acondicionador de señal y el indicador digital están integrados en un elemento del tamaño de un bolígrafo. En otras ocasiones, particularmente en el caso de instrumentación de laboratorio, las etapas están físicamente diferenciadas, y se dispone de un transductor que se conecta (enchufa) a la entrada de un acondicionador de señal a cuya salida se conecta un aparato para presentar o tomar los datos. La disposición modular complica la utilización, pero a su vez la hace más versátil ya que permite combinar transductores, acondicionadores y lectores en formas adecuadas a diversos objetivos.

### 3.2.1 Transductores

Un transductor podría definirse como un dispositivo que convierte una magnitud física en otra más conveniente para los propósitos de la medida. Aunque la conversión puede ser a magnitudes de tipo mecánico (por ejemplo desplazamiento o presión hidráulica o neumática), en la mayoría de las aplicaciones se utilizan transductores de tipo eléctrico ya que ello permite un mejor tratamiento de la información.

En la literatura técnica se puede encontrar el término sensor como sinónimo de transductor. Se denomina sensor a todo “dispositivo que detecta variaciones en una magnitud física y las transforma en señales útiles para un sistema de medida o control” mientras que un transductor es un “dispositivo

que convierte una magnitud física en otra distinta”. Los dos conceptos no son en general equivalentes, pero en el campo de la instrumentación pueden tomarse como tales si el contexto lo permite.

En muchos textos se reserva el término sensor para el elemento que realiza la conversión de magnitudes y el transductor pasa a ser el dispositivo completo que incorpora el sensor y todos los componentes necesarios para su completo funcionamiento. Por ejemplo un transductor de fuerzas está constituido por un elemento que, bajo la acción de la fuerza que se quiere medir, se deforma en régimen elástico. Sobre dicho elemento se pegan elementos llamados bandas extensométricas que convierten la deformación en variación de la resistencia de un hilo metálico. Estrictamente hablando, el sensor sería el filamento metálico de la banda extensométrica y el transductor de fuerza todo el conjunto, incluidos los cables que permiten conectar el transductor a un acondicionador de señal. Esta es la interpretación que aquí seguiremos cuando sea estrictamente necesario distinguir entre uno y otro, aunque, en general, tomaremos como equivalentes las denominaciones sensor y transductor.

<b>PASIVOS</b>	<b>Resistencia (R)</b>	Potenciómetro Banda extensométrica Termo-resistencia (RTD) Termistor Foto-resistencia
	<b>Impedancia (Z)</b>	Inductivo de núcleo deslizante Inductivo de entrehierro variable Transformadores diferenciales capacitivos Magnetoestricción
	<b>Especiales</b>	Célula Hall Célula fotoemisiva Cámara de ionización
<b>ACTIVOS</b>	<b>Generación f.e.m</b>	Termopar Sensor piezoeléctrico Tacómetro eléctrico Célula fotovoltaica

Tabla 3.1 Tipos de transductores eléctricos.

La tabla 3.1 resume los tipos más corrientes de transductores eléctricos. Existen dos grandes grupos: el de los transductores pasivos, que necesitan alimentación externa para efectuar la medida, y los activos, que generan por sí mismos una fuerza electromotriz y no necesitan alimentación externa.

Dentro de los transductores pasivos, los transductores pueden clasificarse por el tipo de variable eléctrica ligada al transductor. Los tipos fundamentales son:

- Transductores en los que varía la resistencia eléctrica: potenciómetros (variación de la resistencia inducida por un desplazamiento), bandas extensométricas (variación de la resistencia debida a la deformación mecánica), termo-resistencias (RTD) y termistores (variación de la resistencia con la temperatura).
- Transductores en los que varía la impedancia eléctrica, debido a un cambio en la autoinducción del transductor (transductores inductivos de núcleo deslizante o de entrehierro variable), debido a un cambio de inducción mutua entre dos bobinas (LVDT: linear variable differential transformer, o RVDT: rotary variable differential transformer,), debido a un cambio de la permeabilidad magnética (magnetoestricción), o debido a un cambio en la capacidad eléctrica (transductores capacitivos).

- Transductores especiales, que se basan en efectos no incluidos en lo anterior, como la célula Hall (basada en el efecto Hall), la célula fotoemisiva (basada en el efecto fotoeléctrico) o la cámara de ionización (contador de centelleo para la medida de radiaciones ionizantes).

Dentro de los transductores activos, se consideran en la Tabla los siguientes:

- Los termopares, circuitos formados por dos metales diferentes en el que se genera una fuerza electromotriz cuando las uniones de los dos metales se encuentran a temperaturas diferentes (efecto termoelectrico).
- El generador eléctrico que usa el efecto de inducción magnética para generar una corriente eléctrica cuyas características están directamente relacionadas con la velocidad de rotación (tacómetro).
- Los transductores piezoeléctricos que usan un cristal que al ser deformado genera una separación de las cargas positivas y negativas que produce una diferencia de potencial entre caras del cristal relacionada con la deformación experimentada.
- La célula fotovoltaica que genera una fuerza electromotriz cuando se ilumina una unión semiconductor (efecto fotovoltaico).

### 3.2.2 Acondicionadores de señales

En la mayoría de las ocasiones la salida suministrada por el transductor es inadecuada para atacar los sistemas de presentación y toma de datos y debe ser modificada de alguna manera, o incluso generada en el caso de los transductores pasivos.

En la Figura se ha esquematizado el diagrama de bloques funcionales de un acondicionador de señal. Puede advertirse que el acondicionador puede tener una alimentación que aplica una tensión al transductor que será operativa siempre que se trate de un transductor pasivo.

La tensión de salida del transductor puede sufrir a continuación un pre-acondicionamiento (por ejemplo un filtrado para eliminar ruidos).

Si la señal es de bajo nivel (de unas décimas de voltio), será necesario amplificar la señal.

La señal amplificada se puede someter a continuación a un post-acondicionamiento que puede consistir, por ejemplo, en una linealización (para conseguir una salida cuyas variaciones sean proporcionales a las variaciones de la magnitud física a medir) y en un aislamiento (para conseguir que la señal de salida sea independiente de los instrumentos de lectura que de ella se alimentan). En ciertos casos, el post-acondicionamiento puede incluir la conversión de la señal análogica en una señal digital (conversión analógica digital; ADC en siglas inglesas de analog to digital converter).



Figura 3.2 Esquema de un acondicionador

### 3.2.3 Presentación y toma de datos

La última etapa en la cadena de medida es la presentación y/o toma de datos.

En primer lugar cabe distinguir la forma en que se transmite la señal desde la salida del acondicionador de señal hasta los dispositivos de presentación o toma de datos. Hay dos tipos fundamentales de transmisión de señal:

- En el tipo *analógico* la señal es una diferencia de potencial entre el conductor de señal y el de referencia (tierra analógica).
- En el tipo *digital* la señal analógica se convierte en un valor digital mediante un ADC (convertor analógico digital), es decir en un número binario, y a continuación se transmite siguiendo alguno de los protocolos de comunicación existentes.

En segundo lugar, los dispositivos de presentación y toma de datos pueden clasificarse también en los tipos analógico y digital.

- En este caso la denominación “analógico” hace referencia a que se establece una analogía entre la variable a medir y el desplazamiento de un indicador móvil. Es el caso de un indicador de aguja en el que la aguja se desplaza sobre un limbo graduado en las unidades adecuadas. También es el caso del registrador en el que una plumilla se desplaza proporcionalmente a la señal en una dirección y proporcionalmente a otra señal (o al tiempo) en la dirección perpendicular. Con ello se pueden dibujar en un papel las curvas x-t (variable x-tiempo) o x-y (variable x-variable y). El osciloscopio es similar al registrador pero en este caso la plumilla se sustituye por un pincel de rayos catódicos que “dibuja” la curva en un tubo de rayos catódicos, con lo que la velocidad de respuesta es mucho mayor que la que puede dar un registrador.



- El indicador digital es el dispositivo más sencillo. En él se hace una primera conversión analógica-digital y a continuación se presenta el valor correspondiente en formato decimal. Cuando se trata de almacenar datos, la salida digital del ADC se introduce en un ordenador que lee el dato y lo almacena en la forma que requiera el usuario. Hoy en día existe una gran variedad de software de toma de datos que permite no solo el almacenamiento y tratamiento de los datos, sino también la presentación en pantalla en cualquier formato, incluyendo aparatos analógicos simulados. Si la transmisión desde el acondicionador se realiza en forma digital, la señal puede dirigirse a un ordenador que, con el software adecuado, podrá efectuar la presentación y toma de datos.

### 3.3 Características estáticas de un transductor y de un sistema de medida.

Como hemos visto en el apartado anterior, un sistema electrónico de medida está formado por un transductor y por los circuitos eléctricos que acondicionan y presentan o toman la señal.

En sentido genérico, la respuesta del transductor o del sistema hace referencia a la relación que existe entre la magnitud física que queremos medir  $m$  y la salida del transductor  $q$  o del sistema  $M$ .

En general la respuesta en un instante  $t$  depende de las variaciones experimentadas por la variable  $m$  en instantes anteriores a  $t$ . Cuando  $m$  se ha mantenido a un valor constante durante un tiempo suficientemente largo (se dice entonces que se ha estabilizado el sistema) la relación entre  $m$  y  $q$  o  $M$  es unívoca. La función que relaciona  $m$  con  $q$  o con  $M$  en estas condiciones se denomina función de respuesta estática  $f(m)$  y escribimos

$$q = f(m) \quad \text{o} \quad M = f(m)$$

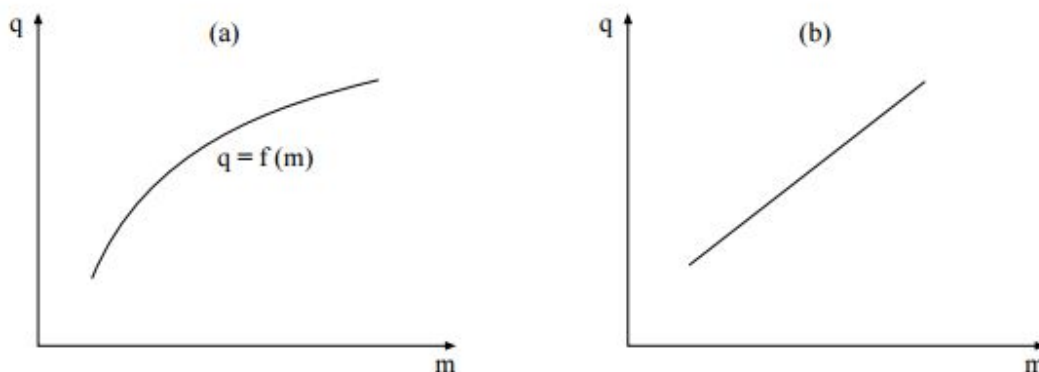


Figura 3.3 Curva de respuesta estática

La representación gráfica de la función  $f(m)$  en un diagrama como el de la Figura 3-3 (a) se denomina curva de respuesta estática. La curva de respuesta estática debería determinarse para cada transductor y sistema por comparación con

aparatos patrón (aparatos cuya calibración ha sido garantizada por laboratorios oficialmente reconocidos). Cuando esto de verdad se lleva a cabo, la curva de respuesta estática coincide con la curva de calibración. En muchos casos se utiliza una función de respuesta estática teórica o promedio para un cierto tipo de transductores. En este caso el proceso de calibración se limita a comprobar (por comparación con aparatos patrón) que la respuesta real difiere de la teórica en menos de una cierta cantidad que se tiene por aceptable para este tipo de transductor.

Una clase de transductores interesantes desde el punto de vista de su aplicación es la de los transductores lineales, que son aquellos en los que la salida  $q$  varía linealmente con la magnitud a medir, es decir aquellos en los que

$$q = f(m) = Sm + q_0 \quad (16)$$

donde  $S$  y  $q_0$  son constantes. Obviamente la curva de respuesta estática es una recta, tal como se esquematiza en la figura 3.3 (b).

La función de respuesta es la característica básica de un transductor o sistema de medida, pero no la única. A continuación se describen algunas de las características adicionales que deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar y utilizar un sistema.

### 3.3.1 Rango

El rango es el intervalo (limitado en ambos sentidos) en el que el transductor o sistema de medida puede utilizarse para realizar medidas. Se expresa especificando los límites inferior  $m_{\min}$  y superior  $m_{\max}$  del intervalo en cuestión.

El rango puede quedar limitado por el transductor o por el sistema de acondicionamiento y presentación de señal. Por ejemplo, los termómetros de resistencia de platino pueden utilizarse en el intervalo cubierto por el rango de cualquier termómetro de resistencia de platino industrial que es  $[-200, 650]$  °C. Sin embargo, es posible encontrar equipos electrónicos cuyo rango esté limitado por las prestaciones de la electrónica (usualmente por la electrónica de linealización), por lo que el sistema de medida tendrá un rango de, por ejemplo  $\pm 200$  °C, indicándose de esta manera que el intervalo es  $[-200, 200]$  °C.

En ciertos instrumentos de acondicionamiento de señal que dan la salida en tensión, es conveniente definir también el rango de salida. Por ejemplo, el dispositivo antes mencionado con un rango de entrada de  $\pm 200$  °C, podría tener un rango de salida de  $[0, 10]$  V. Esto implica que cuando el instrumento está bien ajustado, a una temperatura de  $-200$  °C corresponde una salida de 0 V, y a una temperatura de  $200$  °C una salida de 10 V.

Se define la escala total de medida como la longitud del intervalo de medida, es decir como  $m_{\max} - m_{\min}$ . Muchos fabricantes utilizan la escala total para ajustar sus instrumentos, en particular para ajustar el factor de amplificación electrónica (la ganancia o gain). En el ejemplo anterior la escala total de medida es de  $400$  °C. La

escala total de salida sería de 10 V para las condiciones supuestas y la amplificación se ajusta de modo que los 400 °C correspondan a los 10 V.

### 3.3.2 Sensibilidad estática

La sensibilidad estática de un transductor mide la variación de la magnitud de salida por unidad de variación de la magnitud a medir, en condiciones de medida estabilizada. En consecuencia, definimos la sensibilidad  $S$ , para un valor dado de  $m$ , como la derivada de la función de respuesta, es decir:

$$S = \frac{dq}{dm} = \frac{df(m)}{dm} = f'(m) \quad (17)$$

Obviamente, la sensibilidad es la pendiente de la tangente a la curva de respuesta en el punto considerado (véase la Figura 3.4 (a)). Como es obvio, la sensibilidad es constante si y sólo si la respuesta es lineal.

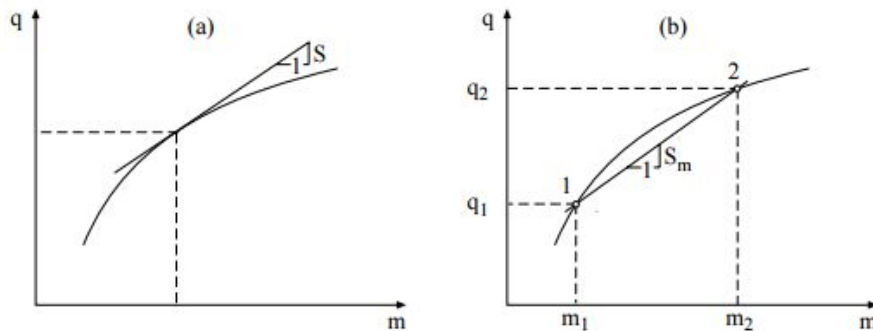


Figura 3.4 Sensibilidad del transductor

En algunos casos es interesante definir una sensibilidad media en un intervalo ( $m_1$ ,  $m_2$ ) como el cociente entre las variaciones de  $q$  y de  $m$ :

$$S_m = \frac{\Delta q}{\Delta m} = \frac{q_2 - q_1}{m_2 - m_1} = \frac{f(m)_2 - f(m)_1}{m_2 - m_1} \quad (18)$$

En particular, la sensibilidad media en la escala total  $S_{met}$  viene dada por

$$S_{met} = \frac{q_{max} - q_{min}}{m_{max} - m_{min}} \quad (19)$$

Como puede verse en Figura 3.4 (b), la sensibilidad media coincide con la pendiente de la secante que pasa por los puntos 1 y 2, por lo que se también se denomina en ocasiones sensibilidad secante. Dicha denominación se contrapone entonces a la de sensibilidad tangente para  $S$ .

En algunos casos es interesante definir la sensibilidad relativa al valor de la magnitud de salida en una situación de referencia.

Por ejemplo la sensibilidad relativa referida a un punto  $(m_0, q_0)$  puede escribirse como

$$S_{r0} = \frac{S}{q_0} \quad (20)$$

### 3.3.3 Linealidad

La curva de calibración más sencilla es la lineal. Los transductores cuya salida es lineal requieren electrónicas más sencillas (y por tanto más baratas) y se encuentran frecuentemente en el mercado.

Ningún transductor es exactamente lineal. De hecho, hay transductores que son claramente no lineales en intervalos amplios de medida y que, sin embargo, son aproximadamente lineales en intervalos reducidos.

La máxima desviación entre la curva de respuesta verdadera y la aproximación lineal utilizada es la no-linealidad del transductor o sistema, tal como ilustra la figura 1.5.3 en la que  $\Delta q$  es la no linealidad expresada en la variable de salida y  $\Delta m$  es la no-linealidad expresada en la variable a medir. Debe tenerse en cuenta que en la figura la no-linealidad está muy exagerada y que en la mayor parte de los casos prácticos la curva de respuesta es muy próxima a una recta.

Las hojas de características de los instrumentos suelen expresar la no-linealidad en porcentaje de la escala total.

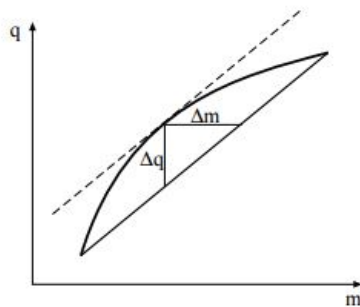


Figura 3.5 Linealidad de un transductor

### 3.3.4 Resolución y umbral

La resolución de un transductor o sistema de medida es la variación mínima de la entrada para la que puede observarse una variación en la salida. En los indicadores analógicos está directamente relacionado con la graduación de la escala de lectura (las divisiones de una regla). En los instrumentos digitales está relacionado con el valor del dígito menos significativo (el situado más a la derecha en el indicador digital).

Los indicadores digitales se clasifican por el número de dígitos que incluyen en la presentación. Prescindiendo de la situación del punto decimal, un indicador de 3 dígitos, por ejemplo, puede presentar resultados desde -999 hasta 999. La resolución es de  $\pm 1$ , por lo que la resolución relativa es de  $\pm 1/999 \approx 0.001$ . Un indicador digital es de 3 dígitos y medio (3.5 dígitos) cuando puede presentar cuatro dígitos de los cuales el de mayor orden puede tomar sólo los valores 0 y 1. Esto significa que puede representar números desde -1999 a 1999. En este caso la resolución relativa es de  $\pm 1/1999 \approx 0.0005$ .

El concepto de umbral es similar al de resolución, cuando la variación de señal tiene lugar a partir de cero. En buena parte de los transductores eléctricos el umbral coincide con la resolución, pero existen aparatos de medida, particularmente con elementos mecánicos, en los que el umbral es superior a la resolución.

### 3.3.5 Repetibilidad, histéresis y estabilidad

Para que una medida sea fiable, el sistema que se utiliza para efectuarla tiene que tener unas ciertas características que, dicho en general, garanticen que si el valor de la magnitud física no cambia, la medida será la misma independientemente de cómo y cuando se realice la medida.

La repetibilidad es la capacidad del sistema de dar el mismo valor de la magnitud medida cuando se realizan distintas medidas en las mismas condiciones. La repetibilidad está caracterizada por la desviación típica  $\sigma$  de la medida.

La histéresis es el fenómeno por el cual el valor medido depende del sentido en el que se alcance el punto de medida. Por ejemplo, un transductor de desplazamiento puede no medir lo mismo si el desplazamiento está aumentando o disminuyendo. Esto significa que hay dos curvas de respuesta, una cuando la variable a medir está creciendo y otra cuando está decreciendo (Figura 3.6). En sistemas lineales ideales la histéresis es constante (Figura 3.6 (b) ) y está caracterizada por la distancia horizontal entre la rama ascendente y la descendente. En general la histéresis se caracterizará por la máxima distancia horizontal entre las ramas ascendente y descendente.

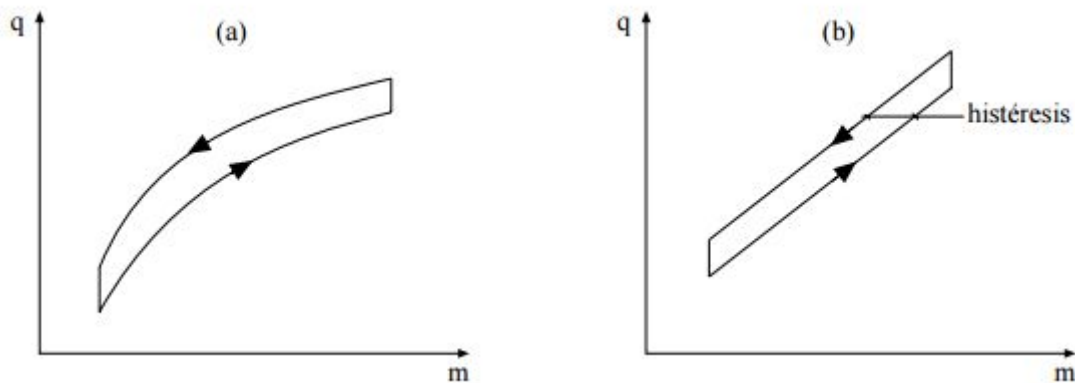


Figura 3.6 Histéresis de un transductor.

La estabilidad de un transductor o sistema de medida es su capacidad de mantener fija la curva de respuesta estática a lo largo del tiempo. En sistemas lineales la estabilidad puede cuantificarse dando la deriva del cero (cambio a lo largo del tiempo del término independiente en la función de respuesta) y la deriva de la sensibilidad (cambio a lo largo del tiempo de la sensibilidad).

En muchos casos es importante no sólo la estabilidad temporal, sino también la estabilidad térmica, que se define de forma similar a la estabilidad temporal como la capacidad de mantener fija la curva de respuesta estática cuando cambia la temperatura del entorno donde se realiza la medida.

La deriva térmica del cero suele expresarse como un porcentaje de la escala total por grado de variación de temperatura y la deriva térmica de la sensibilidad como un porcentaje del valor de la sensibilidad a 20°C por grado de variación de temperatura.

### 3.4 Instrumentación del ensayo en cuestión

En el ensayo que nos ocupa en este proyecto usamos una instrumentación proporcionada por la empresa virtualmech [5] que servirá para la medición de los datos que necesitamos saber para valorar la comodidad de los diferentes componentes que tenemos para el estudio.

A continuación se procederá a detallar la instrumentación que poseemos para este ensayo además del sistema físico a medir y la toma de datos con su visualización.

#### 3.4.1 Sistema físico

La magnitud física que queremos medir es la aceleración en dos puntos de la bicicleta con el fin de observar como se comporta esta ante una perturbación externa y poder hacer la comparativa entre todas las bicicletas y tijas del ensayo.

#### 3.4.2 Transductor

El transductor que tenemos es un acelerómetro basado en la tecnología MEMS [6].

En concreto se trata de un Kionix KXR94 en el que se encuentran los tres ejes tridimensionales y tiene un rango de  $\pm 2g$  ( $=19,6^m/s^2$ ).

Toda las especificaciones de este acelerómetro se puede encontrar en el siguiente enlace <http://www.kionix.com/product/KXR94-7050>.



Figura 3.7 Transductor Kionix KXR94

### 3.4.3 Acondicionador de la señal

Para acondicionar la señal que nos ofrece el transductor lo hacemos mediante un microcontrolador de prototipado, en el caso en cuestión se usa una placa Mbed que a su vez estará alimentada por una batería de 5V.

Este microcontrolador acondiciona la señal del acelerómetro que es proporcionada en voltios (0v-3.3v) y transforma los datos a binario. Es capaz de ofrecernos 1.000 datos por segundo, es decir, a una frecuencia de 1.000 Hz.

Los datos ofrecidos por el acondicionador de la señal son de una extensión de 12 bits lo que nos proporciona  $2^{12}$  valores que es lo mismo que 4096. El valor 0 se corresponde a 0 Voltios y el valor 4096 a 5 Voltios.

Para ver todas las características de este microcontrolador hay que ir a la página web del fabricante <http://www.mouser.es/ProductDetail/Keil-Tools/mbed-0051/?qs=%2fha2pyFadugLICyW8B92x5fLEKZt5ueMO48cePgzpXJBgjQ1ywXjVA%3d%3d>



Figura 3.8 Mbed

### 3.4.4 Toma de datos

Como se ha dicho en el anterior apartado el acondicionador nos ofrece los datos en binario de 0 a 4096.

Para traducir estos valores a  $m/s^2$  nos ayudamos de la herramienta Matlab con la que se ha creado un código que nos proporciona valores de aceleraciones.

Para ello el código asigna el valor 2048 a  $0 m/s^2$  y 0 y 4096 a  $\mp 2g$ , después de la calibración.

La calibración se realiza de la siguiente manera:

$$aceleración = (medida_{relativa} - medida_{media}) * Sensibilidad \quad (21)$$

Donde:

- *aceleración* es la magnitud que queremos medir en  $m/s^2$
- *medida<sub>relativa</sub>* es la magnitud en binario proporcionado directamente por el conjunto transductor-acondicionador.
- *medida<sub>media</sub>* es la magnitud en binario procedente de la media realizada por el acondicionador gracias a su código implementado.

Es media antes mencionada se realiza de la siguiente manera:

1. Se coloca el acelerómetro sobre un plano totalmente horizontal, se realiza la medición que

proporcionará un valor en binario.

2. Se procede a girarlo  $180^\circ$  y volvemos a realizar la medida y dará otro valor.
3. Se realiza la media de los dos valores anteriores obtenidos y ese valor es la media que se busca.

En el Anexo I se detalla el código, tanto el usado para la programación del acondicionador mbed como el matlab, facilitado y a continuación el modificado.



## 4 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

---

**P**ara la comparación del confort de las tijas se realizará un ensayo referente a la respuesta que proporciona la tija ante una perturbación oscilatoria externa.

El ensayo del que este proyecto se ocupa permitirá observar el confort proporcionado por la tija, es decir, la atenuación de la perturbación externa por parte la tija.

Para poder comparar diferentes tijas es necesario realizar el ensayo en condiciones de laboratorio, siempre respetando las mismas condiciones y factores que intervienen en el ensayo para que la comparación sea lo más objetiva posible.

En el proyecto que se presencia no se ha optado por la comparación de cuadros porque además de los materiales con los que está fabricado influye en gran medida la geometría y la forma de los perfiles y lo que se quiere es comparar la influencia de los diferentes materiales utilizados por los fabricantes hasta la fecha.

### 4.1 Descripción del ensayo

En el ensayo se comparará la atenuación de la perturbación externa por parte de la tija. El ensayo no es más que un rodillo que hará de perturbación externa en el cual está anclado el sistema bicicleta-ciclista.

Para ello se estableceran las mismas condiciones para todas las Tijas a comparar.

Para el ensayo dispondremos de los siguientes componentes:

- **Bancada**, la cual es la encargada de la simulación de una vibración armónica, esto se consigue con un rodillo, sobre el que apoya la rueda trasera de la bicicleta, al que se le ha soldado una protuberancia que conseguirá la vibración que queremos simular, mientras que la rueda delantera se ancla en un eje fijo para que la perturbación sea lo más constante posible.

Además a la bancada se le ha dotado de silent-block con el fin de que parte de la perturbación no se transmita al suelo del laboratorio.

Esta bancada ofrece una respuesta que depende de:

- Diámetro del Rodillo, el cual nos dará la frecuencia de excitación del sistema mediante la longitud de onda que no es más que el perímetro de la circunferencia del rodillo. En este caso es de 100 mm de diámetro.
- Geometría y dimensiones de la protuberancia, esta nos dará la amplitud del impulso, es decir, la altura de la protuberancia, y el porcentaje de longitud de onda que ocupa el impulso. Es un escalón de 6 mm de alto y ancho.



Figura 4.1 Bancada

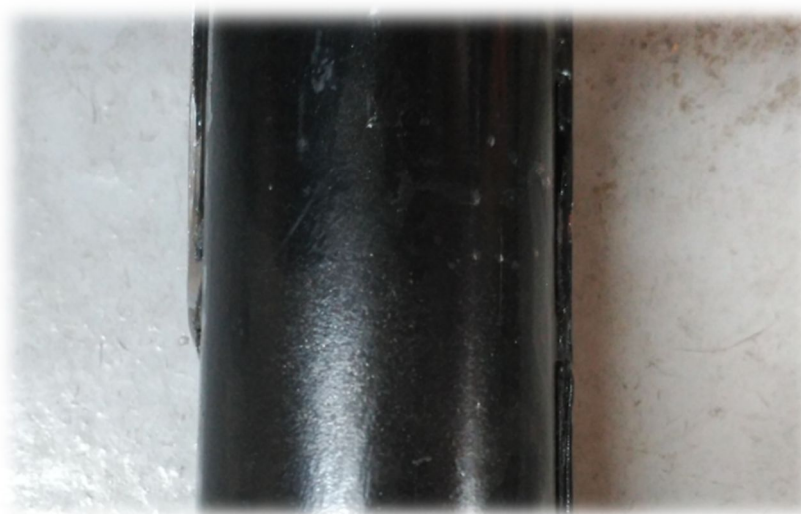


Figura 4.2 Detalle del rodillo con su protuberancia

- **Velocímetro** que se usará para controlar la frecuencia de la perturbación externa. Este medidor lo que hace es observar las variaciones de aceleración por medio de un acelerómetro el cual envía la lectura de este acelerómetro al monitor central que es el que se encarga de traducir esta medida.



Figura 4.3 Medidor de velocidad del rodillo.

$$V = W * R \quad (22)$$

Sabiendo la velocidad de la periferia de la rueda se puede calcular la velocidad angular del rodillo, o lo que es lo mismo la frecuencia de la protuberancia, ya que sabemos el radio del mismo.

- **Sistema de adquisición de datos**, cuyas características se han visto en el apartado 3 de este proyecto.
  - Placa: Mbed
  - Acelerómetro: KIONIX KXR94.
  - Cableado: Común de montaje electrónico.
  - Sistema de anclaje: Piezas impresas en 3D.
  - Velocímetro.

A continuación pasaremos a reflejar las condiciones en las que se realizará este ensayo, las cuales serán estandarizadas para todas las repeticiones del mismo y tendrán que ser comprobadas antes de realizarse el mismo.

- Se realizará siempre con el mismo ciclista que tendrá un peso corporal de 80kg que sumando la vestimenta y zapatos estará en torno a los 83 kg.
- Los acelerómetros estarán nivelados respecto al plano de la superficie superior del sillín o superficie del suelo.
- La rueda trasera será en este caso la misma rueda con el mismo neumático y presión para todos los ensayos. Esto es así porque el neumático elimina parte de la vibración y queremos que todos los ensayos se realicen en las mismas condiciones. La presión del neumático se estandarizará en 9 bares.
- La velocidad marcada por el velocímetro es de especial importancia ya que describe el comportamiento de la perturbación que ofrece la bancada, es decir, la velocidad de la rueda es directamente proporcional a la frecuencia de la perturbación.

El rodillo tiene un radio de 30 mm que, sabiendo las velocidades, se podrá calcular la frecuencia de la perturbación.

$$V(m/s) = w_{rodillo}(\text{rad/s}) * 0.03 \quad (23)$$

$$Frecuencia(Hz) = w_{rodillo}(\text{rad/s}) * \frac{1 \text{ ciclo}}{2 * \pi \text{ radianes}} \quad (24)$$

- Tijas, se usarán diferentes tijas en un mismo cuadro, de aluminio, de fibra de carbono y de fibra de basalto.

## 4.2 Tijas a comparar en el ensayo

- Tija de aluminio:

<b>Modelo</b>	<b>Thomsom Masterprice</b>
<b>Material</b>	Aluminio 7075
<b>Peso</b>	210 gramos

Tabla 4.1 Características de la tija de aluminio

- Tija de carbono:

<b>Modelo</b>	<b>Specialized Roubaix</b>
<b>Material</b>	Fibra de Carbono
<b>Peso</b>	230 gramos

Tabla 4.2 Características de la tija de fibra de carbono

- Tija de basalto:

<b>Modelo</b>	<b>Racormance Flex</b>
<b>Material</b>	Fibra Basalto
<b>Peso</b>	160 gramos

Tabla 4.3 Características de la tija de fibra de basalto

### 4.3 Procedimiento a seguir en el ensayo

Para realizar el ensayo se procede a realizar los siguientes pasos.

1. Se realiza el montaje de la bicicleta en el banco de pruebas colocando el alojamiento de la rueda delantera en el sistema de fijación del rodillo el cual está formado por un eje y dos tuercas para su apriete y fijación.
2. Se fija el sistema de adquisición de datos mediante el anclaje diseñado específicamente para ello.

Se coloca un acelerómetro justo debajo del sillín, anclado a los raíles del mismo y el otro justo en el eje de la rueda.

3. Se le coloca en la rueda trasera el velocímetro.
4. El ciclista se monta en la bicicleta y comienza a pedalear hasta alcanzar las velocidades que se muestran en la tabla 4.7.

<b>Nombre</b>	<b>Magnitud en <math>m/s</math></b>
Velocidad 1	4.167
Velocidad 2	5.55
Velocidad 3	6.94
Velocidad 4	8.33

Tabla 4.4 Velocidades de ensayo

5. Se acciona el interruptor del sistema de adquisición de datos para comenzar a adquirir la respuesta de los acelerómetros ante la perturbación externa cuando se haya alcanzado y estabilizado la velocidad indicada anteriormente.
6. Pasado 20 segundos se vuelve a accionar el interruptor para detener la adquisición.

Se realiza todas las combinaciones que se ocupa este proyecto, es decir con las diferentes tijas y velocidades.

#### 4.4 Movimiento de sólido rígido

La bicicleta al estar anclada en el eje delantero y libre en el eje trasero realiza un movimiento de sólido rígido que sumandole las deformaciones de la estructura conforma el movimiento total del conjunto.

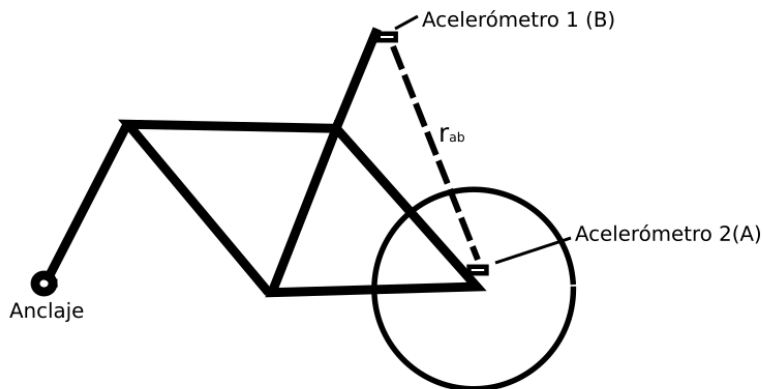


Figura 4.4 Esquema del montaje del ensayo.

Este movimiento de sólido rígido se rige por las siguientes ecuaciones:

$$a_B = a_A - w^2 * r_{AB} + \alpha \Delta r_{AB} \quad (25)$$

Descomponiendo en los dos ejes x e y queda:

$$a_{Bx} = a_{Ax} - w^2 * x + \alpha \Delta y \quad (26)$$

$$a_{By} = a_{Ay} - w^2 * y + \alpha \Delta x \quad (27)$$

Y ahora multiplicando (26) por (-y) , (27) por x y sumando queda:

$$w = \pm \sqrt{\frac{(a_{Ax} - a_{Bx}) * x + (a_{Ay} - a_{By}) * y}{x^2 + y^2}} \quad (28)$$

El signo depende de la aceleración angular  $\alpha$ .

Con las ecuaciones (26) y (27) también se calcula  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{(a_{By} - a_{Ay}) * x - (a_{Bx} - a_{Ax}) * y}{x^2 + y^2}$$

Ya tenemos la velocidad angular  $w$  y la aceleración angular  $\alpha$  del movimiento de la estructura como sólido rígido.

Aunque es evidente que este movimiento no forma parte de las deformaciones de la estructura se considera oportuno incluir este movimiento de sólido rígido en el total, tanto de la respuesta como de la perturbación, para obtener así una magnitud más próxima a la realidad que si no se incluyera.

Estos cálculos se incluirán en el Anexo correspondiente al código MATLAB.





## 5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

---

**A** continuación vamos a mostrar los datos obtenidos en los ensayos que nos ocupa este proyecto para su posterior comparación y ver como influyen todos los factores que intervienen en los diferentes casos.

Los datos que nos interesan para poder valorar la magnitud del confort son las aceleraciones producidas en el eje 'z'(dirección perpendicular al plano de la superficie del sillín y del suelo) e 'y'(dirección que se encuentra en el plano de la bicicleta y es perpendicular a la dirección z).

### 5.1 Consideraciones

Antes de proceder a mostrar los datos obtenidos en el ensayo se tendrán en cuenta varias consideraciones:

- Las velocidades de adquisición se admitirán con un desvío de  $\pm 0.2 \text{ m/s}$  respecto a la velocidad prefijada en la tabla 4.4 con lo que la frecuencia, tanto de excitación como de respuesta, que es consecuencia de la velocidad tendrá un desvío de  $\pm 1 \text{ Hz}$ .
- El color verde de las gráficas se corresponderá con la señal de excitación, es decir, con la señal proporcionada por el acelerómetro colocado en el eje trasero de la bicicleta.
- El color azul de las gráficas se corresponderá con la señal de respuesta, es decir, con la señal proporcionada por el acelerómetro colocado en el sillín de la bicicleta.

## 5.2 Datos y gráficas obtenidas en el ensayo

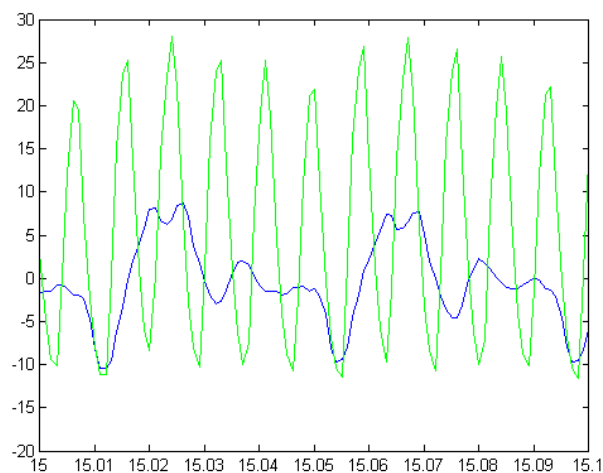
➤ Tija Thomson (Aluminio):



Figura 5.1 Montaje en Tija de aluminio.

<b>VELOCIDAD 4.167 <math>m/s</math></b>	<b>Magnitud X</b>	<b>Magnitud 2X</b>	<b>Magnitud 5X</b>
<b>Frec. de vibración</b>	23.68 Hz	47.36 Hz	118.4 Hz
<b>Amplitud en Eje</b>	16.23 $m/s^2$	6.5 $m/s^2$	57.65 $m/s^2$
<b>Amplitud en Sillín</b>	20.32 $m/s^2$	12.57 $m/s^2$	0 $m/s^2$
<b>Transmisibilidad</b>	1.252	1.93	0

Tabla 5.1 Magnitudes del ensayo tija aluminio a 4.167 m/s



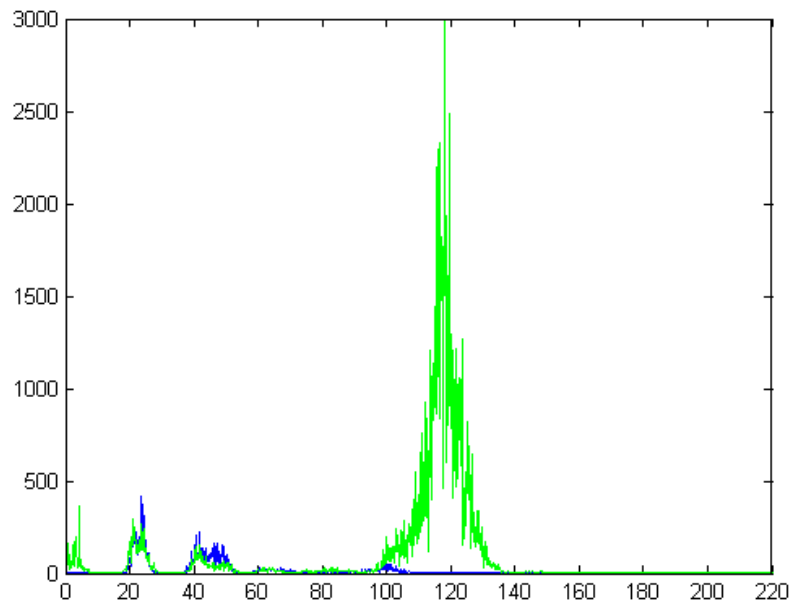
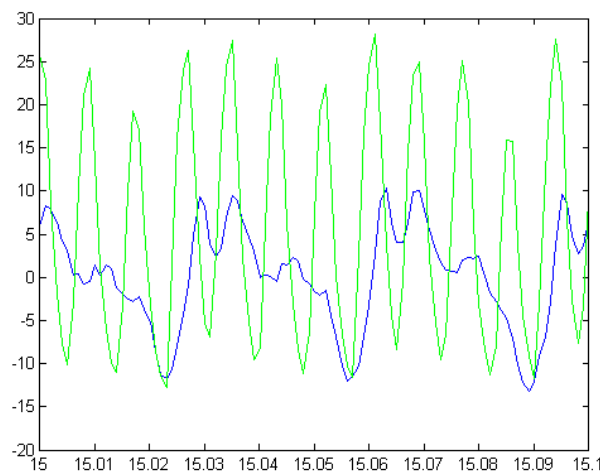


Figura 5.2 Gráficas del ensayo tija aluminio a 4.167 m/s

<b>VELOCIDAD 5.55 m/s</b>	<b>Magnitud X</b>	<b>Magnitud 2X</b>	<b>Magnitud 4X</b>
<b>Frec. de vibración</b>	29.79 Hz	59.58 Hz	119.16 Hz
<b>Amplitud en Eje</b>	21.43 m/s <sup>2</sup>	7.05 m/s <sup>2</sup>	28.31 m/s <sup>2</sup>
<b>Amplitud en Sillín</b>	33.39 m/s <sup>2</sup>	11.39 m/s <sup>2</sup>	0 m/s <sup>2</sup>
<b>Transmisibilidad</b>	1.55	1.61	0

Tabla 5.2 Magnitudes del ensayo tija aluminio a 5.55 m/s



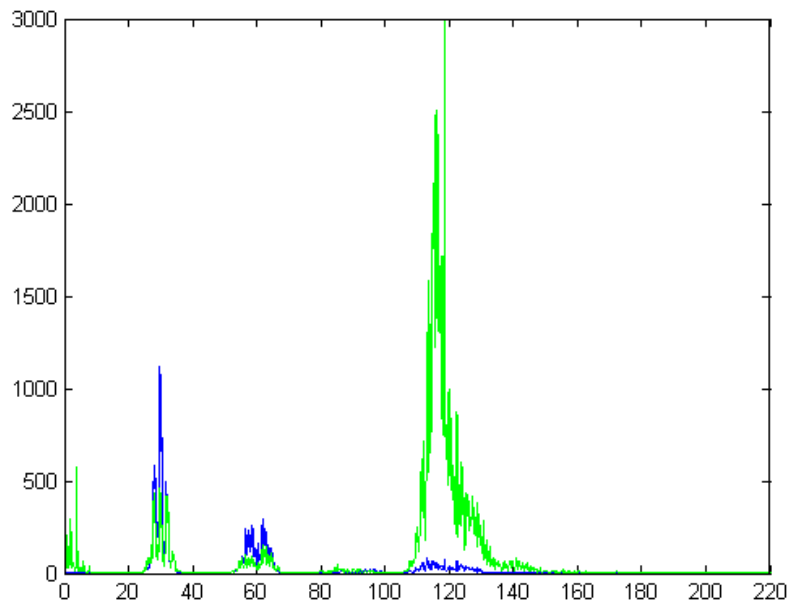
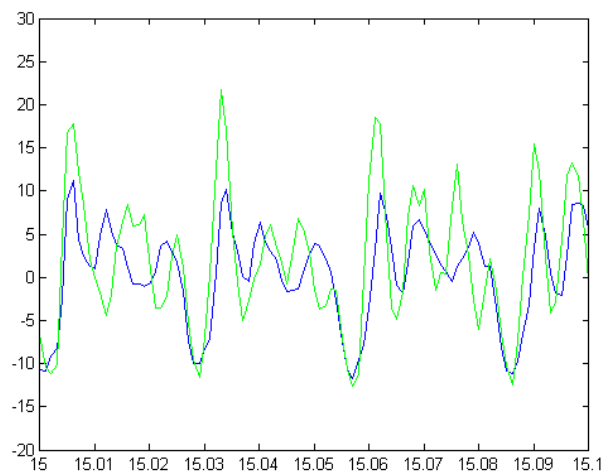


Figura 5.3 Gráficas del ensayo tija aluminio a 5.55 m/s

<b>VELOCIDAD 6.94 <math>m/s</math></b>	<b>Magnitud X</b>	<b>Magnitud 2X</b>	<b>Magnitud 3X</b>	<b>Magnitud 4X</b>
<b>Frec. de vibración</b>	36.25 Hz	72.25 Hz	108.75 Hz	144.5 Hz
<b>Amplitud en Eje</b>	41.3 $m/s^2$	17.04 $m/s^2$	12.1 $m/s^2$	13.24 $m/s^2$
<b>Amplitud en Sillín</b>	43.19 $m/s^2$	14.28 $m/s^2$	11.1 $m/s^2$	4.76 $m/s^2$
<b>Transmisibilidad</b>	1.07	0.84	0.94	0.35

Tabla 5.3 Magnitudes del ensayo tija aluminio a 6.94 m/s



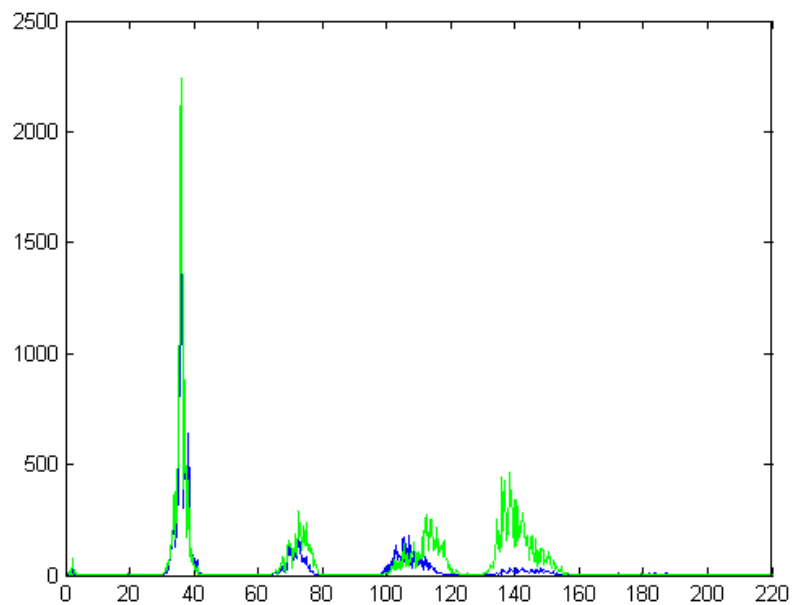
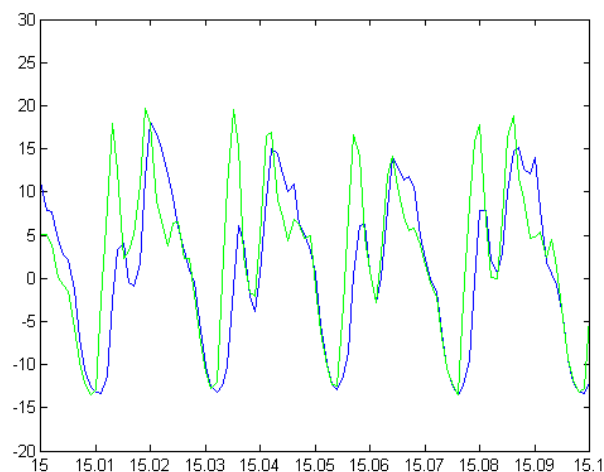


Figura 5.4 Gráficas del ensayo tija aluminio a 6.94 m/s

<b>VELOCIDAD 8.33 m/s</b>	<b>Magnitud X</b>	<b>Magnitud 2X</b>	<b>Magnitud 3X</b>
<b>Frec. de vibración</b>	43.82 Hz	87.64 Hz	131.46 Hz
<b>Amplitud en Eje</b>	61.59 m/s <sup>2</sup>	18.73 m/s <sup>2</sup>	16.93 m/s <sup>2</sup>
<b>Amplitud en Sillín</b>	66.16 m/s <sup>2</sup>	9.46 m/s <sup>2</sup>	11.8 m/s <sup>2</sup>
<b>Transmisibilidad</b>	1.25	0.6	0.9

Tabla 5.4 Magnitudes del ensayo tija aluminio a 8.33 m/s



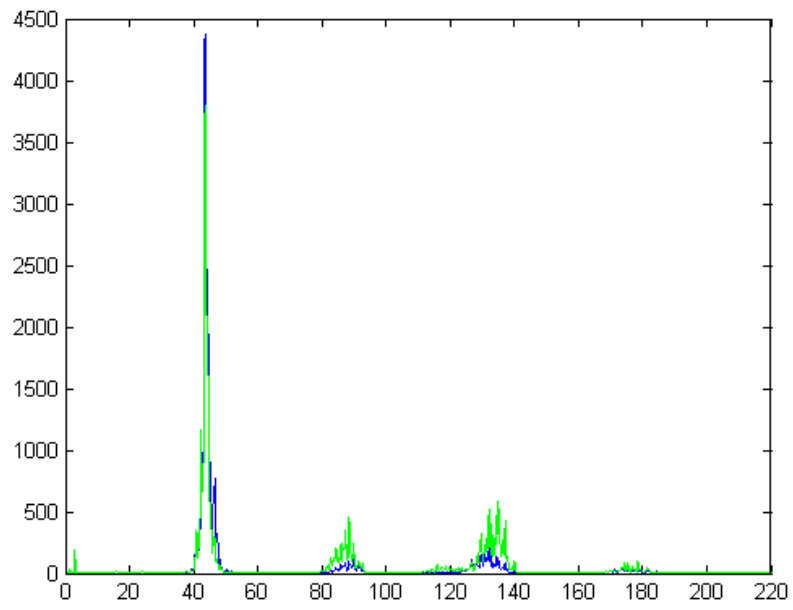


Figura 5.5 Gráficas del ensayo tija aluminio a 8.33 m/s

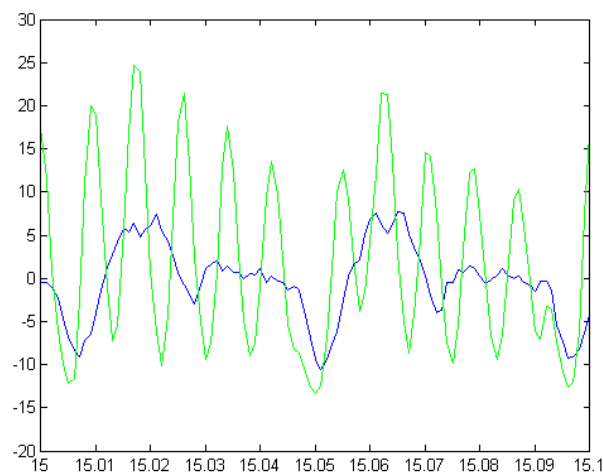
➤ Tija Specialized Roubaix (Carbono):



Figura 5.6 Montaje en Tija de fibra de carbono

<b>VELOCIDAD 4.167 <math>m/s</math></b>	<b>Magnitud X</b>	<b>Magnitud 2X</b>	<b>Magnitud 5X</b>
<b>Frec. de vibración</b>	23.68 Hz	47.36 Hz	118.4 Hz
<b>Amplitud en Eje</b>	23.4 $m/s^2$	9.96 $m/s^2$	40.12 $m/s^2$
<b>Amplitud en Sillín</b>	23.57 $m/s^2$	17.16 $m/s^2$	0 $m/s^2$
<b>Transmisibilidad</b>	1.007	1.72	0

Tabla 5.5 Magnitudes del ensayo tija fibra de carbono a 4.167 m/s



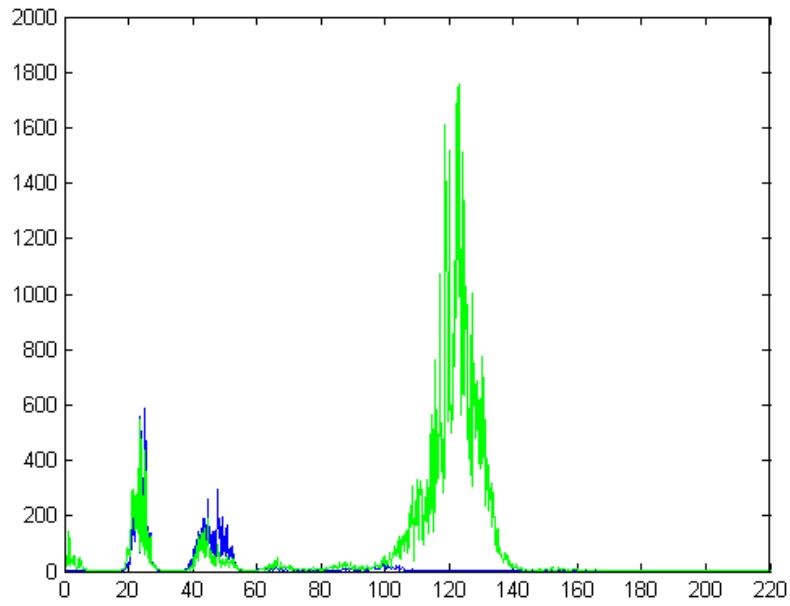
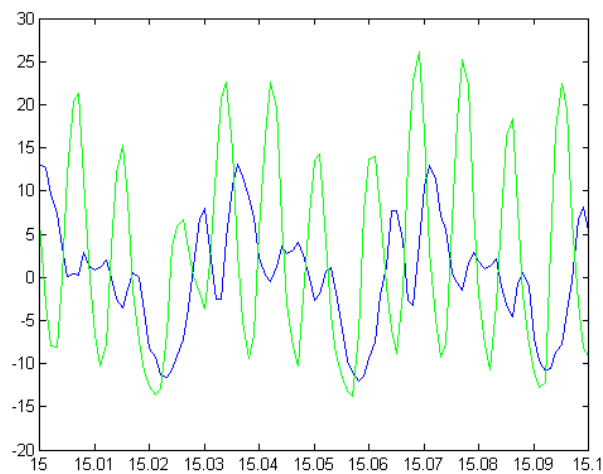


Figura 5.7 Gráficas del ensayo tija fibra de carbono a 4.167 m/s

VELOCIDAD 5.55 $m/s$	Magnitud X	Magnitud 2X	Magnitud 4X
<b>Frec. de vibración</b>	29.17 Hz	58.34 Hz	116.68 Hz
<b>Amplitud en Eje</b>	22.34 $m/s^2$	8.87 $m/s^2$	46.99 $m/s^2$
<b>Amplitud en Sillín</b>	33.67 $m/s^2$	10.5 $m/s^2$	7.5 $m/s^2$
<b>Transmisibilidad</b>	1.5	1.18	0.16

Tabla 5.6 Magnitudes del ensayo tija fibra de carbono a 5.55 m/s





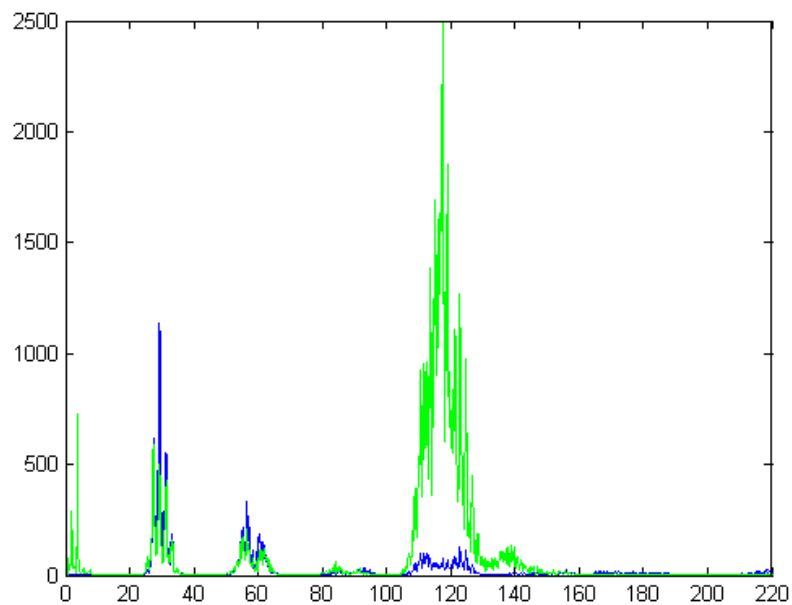
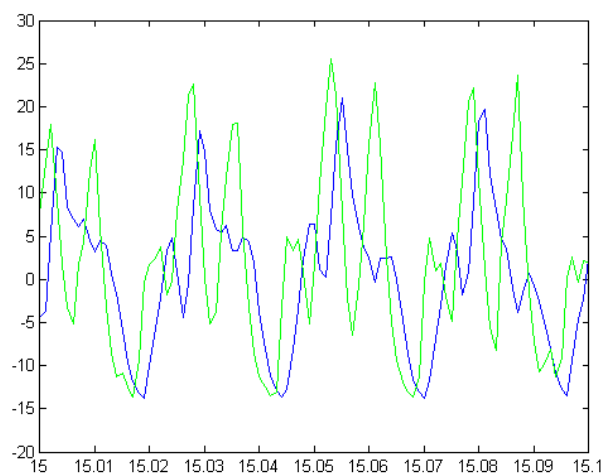


Figura 5.8 Gráficas del ensayo tija fibra de carbono a 5.55 m/s

VELOCIDAD 6.94 $m/s$	Magnitud X	Magnitud 2X	Magnitud 3X	Magnitud 4X
<b>Frec. de vibración</b>	36.25 Hz	72.5 Hz	108.75 Hz	144.5 Hz
<b>Amplitud en Eje</b>	47.18 $m/s^2$	17.53 $m/s^2$	12.61 $m/s^2$	23.22 $m/s^2$
<b>Amplitud en Sillín</b>	50.49 $m/s^2$	9.65 $m/s^2$	11.9 $m/s^2$	7.31 $m/s^2$
<b>Transmisibilidad</b>	0.95	0.55	0.92	0.31

Tabla 5.7 Magnitudes del ensayo tija fibra de carbono a 6.94 m/s



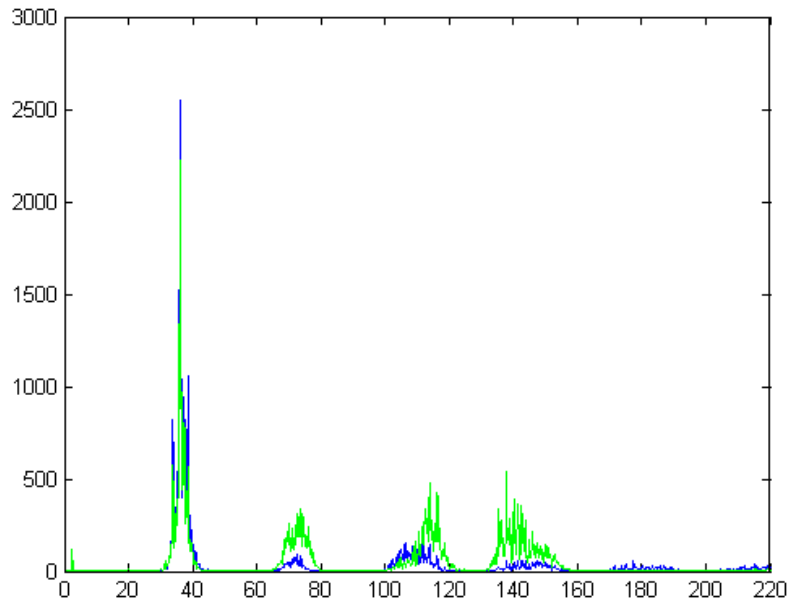
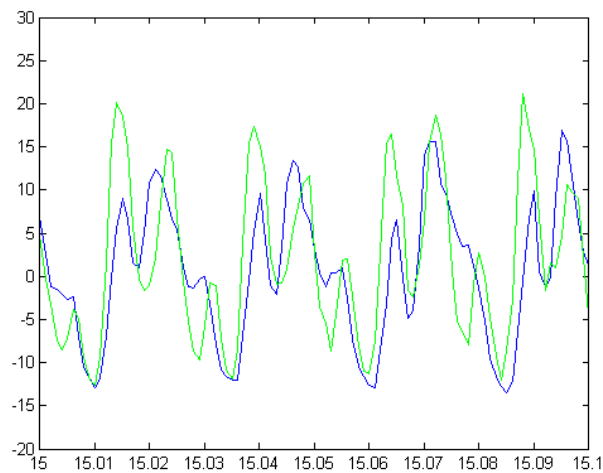


Figura 5.9 Gráficas del ensayo tija fibra de carbono a 6.94 m/s

VELOCIDAD 8.33 $m/s$	Magnitud X	Magnitud 2X	Magnitud 3X
<b>Frec. de vibración</b>	43.21 Hz	86.42 Hz	129.63 Hz
<b>Amplitud en Eje</b>	75.5 $m/s^2$	17.43 $m/s^2$	18.08 $m/s^2$
<b>Amplitud en Sillín</b>	94.81 $m/s^2$	10.59 $m/s^2$	16.43 $m/s^2$
<b>Transmisibilidad</b>	1.07	0.59	0.7

Tabla 5.8 Magnitudes del ensayo tija fibra de carbono a 8.33 m/s



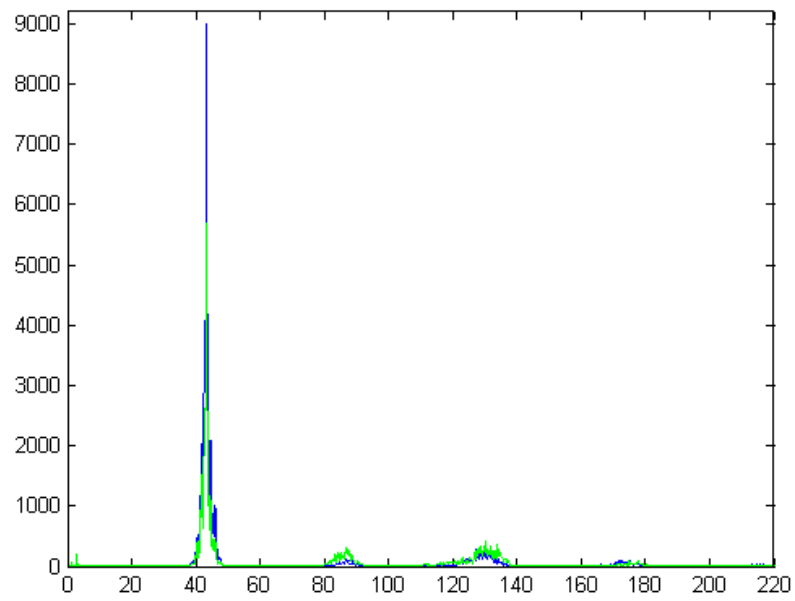


Figura 5.10 Gráficas del ensayo tija fibra de carbono a 8.33 m/s

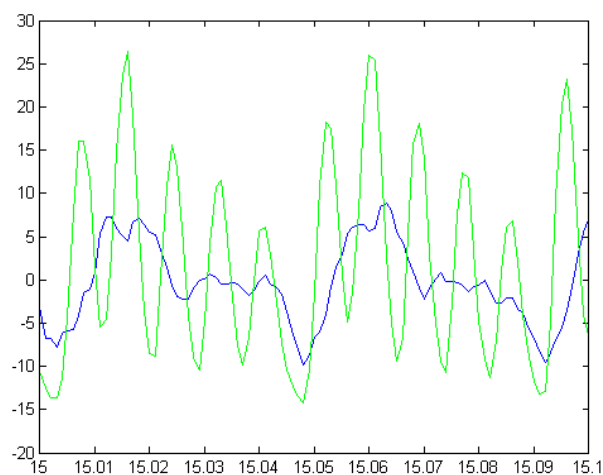
➤ Tija Racormance (Basalto):



Figura 5.11 Montaje en Tija de fibra de basalto

VELOCIDAD 4.167 $m/s$	Magnitud X	Magnitud 2X	Magnitud 5X
<b>Frec. de vibración</b>	24.17 Hz	48.72 Hz	121.61 Hz
<b>Amplitud en Eje</b>	32.89 $m/s^2$	12.94 $m/s^2$	27.69 $m/s^2$
<b>Amplitud en Sillín</b>	31.03 $m/s^2$	13.02 $m/s^2$	0 $m/s^2$
<b>Transmisibilidad</b>	0.94	1	0

Tabla 5.9 Magnitudes del ensayo tija fibra de basalto a 4.167 m/s



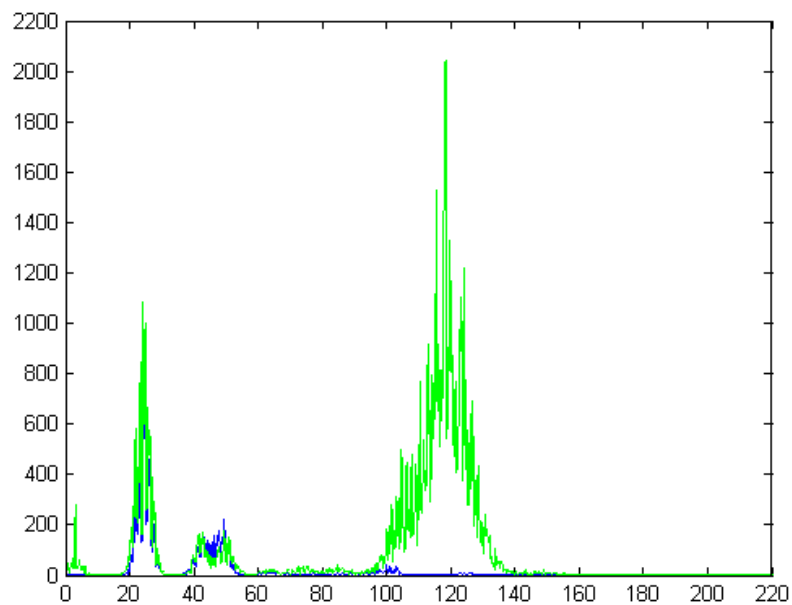
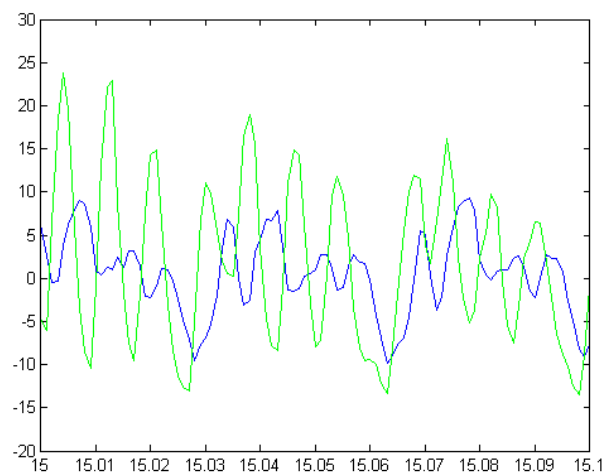


Figura 5.12 Gráficas del ensayo tija fibra de basalto a 4.167 m/s

VELOCIDAD 5.55 $m/s$	Magnitud X	Magnitud 2X	Magnitud 4X
<b>Frec. de vibración</b>	30 Hz	60 Hz	120 Hz
<b>Amplitud en Eje</b>	29.12 $m/s^2$	10.16 $m/s^2$	39.37 $m/s^2$
<b>Amplitud en Sillín</b>	32.84 $m/s^2$	5.58 $m/s^2$	7.9 $m/s^2$
<b>Transmisibilidad</b>	1.12	0.55	0.2

Tabla 5.10 Magnitudes del ensayo tija fibra de basalto a 5.55 m/s



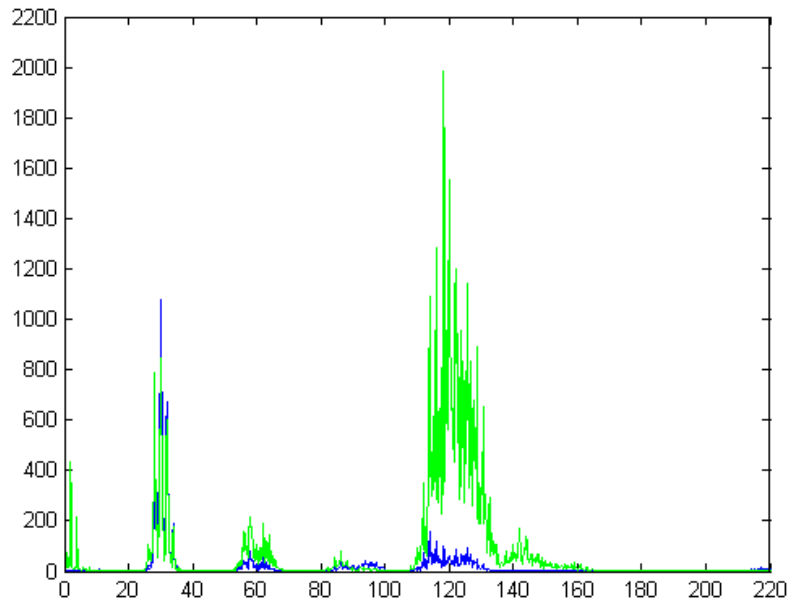
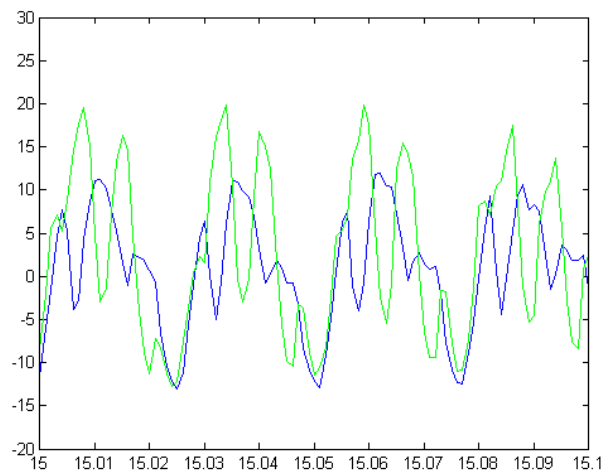


Figura 5.13 Gráficas del ensayo tija fibra de basalto a 5.55 m/s

VELOCIDAD 6.94 $m/s$	Magnitud X	Magnitud 2X	Magnitud 3X	Magnitud 4X
<b>Frec. de vibración</b>	36.38 Hz	72.76 Hz	109.14 Hz	145.5 Hz
<b>Amplitud en Eje</b>	49.68 $m/s^2$	19.9 $m/s^2$	16.9 $m/s^2$	16.7 $m/s^2$
<b>Amplitud en Sillín</b>	38.43 $m/s^2$	10.56 $m/s^2$	12.5 $m/s^2$	3.46 $m/s^2$
<b>Transmisibilidad</b>	0.77	0.53	0.74	0.2

Tabla 5.11 Magnitudes del ensayo tija fibra de basalto a 6.94 m/s



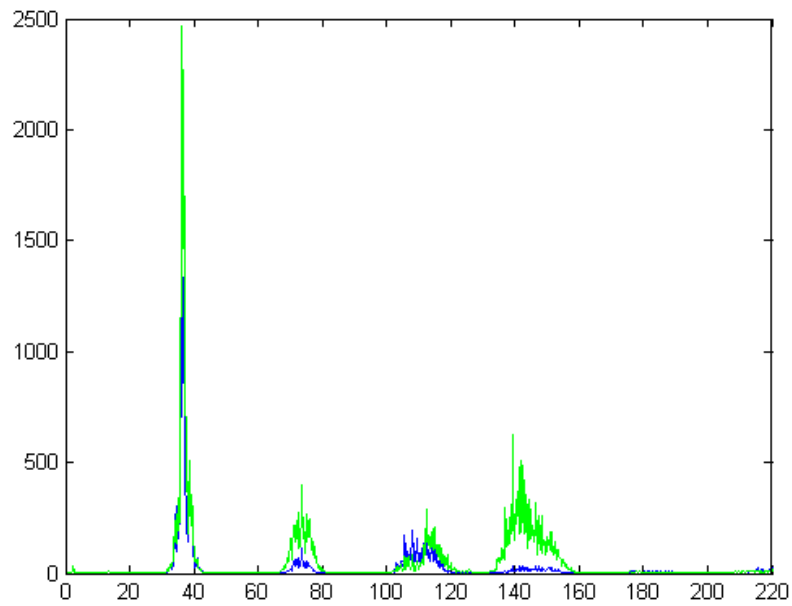
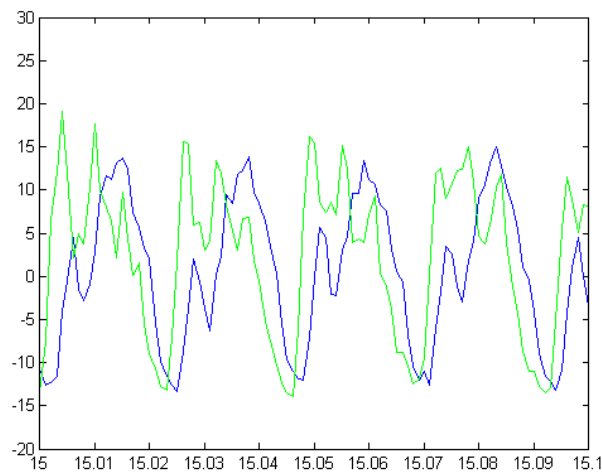


Figura 5.14 Gráficas del ensayo tija fibra de basalto a 6.94 m/s

<b>VELOCIDAD 8.33 m/s</b>	<b>Magnitud X</b>	<b>Magnitud 2X</b>	<b>Magnitud 3X</b>
<b>Frec. de vibración</b>	44.07 Hz	88.14 Hz	136.21 Hz
<b>Amplitud en Eje</b>	70.61 m/s <sup>2</sup>	19.98 m/s <sup>2</sup>	19.32 m/s <sup>2</sup>
<b>Amplitud en Sillín</b>	71.78 m/s <sup>2</sup>	11.87 m/s <sup>2</sup>	7 m/s <sup>2</sup>
<b>Transmisibilidad</b>	1.01	0.48	0.36

Tabla 5.12 Magnitudes del ensayo tija fibra de basalto a 8.33 m/s



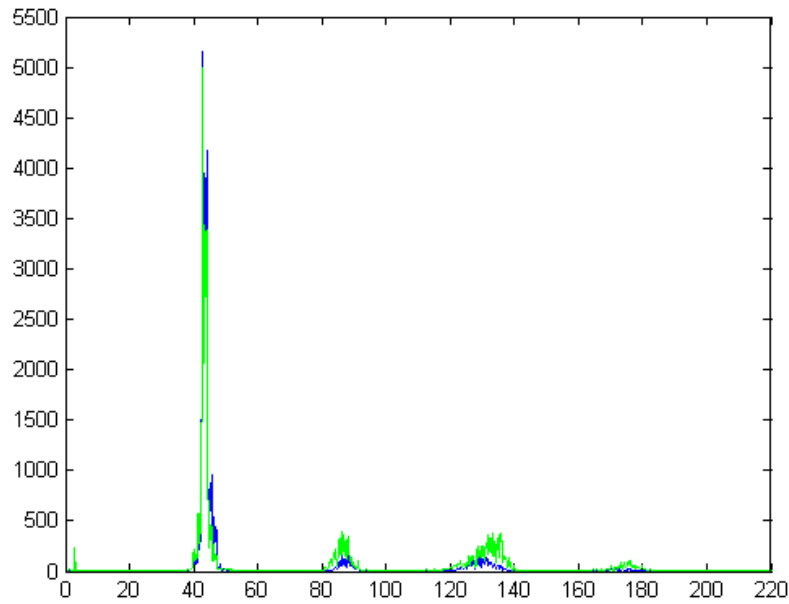


Figura 5.15 Gráficas del ensayo tija fibra de basalto a 8.33 m/s

### 5.3 Observaciones

En este apartado se detallarán las observaciones que se han visto en las gráficas del apartado 5.2.

#### 5.3.1 Señal de pedaleo.

En todas las gráficas PSD se pueden observar, si se realiza zoom en la zona proxima a 0, que aparece una frecuencia de pequeña amplitud y sus armónicos.

Estas frecuencias son las asociadas al pedaleo y se pueden obtener numericamente de la siguiente forma, partiendo de la frecuencia primera de la excitación:

$$F_{rodillo} * R_{rodillo} = F_{rueda} * R_{rueda} \quad (29)$$

Donde  $F_{rodillo}$  es la frecuencia primera de la excitación,  $R_{rodillo}$  es el radio del rodillo que es igual a 30 mm y  $R_{rueda}$  es el radio de la rueda que es 350 mm.

$$F_{cassette} = F_{rueda} \quad (30)$$

Sabiendo la frecuencia del cassette  $F_{cassette}$  se procede a calcular la frecuencia en el plato de la transmisión.

$$F_{cassette} * N_{cassette} = F_{plato} * N_{plato} \quad (31)$$

Donde  $N_{cassette}$  es el número de dientes del cassette que en este caso es 11 y  $N_{plato}$  es el número de dientes del plato que en el ensayo es 34.

Finalmente hay que multiplicar la frecuencia de giro que se tiene en el plato por dos porque en cada giro se ejercen dos pedaladas en el sentido del eje z.



### 5.3.2 Gráfico del tiempo frente a la amplitud.

En el ensayo de la tija de aluminio apenas existe desfase entre las señales de excitación y de respuesta, la explicación a este fenómeno la da la alta rigidez del aluminio que impide que haya retardo en la respuesta.

Se puede observar que, al contrario que en el ensayo de la tija de aluminio, en los ensayos de las tijas de material compuesto si se visualiza un pequeño retardo debido a la mayor flexibilidad de estos materiales.

En todos los ensayos se observa que la señal de la respuesta tiende a parecerse a la señal de excitación a medida que la velocidad del ensayo aumenta.

### 5.3.3 Tablas comparativas.

#### 5.3.3.1 Transmisibilidad a una frecuencia de 24.5 Hz.

Velocidad/Material	X	2X	5X
<b>Aluminio</b>	1.252	1.93	0
<b>F.Carbono</b>	1.007	1.72	0
<b>F.Basalto</b>	0.94	1	0

Tabla 5.13 Transmisibilidad velocidad-material a 23.5 Hz .

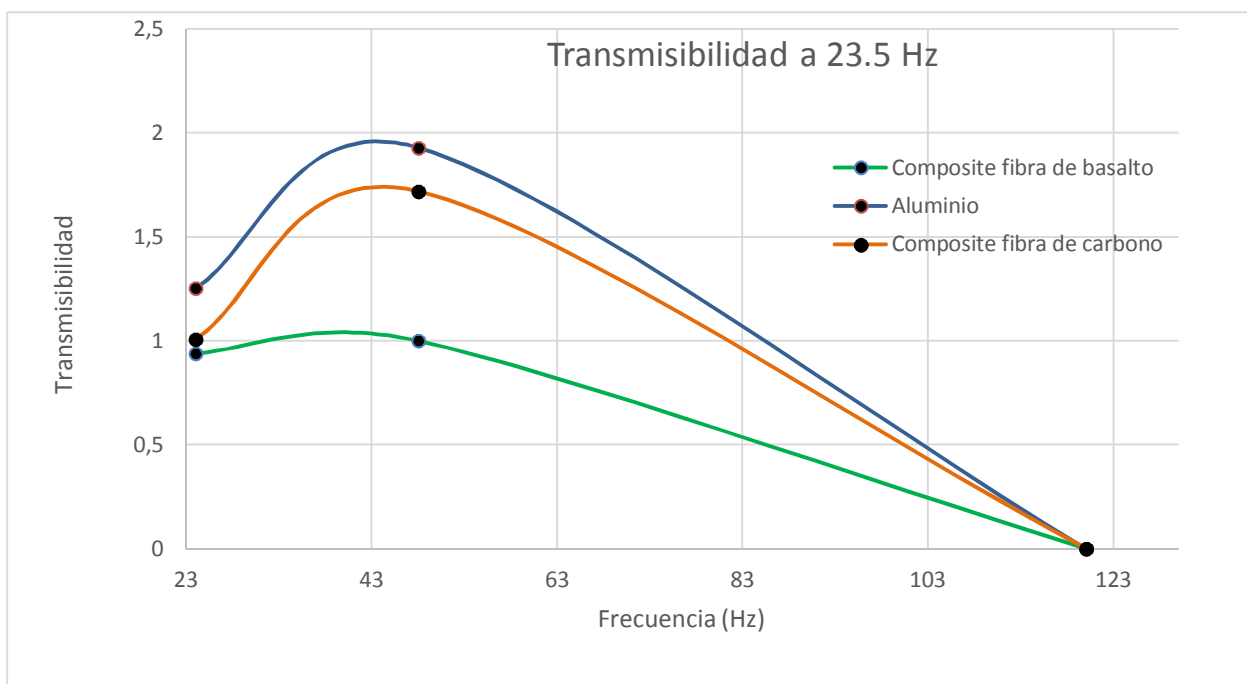


Figura 5.16 Gráfico comparativo a 24 Hz

5.3.3.2 Transmisibilidad a una frecuencia de 30 Hz.

Velocidad/Material	X	2X	4X
Aluminio	1.55	1.61	0
F.Carbono	1.5	1.18	0.19
F.Basalto	1.12	0.55	0.18

Tabla 5.14 Transmisibilidad velocidad-material a 30 Hz .

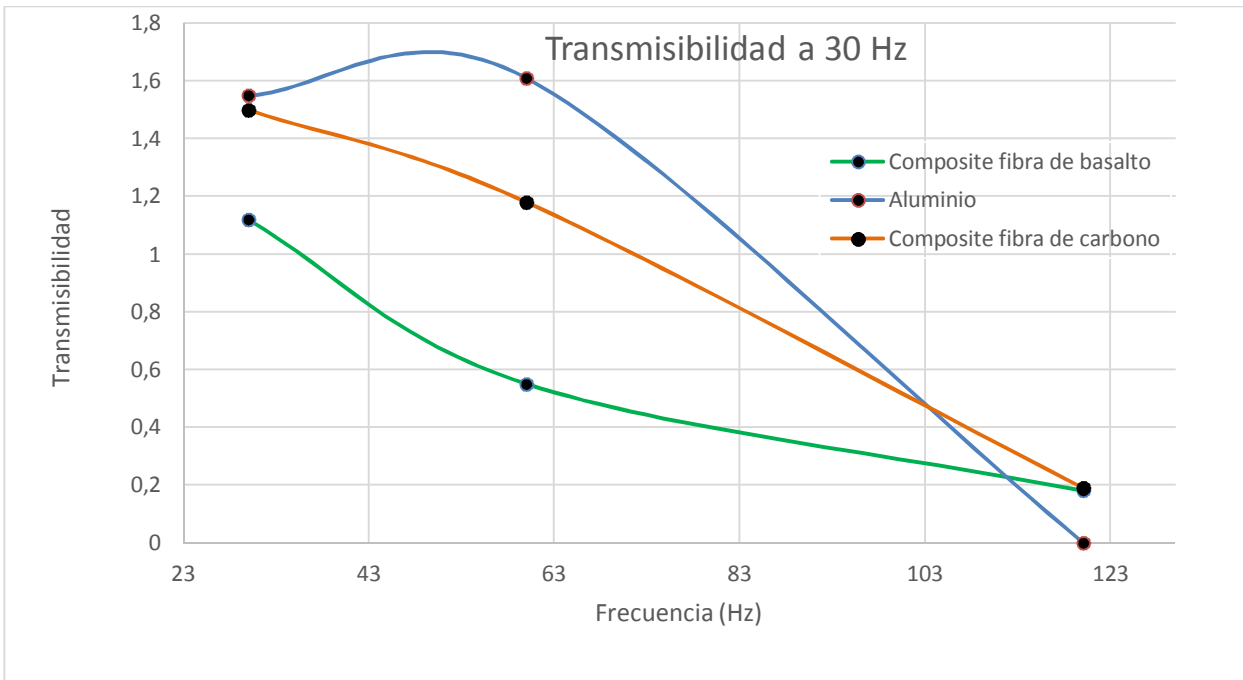


Figura 5.17 Gráfico comparativo a 24 Hz

5.3.3.3 Transmisibilidad a una frecuencia de 36.5 Hz.

Velocidad/Material	X	2X	3X	4X
Aluminio	1.07	0.84	0.94	0.35
F.Carbono	0.95	0.55	0.92	0.31
F.Basalto	0.77	0.53	0.74	0.2

Tabla 5.15 Transmisibilidad velocidad-material a 36.5 Hz .

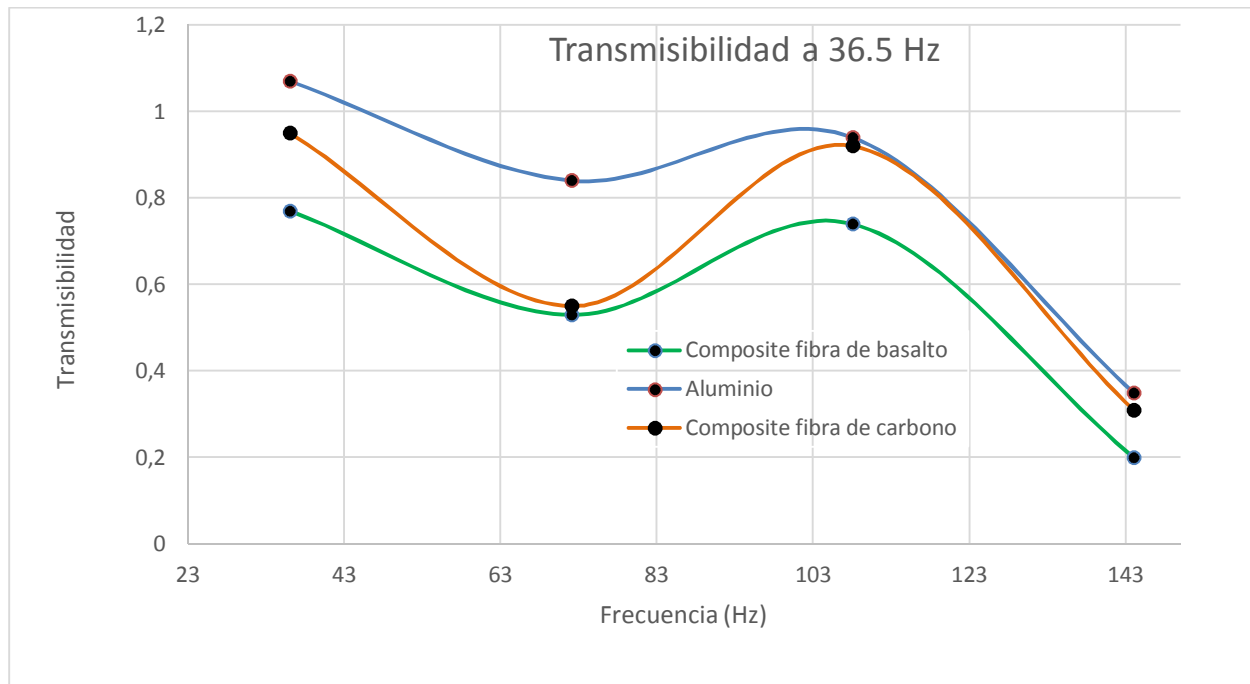


Figura 5.18 Gráfico comparativo a 36.5 Hz

## 5.3.3.4 Transmisibilidad a una frecuencia de 43 Hz.

Velocidad/Material	X	2X	3X
Aluminio	1.25	0.6	0.9
F.Carbono	1.07	0.59	0.7
F.Basalto	1.01	0.48	0.36

Tabla 5.16 Transmisibilidad velocidad-material a 43 Hz .

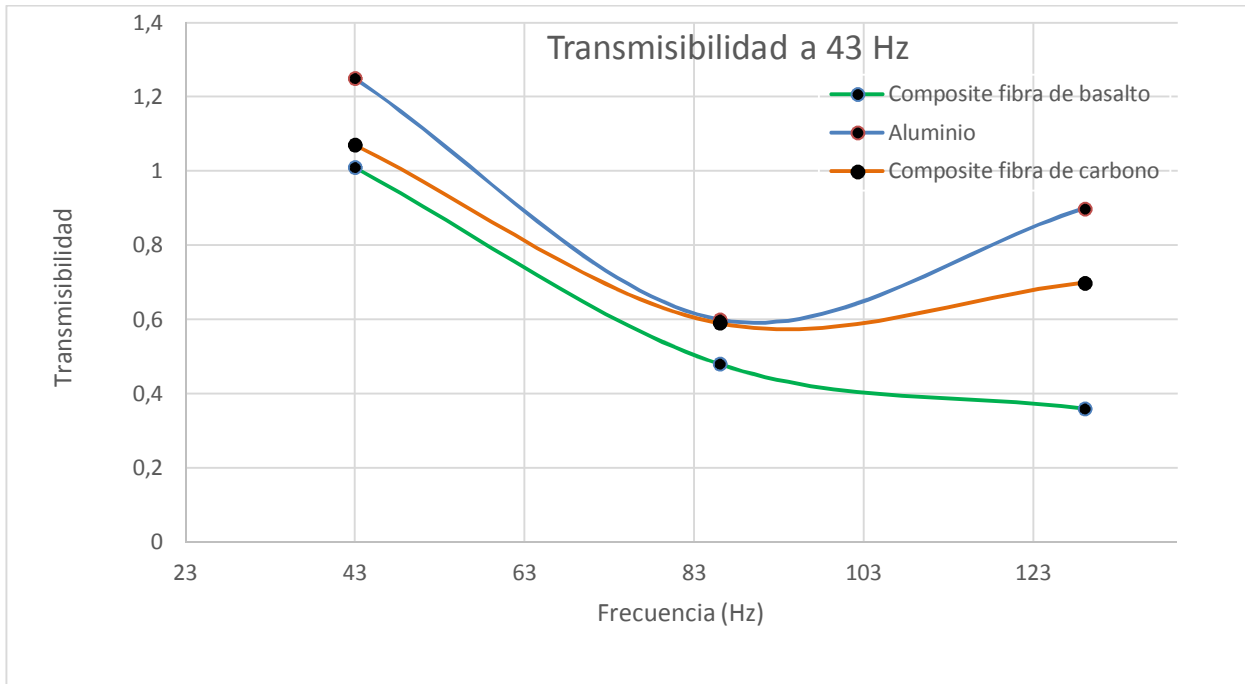


Figura 5.19 Gráfico comparativo a 43 Hz

## 6 CONCLUSIÓN

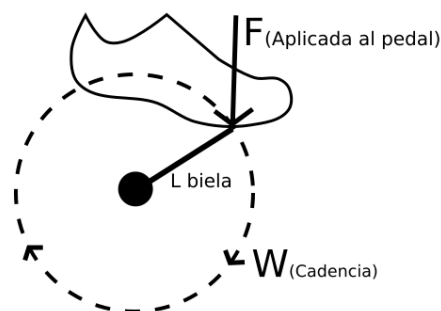
**A** continuación vamos a redactar las conclusiones a las que hemos llegado después de haber analizado los datos sacados del ensayo. Para ello compararemos los datos obtenidos en cada velocidad para cada material usando las tablas del apartado 5.2 correspondiente a las comparaciones.

### 6.1 Frecuencias en el ensayo

#### 6.1.1 Frecuencia de pedaleo

Como hemos observado en las frecuencias predominantes, estas son similares en todas las tijas ensayadas, ya que esta frecuencia depende de la velocidad de la rueda como comentamos en los paratados anteriores.

Cabe destacar que existe una frecuencia secundaria en todos los ensayos y es por lo siguiente:



Como se observa en el dibujo superior al pedalear ejercemos una fuerza hacia abajo en el eje z con la reacción opuesta por parte del par resistente. Esta fuerza de reacción actúa sobre todo el cuerpo en sentido contrario.

En todos los graficos de los ensayos se puede observar que existen dos picos positivos cada segundo con más amplitud que los demás valores extremos, esto resulta de que entra en juego estas fuerzas de oposición al pedaleo.

### **6.1.2 Frecuencia de resonancia**

En todos los ensayos realizados se observa que se produce resonancia a una frecuencia de 120 Hz, esto ocurre cuando un múltiplo de la frecuencia principal coincide con este valor.

Se puede observar que en el primer ensayo de cada tija el quinto múltiplo de la frecuencia de la perturbación coincide con 120 Hz.

De igual modo en el segundo ensayo de cada tija el cuarto múltiplo de la frecuencia de perturbación coincide con 120 Hz.

Para validar este fenómeno se toman los ensayos tercero y cuarto y se analizan, la frecuencia principal y sus múltiplos se alejan de 120 Hz por lo que no existe ninguna resonancia.

## **6.2 Comparación del comportamiento de las tijas**

En este apartado se puede observar que la disminución de las vibraciones en los materiales compuestos es mucho mayor que en el aluminio.

Comparando las transmisibilidades de todas las tijas se puede ver como claramente la tija fabricada con fibra de basalto atenúa en mayor medida las vibraciones producidas por la perturbación externa. Esto se puede observar en las tablas 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16.

Aunque en el campo de la reducción de vibraciones es claramente superior la tija fabricada usando fibra de basalto hay que destacar que es con la que mayor potencia de pedaleo se pierde, ya que en esta se produce un pandeo lateral mayor que en las demás.

Para medir con exactitud esta pérdida de potencia se necesitaría realizar un estudio de la potencia desarrollada por el ciclista en el mismo ensayo que se ha realizado en este proyecto.

## **6.3 Estudios futuros.**

Después de haberse realizado el test de comodidad, de las diferentes tijas usando para su fabricación diferentes materiales, se ha de proceder a estudiar que pérdida de potencia produce ese aumento de confort.

Otra vía de estudio, en la que se está trabajando actualmente, es la de diseñar y analizar una tija que sea cómoda en el plano de la bicicleta y rígida en la dirección perpendicular a ese plano, traduciendo en la disminución de pérdida de potencia.





## REFERENCIAS

---

- [1] Dietrich Braess, Finite Elements: Theory, fast solvers and applications in solid mechanics, Cambridge University Press. Dyn. 254-255 (1997)
- [2] Jongsung Sim, Cheolwoo Park, Do Young Moon, Composites Part B: Engineering. Dyn. 36,504–512 (2005)
- [3] Good Year Company, <https://corporate.goodyear.com/en-US/about/history/charles-goodyear-story.html>



---

# GLOSARIO

---

UNE: Una Norma Española

2



## ANEXO

### Código de programación MBED:

```

#include "mbed.h"
#include "USBHostMSD.h"
#include "Buffering.h"
#include <stdlib.h>

#define PASOSADC 4096
#define PasoTiempo 1000 // Periodo de adquisición en microsegundos
#define NDATOS_CALIB 500

// Declaración de funciones
void LeeAcelerometro();
void GuardaDatosBuffer();
void LeeAcelBias();

// Acelerómetros
DigitalOut enable1(p24);
DigitalOut enable2(p8);
AnalogIn x1(p15);
AnalogIn y1(p16);
AnalogIn z1(p17);
AnalogIn x2(p18);
AnalogIn y2(p19);
AnalogIn z2(p20);

/// PEN DRIVE ///
USBHostMSD *msc;

/// MEMORIA FLASH LOCAL DE LA MBED ///
//LocalFileSystem local("local"); // Create the local
filesystem under the name "local"

// Leds
DigitalOut led1(LED1);
DigitalOut led2(LED2);
DigitalOut led3(LED3);
DigitalOut led4(LED4);

// Botón
DigitalIn button(p26);
char buttonState; // 0: Suelto, 1: presionado

// Variables de control y otros
FILE *fp1;
FILE *fp2;
FILE *fpContadorViajes;
char adquiriendo;
int16_t envioUSB[3];
int contadorViajes;
char nombre1[64];
char nombre2[64];

```

```

char nViajes[11];

// Cálculo bias
int16_t bias1[3]; // Guarda el valor del bias del acelerómetro 1 de esta
ejecución
int16_t bias2[3]; // Guarda el valor del bias del acelerómetro 1 de esta
ejecución
int acellmean[3];
int acel2mean[3];
Ticker tickerLecturaBias;
int contador;
bool calculado;

// Buffers
Buffering *buff1_aX;
Buffering *buff1_aZ;
Buffering *buff1_aY;
Buffering *buff2_aX;
Buffering *buff2_aZ;
Buffering *buff2_aY;

// Funciones adquisición
Ticker tickerLectura;
void LeeAcelerometroBuffer();

int main() {
    // Inicialización de variables
    enable1 = 1;
    enable2 = 2;
    buttonState = 0;
    adquiriendo = 0;
    contador = 0;

    acellmean[0] = 0;
    acellmean[1] = 0;
    acellmean[2] = 0;

    acel2mean[0] = 0;
    acel2mean[1] = 0;
    acel2mean[2] = 0;

    // Espera para que no influya la pulsación del interruptor en el
    cálculo del bias
    wait_ms(600);

    // El led 4 indica que se está calibrando
    led4 = 1;
    // Se comienza a leer el acelerómetro
    tickerLecturaBias.attach_us(&LeeAcelBias, PasoTiempo);

    // Adquirir NDATOS_CALIB medidas, calcular su media y guardarla en el
    buffer pasado como argumento
    wait_ms(600);

    tickerLecturaBias.detach();

    // El bias de cada acelerómetros es la suma guardada en acelXmean
    dividida por número de datos sumados

```

```

bias1[0] = (int16_t) (acellmean[0]/NDATOS_CALIB);
bias1[1] = (int16_t) (acellmean[1]/NDATOS_CALIB);
bias1[2] = (int16_t) (acellmean[2]/NDATOS_CALIB);

bias2[0] = (int16_t) (acel2mean[0]/NDATOS_CALIB);
bias2[1] = (int16_t) (acel2mean[1]/NDATOS_CALIB);
bias2[2] = (int16_t) (acel2mean[2]/NDATOS_CALIB);

led4 = 0;

// Conexión con el USB
msc = new USBHostMSD("usb");

if(!msc->connected()){
    led1 = 1;
    while(!msc->connect()) {
    }
    led1 = 0;
}

// DEBUG
/*fp1 = fopen("/usb/calib.txt", "w");
fprintf(fp1,
"%d\n%d\n%d\n%d\n%d\n%d\n%d\n%d\n%d\n%d\n%d\n%d\n%d\n%d\n%d\n%d\n", contador,
bias1[0], bias1[1], bias1[2],
    bias2[0], bias2[1], bias2[2], acellmean[0], acellmean[1],
acellmean[2], acel2mean[0], acel2mean[1], acel2mean[2]);
fclose(fp1);*/
// FIN DEBUG

// Se crean los buffer donde se guardarán los datos
buff1_aX = new Buffering();
buff1_aY = new Buffering();
buff1_aZ = new Buffering();
buff2_aX = new Buffering();
buff2_aY = new Buffering();
buff2_aZ = new Buffering();

// Led 2 indica estado "listo para grabar el viaje"
led2 = 1;

// Se lee el número de viajes guardados en el USB
fpContadorViajes = fopen("/usb/numV.vme", "r");
if(fpContadorViajes != NULL){ // Si se ha podido abrir el archivo
    fscanf(fpContadorViajes, "%d", &contadorViajes);
    fclose(fpContadorViajes);
}else{ // Si el archivo no se ha podido abrir
    contadorViajes = 0;
}

// El funcionamiento es el siguiente:
// Cuando se pulsa el botón de la placa se inicia la adquisición,
hasta que vuelve a pulsarse el botón
// terminando esta. Si vuelve a pulsarse se inicia una nueva
adquisición. Los datos de cada sensor se guardan en
// archivos distintos.
while(1){

```

```

// Si se están adquiriendo datos se guardan los datos del buffer
en ficheros del USB
    if(adquiriendo){
        GuardaDatosBuffer();
    }
    if(buttonState == 1){
        if(button == 0){ // Botón pulsado (ha sido presionado y
soltado)
            buttonState = 0;
            if(adquiriendo == 0){
                adquiriendo = 1;

                /*** INICIO VIAJE ***/

                // Se comprueba si el USB está conectado
                if(!msc->connected()){
                    led2 = 0;
                    led1 = 1;
                    while(!msc->connect()) {
                    }
                    led1 = 0;
                    led2 = 1;
                }

                contadorViajes++;
                fpContadorViajes = fopen("/usb/numV.vme", "w");
                fprintf(fpContadorViajes, "%d", contadorViajes);
                fclose(fpContadorViajes);

                sprintf(nViajes, "%d", contadorViajes);

                strcpy(nombre1, "/usb/accel_1_ride_");
                strcat(nombre1, nViajes);
                strcat(nombre1, ".bin");

                strcpy(nombre2, "/usb/accel_2_ride_");
                strcat(nombre2, nViajes);
                strcat(nombre2, ".bin");

                // Se abren los ficheros dónde se escribirán los datos
en el USB en binario
                fp1 = fopen(nombre1, "w");
                fp2 = fopen(nombre2, "w");

                // Se escriben los datos de bias al inicio de los
ficheros de datos
                fwrite(bias1, sizeof(int16_t), 3, fp1);
                fwrite(bias2, sizeof(int16_t), 3, fp2);

                // Se comienza a leer el acelerómetro
                tickerLectura.attach_us(&LeeAcelerometro, PasoTiempo);

                led3 = 1;
                /********/
            }else{
                adquiriendo = 0;

```



```

        /*** FIN VIAJE ***/
        tickerLectura.detach();
        led3 = 0;
        fclose(fp1);
        fclose(fp2);
    }
}
}else{
    if(button == 1){
        buttonState = 1;
    }
}
}
}

void LeeAcelerometro(){

    buff1_aX->put((int16_t)(x1*PASOSADC));
    buff1_aY->put((int16_t)(y1*PASOSADC));
    buff1_aZ->put((int16_t)(z1*PASOSADC));

    buff2_aX->put((int16_t)(x2*PASOSADC));
    buff2_aY->put((int16_t)(y2*PASOSADC));
    buff2_aZ->put((int16_t)(z2*PASOSADC));
}

void LeeAcelBias(){
    if(contador < NDATOS_CALIB){
        acellmean[0] += x1*PASOSADC;
        acellmean[1] += y1*PASOSADC;
        acellmean[2] += z1*PASOSADC;

        acel2mean[0] += x2*PASOSADC;
        acel2mean[1] += y2*PASOSADC;
        acel2mean[2] += z2*PASOSADC;

        contador++;
    }
}

void GuardaDatosBuffer()
{
    bool empty = buff1_aX->isEmpty();

    //int dif;          //Diferencia entre writting index y riding index.
    El buffer se llena cuando esta diferencia alcanza el tamaño del buffer
    //float tiempo;    //Tiempo en segundos

    if(empty == false)
    {
        envioUSB[0] = buff1_aX->get();
        envioUSB[1] = buff1_aY->get();
        envioUSB[2] = buff1_aZ->get();
        //envioUSB[3] = (int16_t)buff1_aX->getDif(); // DEBUG

        // Se escriben los datos en el USB en BINARIO.
        fwrite(envioUSB, sizeof(int16_t), 3, fp1);

        envioUSB[0] = buff2_aX->get();

```

```

envioUSB[1] = buff2_aY->get();
envioUSB[2] = buff2_aZ->get();
//envioUSB[3] = (int16_t)buff1_aX->getDif(); // DEBUG

// Se escriben los datos en el USB en BINARIO.
fwrite(envioUSB, sizeof(int16_t), 3, fp2);
// DEBUG
//fprintf(fp2, "%d %d %d\n", envioUSB[0], envioUSB[1],
envioUSB[2]);
    }
}

```

### **Código de post-procesado MATLAB:**

```

clear;
close all;

nCol = 3;

% Se cargan y muestran los datos del archivo binario
%fileID = fopen('pruebaUSBdif3.txt');
fileID = fopen('acel_1_ride_6.bin');
biasX = fread(fileID, 1, 'int16');
biasY = fread(fileID, 1, 'int16');
biasZ = fread(fileID, 1, 'int16');
data = fread(fileID, 'int16');
fclose(fileID);

% Se dividen los datos en las 3 aceleraciones
contadorDatos = int32(length(data)/nCol);
axr = zeros(contadorDatos,1);
ayr = zeros(contadorDatos,1);
azr = zeros(contadorDatos,1);

Ts = 0.001; % periodo de adquisición
t = 0:Ts:double(contadorDatos)*Ts - Ts;

for k=1:nCol:contadorDatos*nCol
    axr(k/nCol + 1) = data(k);
    ayr(k/nCol + 1) = data(k+1);
    azr(k/nCol + 1) = data(k+2);
end

% Parámetros de calibración del sensor
% Offset (bias)

AX = biasX;
AY = biasY;
AZ = biasZ;

%AX = 2048;
%AY = 2048;
%AZ = 2048;

% Sensibilidad
KX = 0.01221;
KY = 0.01221;
KZ = 0.01221;

```

```

% Se reconstruyen los datos
ax = (-1.0)*(axr-AX)*KX;
ay = (-1.0)*(ayr-AY)*KY;
az = (-1.0)*(azr-AZ)*KZ;

%%
fileID1 = fopen('acel_2_ride_6.bin');
biasX1 = fread(fileID1, 1, 'int16');
biasY1 = fread(fileID1, 1, 'int16');
biasZ1 = fread(fileID1, 1, 'int16');
data1 = fread(fileID1, 'int16');
fclose(fileID1);

% Se dividen los datos en las 3 aceleraciones
contadorDatos = int32(length(data1)/nCol);
axr1 = zeros(contadorDatos,1);
ayr1 = zeros(contadorDatos,1);
azr1 = zeros(contadorDatos,1);

Ts = 0.001; % periodo de adquisición
t = 0:Ts:double(contadorDatos)*Ts - Ts;

for k=1:nCol:contadorDatos*nCol
    axr1(k/nCol + 1) = data1(k);
    ayr1(k/nCol + 1) = data1(k+1);
    azr1(k/nCol + 1) = data1(k+2);
end

% Parámetros de calibración del sensor
% Offset (bias)

AX1 = biasX1;
AY1 = biasY1;
AZ1 = biasZ1;

%AX = 2048;
%AY = 2048;
%AZ = 2048;

% Sensibilidad
KX = 0.01221;
KY = 0.01221;
KZ = 0.01221;

% Se reconstruyen los datos
ax1 = (-1.0)*(axr1-AX1)*KX;
ay1 = (-1.0)*(ayr1-AY1)*KY;
az1 = (-1.0)*(azr1-AZ1)*KZ;

%% Movimiento Sólido Rígido %%
w=-sqrt(((ay1-ay)*0.521)+((az1-az)*0.191))/0.555;
alpha=(((az-az1)*0.521)-((ay-ay1)*0.191))/0.555;
df=diff(alpha);
w1=(alpha*df')/abs(df');

```

```
[P F] = pwelch(az);
f = F*500/pi;
[P1 F1] = pwelch(az1);
f1 = F1*500/pi;

%%Figuras de medición de la comparación de la comodidad%%

figure(1)
plot(f,P,'b',f1,P1,'g');
axis([0 220 0 10000]);
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Amplitud')
title('Espectro de Frecuencias en eje Z')

figure(2)
plot(t,az,'b',t,az1,'g');
axis([15 15.1 -20 30]);
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud m/s^2')
title('Tiempo frente amplitud en eje Z')

%%Figuras del Movimiento de Sólido Rígido%%

figure(3)
plot(t,w1);
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud m/s^2')
title('Tiempo frente Velocidad Angular')

figure(4)
plot(t,alpha)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud m/s^2')
title('Tiempo frente Aceleración Angular')
```