

3.- DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA INERCIA DEL VOLANTE.

3.1.- INTRODUCCION

3.2.- DESCRIPCION DEL ENSAYO

3.3.- DESCRIPCION DEL MONTAJE

3.4.- SENSORES Y ADQUISICIÓN DE DATOS.

3.5.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.

3.1.- INTRODUCCION

Al contar con un volante como principal elemento resistivo para el banco de ensayos, se hace necesario conocer con precisión el valor inercial del mismo, pues junto a la relación global de transmisión empleada en el banco, nos determinan el nivel de carga al que se va a someter el motor.

Si el valor final de la inercia obtenida difiere del estimado, esto es, aquel definido por la ecuación 2.1, para los valores de los parámetros empleados, se tendrán unas condiciones de carga diferentes a las supuestas, variándose pues duración del ensayo.

De cualquier manera, siempre que la inercia se mantenga dentro de un rango del valor teórico obtenido puede considerarse como aceptable para el ensayo. Más que acercarnos con precisión a un valor concreto de la inercia, interesa conocer la inercia que nuestro volante tiene en particular, pues es de ésta la precisión de la que van a depender las posteriores lecturas de par y potencia que se obtengan en los ensayos, tal y como se aprecia en las ecuaciones siguientes:

$$Par = I_v \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.1)$$

$$W = Par \cdot \omega = I_v \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.2)$$

El valor del par o potencia se va a obtener a través de la medida de la aceleración, como se muestra en las ecuaciones 3.1 y 3.2. De esta forma, la inercia del volante hace de factor de escala. Un valor erróneo de la misma nos proporcionaría datos de par y potencia mal escalados en su evolución temporal.

3.2.- DESCRIPCION DEL ENSAYO: Cálculo mediante barra de torsión.

La medida de la inercia del volante puede realizarse con diferentes procedimientos. Uno de ellos podría ser, aplicar un par conocido al volante, y medir la tasa de variación de la velocidad del giro del mismo. El problema de este procedimiento radica en la dificultad para la aplicación práctica de un momento conocido y constante sobre el volante.

Como procedimiento alternativo para la medida de la inercia del volante, se va emplear la resistencia a la torsión que ofrece una barra esbelta de acero de dimensiones conocidas. Registrándose los datos del movimiento angular que tiene el sistema barra de torsión – volante de inercia al someterlo a un ángulo inicial, y calculando la frecuencia natural del mismo, podemos obtener el dato de inercia requerido I_v .

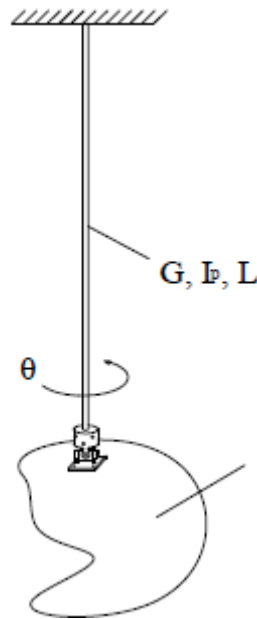


Fig. 3.1 – Esquema del modelo a emplear para el cálculo de la inercia del volante.

El sistema descrito de barra de torsión y sólido puede modelarse en primera aproximación mediante un sistema de un solo grado de libertad en el que la rigidez es la debida a la barra de torsión, y la inercia polar al volante de inercia. Se considerará despreciable la contribución a la inercia de la barra y elementos de sujeción auxiliares, por ser de menores ordenes de magnitud que el volante. La ecuación de movimiento del sistema sencillo descrito es la siguiente:

$$I_v \cdot \ddot{\theta} + \left(\frac{G \cdot I_p}{L} \right) \cdot \theta = 0 \quad (3.3)$$

Donde en la anterior ecuación, I_v es el momento de inercia másico del volante, G es el módulo de elasticidad transversal del material de la barra, I_p es el momento polar de la sección de la barra, y θ el ángulo girado por el volante en el plano horizontal consecuencia de la elasticidad a torsión de la barra. De la definición de frecuencia natural del sistema, podemos obtener el momento de inercia másico del volante según el mismo eje de la barra como:

$$I_v = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 \cdot \left(\frac{G \cdot I_p}{L}\right) \quad (3.4)$$

Donde T es el periodo de la oscilación no amortiguada del modelo utilizado de un grado de libertad.

El procedimiento trata por tanto de, partiendo de un ángulo inicial , dejar girar libremente el sistema, registrando en cada momento el ángulo girado por el volante. A la señal registrada podemos hacerle su transformada de Fourier con el procedimiento FFT (*Fast Fourier Transform*) para ver su contenido en frecuencia. La frecuencia a la que se tenga un pico claramente identificado se corresponderá con la frecuencia natural del sistema, y la que nos proporcionará el valor de la inercia.

Para poder emplear las ecuaciones 3.3 y 3.4 antes vistas, necesitamos conocer los parámetros que nos definen la rigidez de la barra. Estos pueden calcularse teóricamente, pues se conoce el material de la barra y su geometría. De cualquier forma, dada la incertidumbre de la inercia de algunos elementos de sujeción, es conveniente realizar también una medida experimental de la rigidez de la barra empleando una inercia de valor conocido. De esta forma también podemos comprobar la validez de la metodología a emplear.

3.3.- DESCRIPCION DEL MONTAJE.

Para poder realizar los ensayos, se ha contado con el laboratorio de estructuras de la Escuela Superior de Ingenieros. Este cuenta con un sótano al que se puede accederse a través de unos orificios practicados en su forjado, lo que permite anclar diversos elementos estructurales sobre el mismo.

Para realizar el empotramiento de la barra y hacer que el giro de ésta se deba únicamente a la torsión de su sección, se ha soldado la misma a una placa de acero. Esta placa, junto a otra situada al otro lado del forjado, permiten fijar la barra perpendicularmente al forjado, a la vez que impiden el giro de su extremo superior.

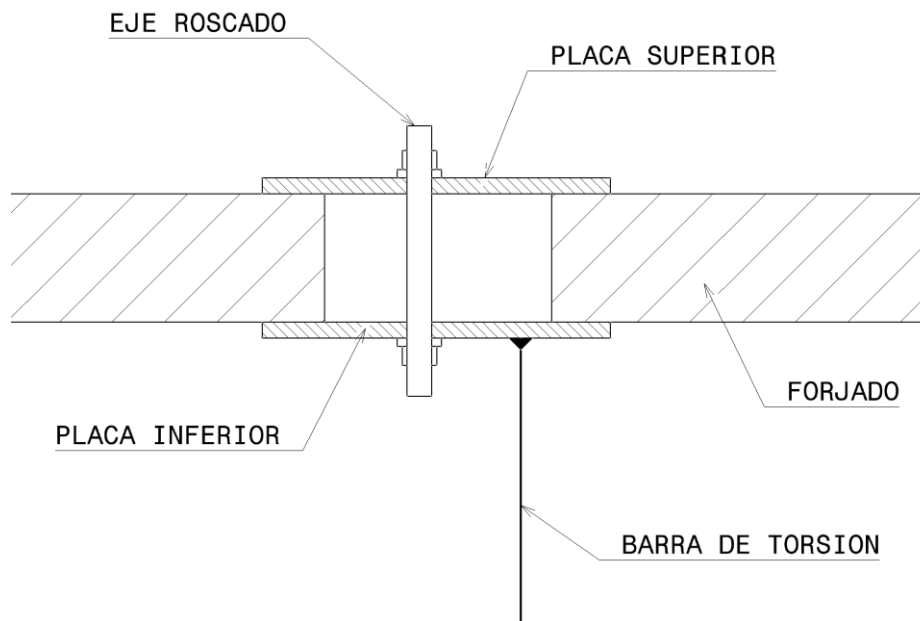


Fig. 3.2 – Esquema del anclaje de la barra de torsión.

La sujeción del sólido en el otro extremo de la barra se realiza a través de una junta cardan y una pieza intermedia que hace de adaptador entre el cardan y el volante (ver figura 3.4). La función del cardan es la de permitir el giro libre del sólido ensayado en dos direcciones perpendiculares al eje de la barra (ángulos α y β en la figura 3.3). Con esto se consigue que el momento producido por desalineamientos del centro de gravedad del sólido respecto de la vertical de la barra no produzca deformaciones a flexión de la barra de torsión, y por lo tanto, intenta evitar excitar otros modos de vibración diferente al propio de torsión de la pieza.

La gran esbeltez de la barra hace que permitan desplazamientos en el plano horizontal con suma facilidad. Esto puede contribuir a crear un movimiento más complejo del elemento a ensayar, lo que puede dificultar de alguna forma la obtención de resultados satisfactorios.

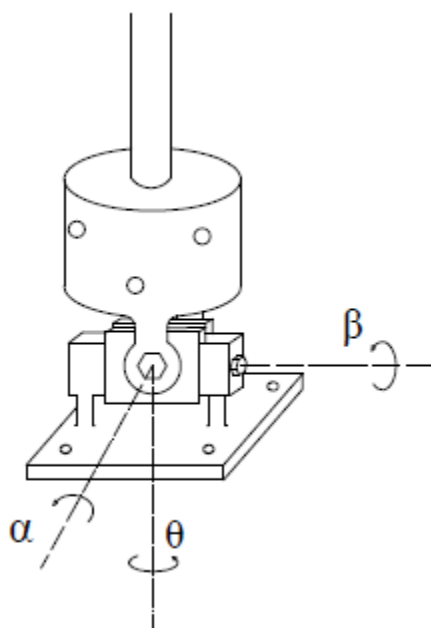
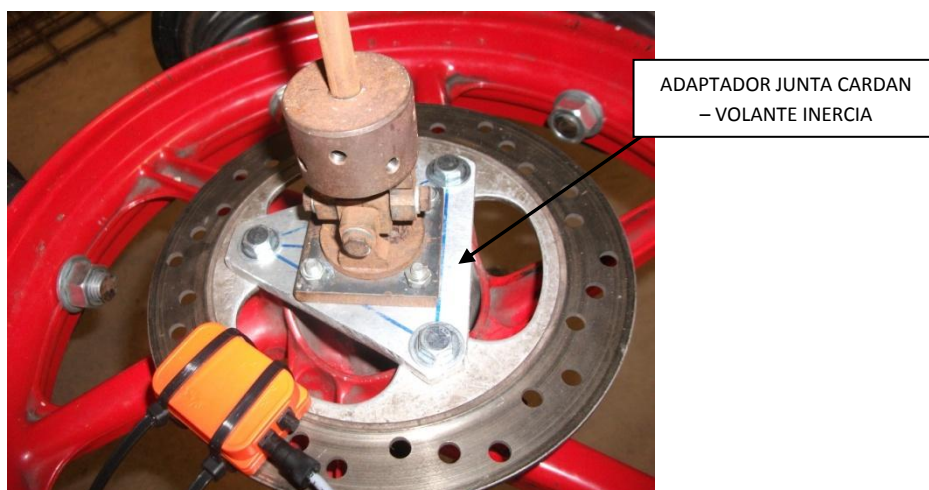


Fig. 3.3 – Esquema de los ángulos de giros permitidos por la Junta Cardan



3.4 – Detalle de la unión entre la junta cardan y el volante de inercia

3.4.- SENSORES Y ADQUISICIÓN DE DATOS.

Se hace necesaria por lo tanto la monitorización del ángulo girado por el sólido con el tiempo, a la vez que poder registrarlos para realizar el postprocesado de los mismos.

Para realizar lo anterior se va a emplear un sensor MTi del fabricante XSENS. Este pequeño sensor inercial permite la medida de los ángulos de giro a través de tres direcciones perpendiculares. Incorpora acelerómetros, y giróscopos, por lo que es capaz de medir aceleraciones lineales o velocidades de giro en las 3 direcciones teniendo gran aplicabilidad en robótica, biomecánica, guiado de vehículos, etc.

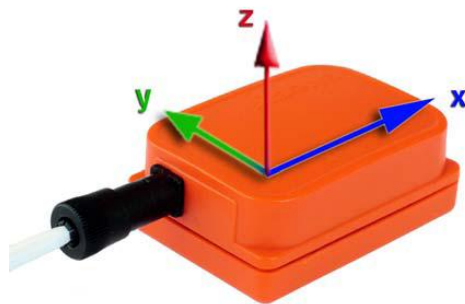


Fig. 3.4 – Sensor MTi con su sistema de referencia local superpuesto.

Para nuestro caso en particular solo se requiere la medida del ángulo girado en una de las direcciones, esto es, la dirección longitudinal de la barra, aunque la medida del giro en las otras dos direcciones perpendiculares nos puede dar una idea de la precisión con la que se ha realizado el ensayo. Se ha de intentar minimizar el giro del volante en direcciones transversales pues de esta forma no se estaría perturbando el grado de libertad de la barra de torsión que se desea.

La conexión del sensor se realiza como se muestra en la figura 3.5, donde se observa la posibilidad de conexionado de varios sensores MTi para aquellas aplicaciones que lo requieran.

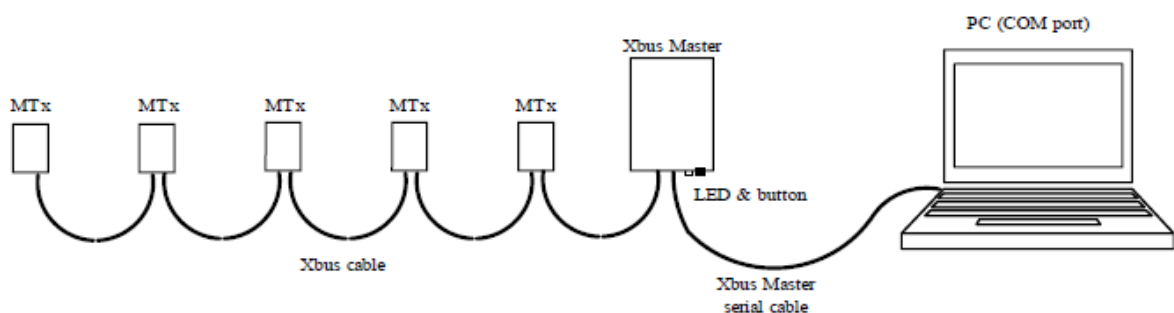


Fig. 3.5 – Esquema de montaje de los sensores.

El receptor Xbus gestiona el conexionado de los diferentes sensores, y es el encargado de enviar las señales al PC. Esta conexión puede realizarse mediante cableado, o a través de un dispositivo *bluetooth* para posibles aplicaciones móviles.

El programa receptor de información en el ordenador genera dos archivos *.log* con la siguiente información captada por los sensores a una frecuencia de 100 hz

i. El archivo de ángulos ofrece en tres, cuatro o nueve columnas los datos referentes a la posición angular del sensor respecto del sistema global de coordenadas, acompañadas de una columna que recoge el vector de tiempo. El número de columnas en que se describe la posición angular depende del modo de salida elegido. Así, si se elige la opción de ángulos alrededor de los ejes X, Y y Z (vuelco, cabeceo y guiñada), la salida constará de tres columnas (en grados sexagesimales), si se opta por la salida de cuaterniones (parámetros de Euler), la información se dará en cuatro columnas, y si se marca la opción de matriz de rotación, la primera columna del archivo se compondrá del vector de tiempo mientras que las otras nueve contendrán la información de la matriz de rotación en cada instante de tiempo. Cabe destacar que la primera opción de las anteriores puede conducir a una singularidad en el cambio de coordenadas si se alcanzan determinados valores en las coordenadas angulares.

En nuestro caso, como solo vamos a medir pequeñas variaciones de uno de los ángulos, emplearemos la primera de las representaciones.

ii. Existe un segundo archivo que contiene información de calibración que puede ser útil, combinada con la del archivo de ángulos. El archivo de calibración ofrece información sobre aceleración, velocidad angular y el campo magnético terrestre en coordenadas locales. Esta información puede servir para ubicar con precisión la orientación del sensor sobre el sólido además de ser una fuente adicional de información.

3.5.- RESULTADOS EXPERIMENTALES.

3.5.1- Calibración de la rigidez de la barra.

Se presentan ahora los resultados llevados a cabo para la calibración de rigidez de la barra de torsión.

Cálculo teórico.

Con las propiedades del acero de la barra, la rigidez a torsión podemos calcularla como:

$$\left(\frac{G \cdot I_p}{L}\right) = \frac{72 \cdot 10^6 \left(\frac{N}{m^2}\right) \cdot 9.8175 \cdot 10^{-10} (m^4)}{1.99(m)} = 35,53 \frac{Nm}{rad} \quad (3.5)$$

Cálculo experimental.

Para calcular experimentalmente el valor anterior, se hará uso de la ecuación 3.4, pero en este caso empleando una inercia de valor conocido. Realizando el mismo procedimiento para obtener la frecuencia natural de oscilación del sistema, podemos despejar de la ecuación el término $\left(\frac{G \cdot I_p}{L}\right)$.

Se ha tomado como elemento para proporcionar inercia una barra de acero situada perpendicularmente a la dirección de la barra de torsión. La expresión de su inercia puede ponerse como:

$$I_M = \frac{1}{12} m_{barra} [3R^2 + L^2] = \frac{1}{12} \cdot 22,31 \left[3 \left(\frac{1}{2} 60 \cdot 10^{-3} \right)^2 + 1 \right] = 1,8906 \text{ Kg}m^2 \quad (3.6)$$

La representación de la variación angular con el tiempo tiene la imagen que se muestra:

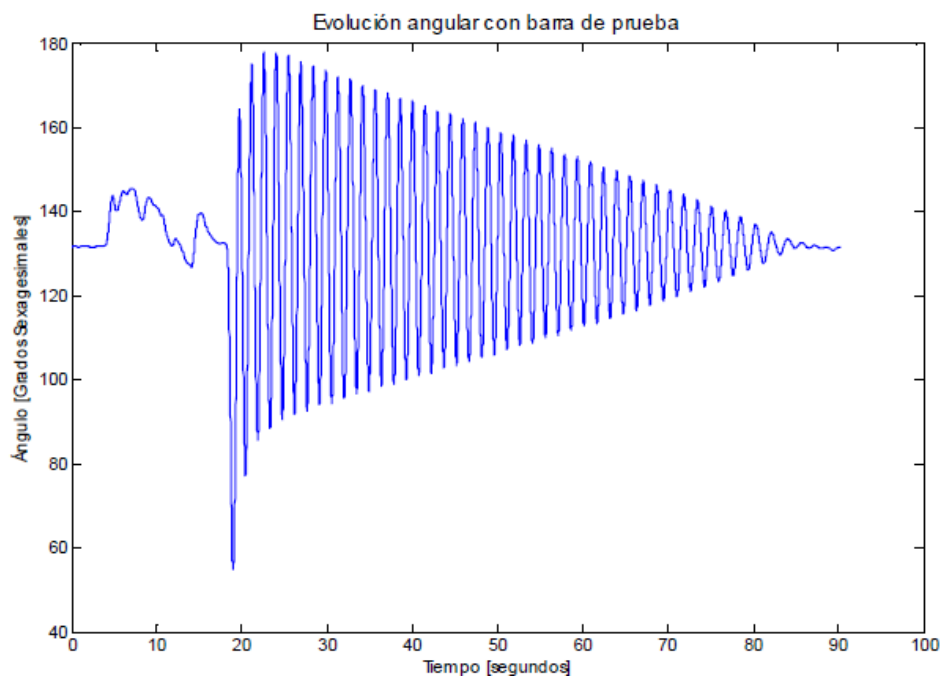


Fig. 3.6 – Evolución del ángulo girado con el tiempo para la medida experimental de la rigidez a torsión.

Puede apreciarse una primera zona irregular en la que se le otorga al elemento cierto ángulo inicial. A partir de aquí, se deja girar libremente, y se aprecia claramente el movimiento armónico amortiguado. Para identificar de una forma cómoda la frecuencia natural de oscilación, se ha realizado la FFT de la señal anterior.

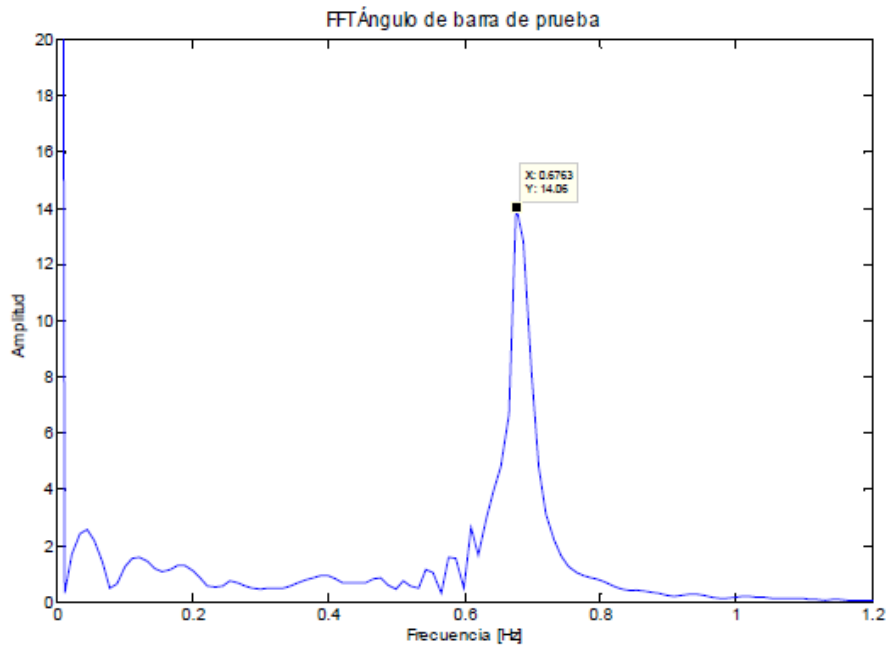


Fig. 3.7 – Transformada FFT de la evolución del ángulo girado con el tiempo.

La frecuencia natural resulta ser de $f_n = 0,6782 \text{ Hz}$. De esta forma, obtenemos una rigidez a torsión de la barra:

$$\left(\frac{G \cdot I_p}{L}\right) = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_n^2 \cdot I_M = 34,33 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$$

Se aprecia como la diferencia entre los valores teóricos y experimentales no difieren en gran medida. Se tomará el valor obtenido experimentalmente por tener mejor en cuenta las condiciones reales de cogida.

3.5.2- Cálculo de la inercia del volante.

Una vez se tiene el dato de la rigidez a torsión de la barra, se puede proceder con la medida de la inercia del volante. La Fig.3.8 muestra el conjunto preparado para el ensayo.

Es importante que el montaje del volante se realice con todos sus elementos en su posición final, de forma que la inercia del conjunto se vea lo menos alterada posible hasta que se realice el ensayo final. Cualquier modificación en la posición de los elementos va a repercutir en la inercia final, y por tanto en la precisión de la medida de la potencia, objetivo final.



Fig. 3.8 – Ensamblaje final del volante para la medida de la Inercia.

Se han realizado cuatro mediciones para poder comparar los resultados obtenidos. A continuación se muestran los resultados de la variación angular de la posición del volante, y de nuevo la transformada de esta señal, que nos va a permitir la medida de la frecuencia natural el sistema.

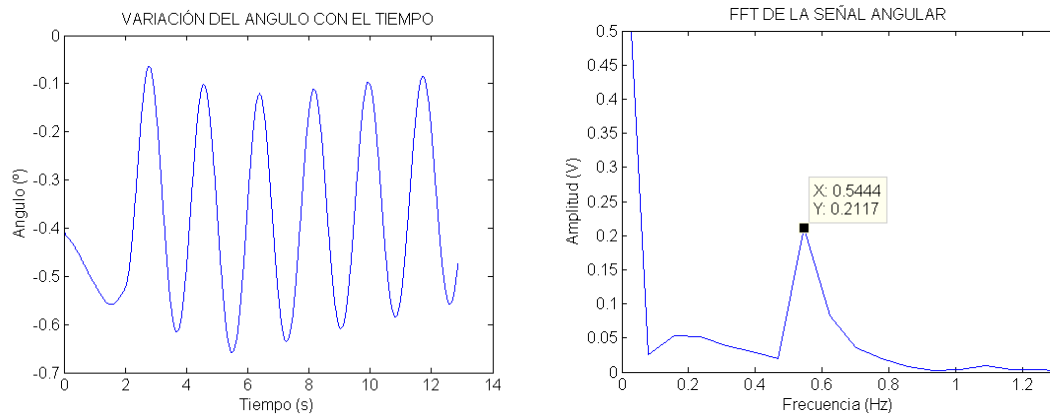


Fig.- 3.9 - ENSAYO 1 - Variación angular de la posición del volante y FFT de la señal.

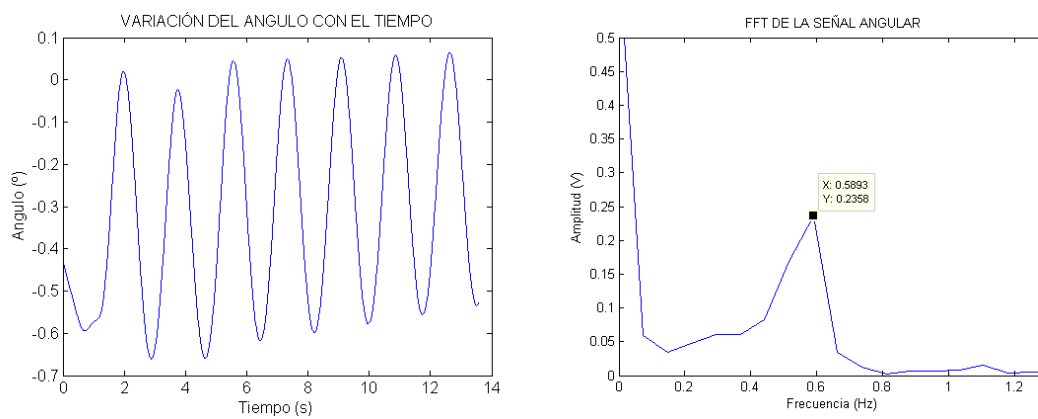


Fig.- 3.10 - ENSAYO 2 - Variación angular de la posición del volante y FFT de la señal.

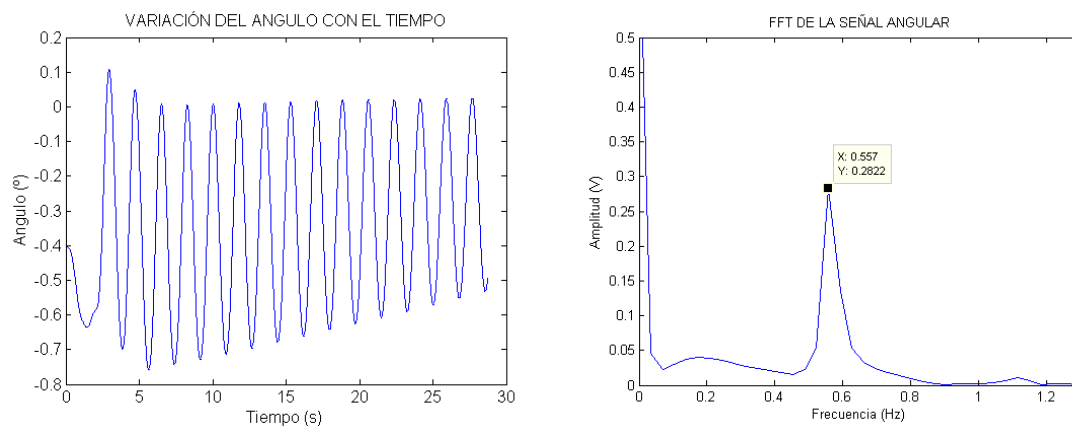


Fig.- 3.11 - ENSAYO 3 - Variación angular de la posición del volante y FFT de la señal.

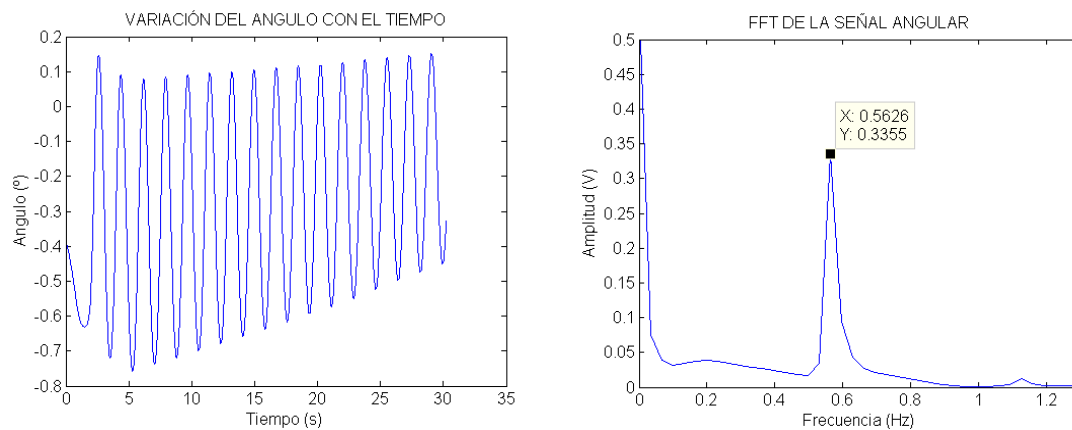


Fig.- 3.12 - ENSAYO 4 - Variación angular de la posición del volante y FFT de la señal.

El valor no nulo de la amplitud para una frecuencia de valor cero se debe al valor medio de la señal, que toma como referencia el norte magnético terrestre. Si se elimina el valor medio de la señal, se elimina este efecto.

ENSAYO	FRECUENCIA NATURAL OBTENIDA	INERCIA RESULTANTE (Kgm ²)
1	0,544	2,938
2	0,589	2,504
3	0,557	2,803
4	0,563	2,747
MEDIA PONDERADA:		2,739

De la media de los ensayos se muestra que la inercia resultante del conjunto resulta ser de 2,74 Kgm².

Se comprueba por tanto que, aun habiéndose empleado un menor número de masas puntuales, con relación a las estimadas por la ecuación 2.1, y para los valores de R_m , R_v y r_r ya fijados, la inercia aportada por el resto de elementos constituyentes del volante ha sido lo suficientemente significativa como para no alejarnos del valor inercial objetivo de $I_v=3,16$ Kgm². La variabilidad obtenida en los diferentes ensayos es lo suficientemente estrecha como para aceptar como valor final de la inercia del conjunto el valor medio de los diferentes ensayos.

Se podría ahora proceder de forma inversa para estimar, una vez conocido el valor real del conjunto volante, a qué valor de R_m se correspondería a través de la ecuación 2.1, y por lo tanto poder estimar de nuevo valor de la duración del ensayo más acorde a la inercia real. Sin embargo, es de prever, dada la variabilidad de los factores que intervienen, que el tiempo resultante carece de ningún valor, pues es suficiente con conocer un rango estimado de tiempo de funcionamiento.