



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Análisis vibratorio debido al
desequilibrio de una lavadora
doméstica**

Autor:

Arranz Gutiérrez, Alejandro

Tutor:

Mansilla Gallo, Alberto

**Dpto. Ciencia de los Materiales e
Ingeniería Metalúrgica, Expresión
Gráfica en la Ingeniería, Ingeniería
Cartográfica, Geodésica y
Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e
Ingeniería de los Procesos de
Fabricación**

Valladolid, Septiembre 2017.

A E.A. por el genio y la figura,
a R.M^a. por la norma y el ejemplo
y a todos los que me enseñaron el camino correcto.

Ostinato rigore.

Leonardo da Vinci

RESUMEN

En este Trabajo Fin de Grado se describen las tareas llevadas a cabo para realizar un estudio sobre la suspensión de una lavadora doméstica de carga frontal.

Para ello se ha construido un banco de análisis de vibraciones de la que se detallan sus componentes, instalación y verificación, así como el software elaborado para la adquisición de datos de los transductores; acelerómetros piezoeléctricos (uno por cada eje del plano de carga) y un fotoeléctrico retrorreflectivo para la velocidad de giro.

Una vez caracterizado el sistema, se muestran las gráficas de la respuesta del sistema en desplazamientos producido por el desequilibrio rotante para conocer el comportamiento de la suspensión bajo diferentes situaciones de carga.

Suspensión lavadora, vibraciones, desequilibrio rotante, adquisición de datos, FFT.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS | 11 |
| 2. TEORÍA | 13 |
| 2.1 Ecuaciones rectoras del movimiento (Universidad de Valladolid, 2015-2016) | 13 |
| 2.2 Desequilibrio rotante (William T.Thomson , 1988) | 15 |
| 3. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA | 17 |
| 3.1. Componentes..... | 17 |
| 3.2 Programa..... | 18 |
| 3.2.1 Diagrama de bloques..... | 18 |
| 3.3 Verificación cadena de medida | 22 |
| 3.3.1 Acelerómetros | 22 |
| 3.3.2 Fotoeléctrico | 24 |
| 3.4. Mediciones..... | 24 |
| 3.4.1 Constante de rigidez | 24 |
| 3.4.2 Pesajes..... | 26 |
| 3.4.3 Constante de amortiguamiento | 27 |
| 4. ENSAYOS | 29 |
| 4.1 Procesamiento de datos | 29 |
| 4.2 Ensayos estudio suspensión | 29 |
| 4.3 Ensayos prácticas de laboratorio | 31 |
| 5. CONCLUSIONES | 33 |
| 5.1 Futura línea de trabajo..... | 34 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 35 |

ANEXOS

1. Hoja de datos acelerómetro
2. Hoja de datos fotoeléctrico

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La idea de este Trabajo Fin de Grado la propone Don Alberto Mansilla Gallo, profesor del departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Expresión Gráfica en la Ingeniería, Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e Ingeniería de los Procesos de Fabricación. Para la elaboración de este trabajo se adquieren dos lavadoras domésticas idénticas de carga frontal que se alojan en el laboratorio de acústica y vibraciones de la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid. Se elige una lavadora por ser un objeto común de elevado interés práctico y una fuente ilustrativa de las vibraciones provocadas por el desequilibrio rotante. Estas lavadoras se caracterizarán como sistemas masa-muelle-amortiguador de dos grados de libertad.

Los transductores utilizados en cada lavadora son dos acelerómetros y un fotoeléctrico. El programa realizado con LabView procesa las señales para mostrar la gráfica aceleración-tiempo de ambos acelerómetros y la FFT de los mismos, así como la velocidad de giro del rotor a partir del fotoeléctrico. Con estos datos se elabora la gráfica de transmisibilidad en desplazamientos, que servirá para analizar el comportamiento de la suspensión de la lavadora. Los ensayos se realizan variando la carga de la lavadora o introduciendo desequilibrios conocidos. Así pues se establecen los siguientes objetivos:

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es la elaboración de un banco de análisis de vibraciones que se utilice en el laboratorio de acústica y vibraciones para las prácticas de la asignatura mecánica para máquinas y mecanismos. Para ello se construirá una cadena de medida incluyendo hardware y software y se realizará su posterior verificación. La



Imagen 1. Banco de análisis de vibraciones

finalidad académica del banco de análisis hace que sea de vital importancia el carácter ilustrativo, realizando su montaje de forma que se pueda apreciar la disposición de los componentes y elaborando un software intuitivo y gráfico donde los alumnos puedan experimentar la teoría aprendida. Se elabora también un guión de prácticas explicando el manejo del software.

En segundo lugar se realizan varios ensayos para obtener la transmisibilidad en desplazamientos producido por el desequilibrio rotante. Los diferentes ensayos llevados a cabo nos permitirán hacer un estudio del diseño de la suspensión de la lavadora.

2. TEORÍA

2.1 Ecuaciones rectoras del movimiento (Universidad de Valladolid, 2015-2016)

El objeto de estudio de este proyecto es una lavadora doméstica. La parte que atañe a nuestro estudio dinámico es la que forman los muelles, los amortiguadores y la masa suspendida. El resto de componentes: toma de agua, desagües, electrónica... no se tendrán en cuenta.

Como se puede observar en la imagen 2 el tambor está sustentado por dos muelles y dos amortiguadores (dos muelles en la parte superior y dos amortiguadores en la parte inferior), todos ellos con una cierta inclinación. Esta inclinación aporta diferentes valores de rigidez y amortiguamiento para los ejes de movimiento, horizontal y vertical (en adelante x e y respectivamente), variables que caracterizan nuestro sistema de dos grados de libertad. A continuación se procede a explicar las ecuaciones para un sistema de un grado de libertad. Se aplicarán por separado en cada libertad del sistema. Esto es posible debido a que se trata de un sistema de vibración lineal y el principio de superposición es válido. (Inman, 1996)

La lavadora es pues un sistema con amortiguamiento viscoso que sufre una excitación armónica. La ecuación en notación senoidal que rige este fenómeno es:

$$(1) \quad m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos \Omega t$$

Se trata de una ecuación diferencial de segundo orden, con solución:

$$(2) \quad x_t(t) = Ae^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) + A_0 \cos(\Omega t - \theta)$$

Teniendo que:

$$(3) \quad r = \frac{\Omega}{\omega_n}$$



Imagen 2. Muelle y amortiguador

$$(4) \quad A_0 = \frac{F_0/m\omega_n^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}}$$

$$(5) \quad \theta = \arctan\left(\frac{2\xi\omega_n\Omega}{\omega_n^2 - \Omega^2}\right)$$

Se observa que cuando el tiempo aumenta el primer término, el término transitorio, se anula, quedando solo la contribución de la solución particular. Esto se debe a que la componente homogénea dirige el movimiento en la fase inicial, desapareciendo a medida que el tiempo aumenta.

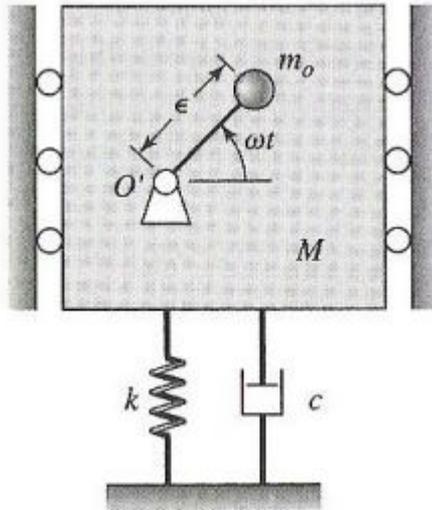
Si las condiciones iniciales de desplazamiento y velocidad son nulas, el sistema responde a dos frecuencias: la de resonancia y la de excitación del sistema (velocidad angular del rotor). La solución para la ecuación del movimiento es:

$$(6) \quad x_t(t) = -e^{-\xi\omega_n t} \left[M \cos \omega_d t + \frac{M\xi\omega_n + N\Omega}{\omega_d} \sin \omega_d t \right] + M \cos \Omega t + N \sin \Omega t$$

$$(7) \quad M = \frac{\frac{F_0}{m}(\omega_n^2 - \Omega^2)}{(\omega_n^2 - \Omega^2) + (2\xi\omega_n\Omega)^2}$$

$$(8) \quad N = \frac{\frac{F_0}{m}(2\xi\omega_n\Omega)}{(\omega_n^2 - \Omega^2) + (2\xi\omega_n\Omega)^2}$$

2.2 Desequilibrio rotante (William T.Thomson , 1988)



La fuerza armónica que introduce el desequilibrio en nuestro sistema se debe a las irregularidades en la distribución de la masa rotante. Este efecto se modela con una masa (m_o) con excentricidad (e) que gira con la velocidad angular del rotor en nuestro caso.

Imagen 3. Esquema un grado de libertad (Balakumar Balachandran y Edward B.Magrab, 2006)

Así, la ecuación del movimiento es:

$$(9) \quad m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_0 e \Omega_r^2 \sin \Omega_r t$$

Y la fuerza que actúa sobre la masa suspendida no rotativa ($m=M-m_o$) es:

$$(10) \quad F_r(t) = m_o \ddot{x} = -e m_o \Omega_r^2 \sin \Omega_r t$$

La solución particular del sistema es:

$$(11) \quad x_p(t) = X \sin(\Omega_r t - \phi)$$

Teniendo:

$$(12) \quad \tan \phi = \frac{2\xi r}{1 - r^2}$$

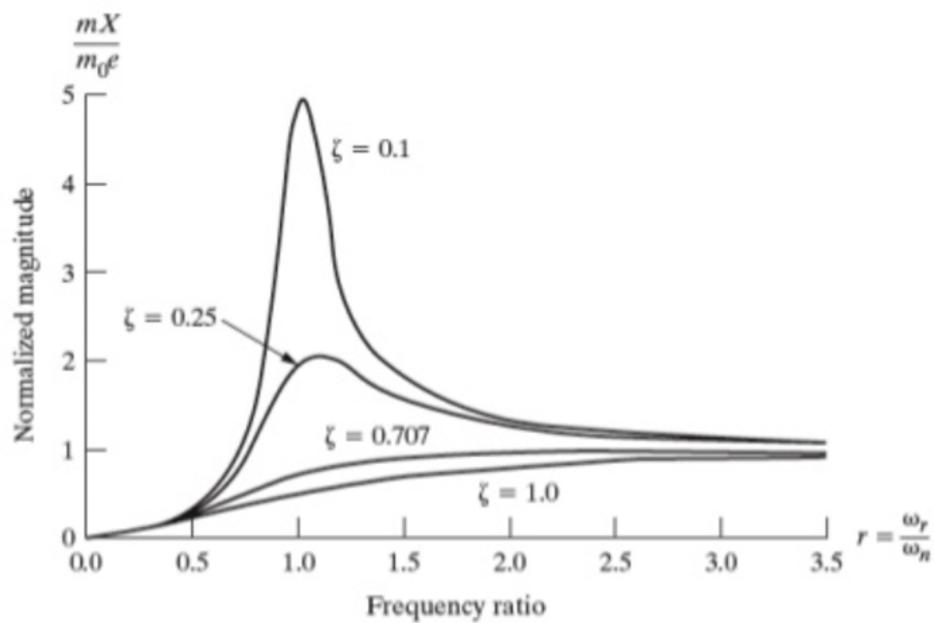
$$(13) \quad r = \frac{\Omega_b}{\omega_n}$$

Reorganizando términos, el desplazamiento es:

$$(14) \quad X = \frac{m_0 e}{m} \cdot \frac{r^2}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}}$$

Para obtener un valor del desequilibrio del rotor y de la frecuencia de resonancia, se grafica la transmisibilidad en desplazamientos.

$$(15) \quad R = \frac{mX}{m_0 e} = \frac{r^2}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\xi r)^2}}$$



Gráfica 1. Transmisibilidad en desplazamientos

3. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA

3.1. Componentes

En este apartado se describen los componentes utilizados, sus características principales y los ajustes realizados.

Las lavadoras son de apertura frontal con capacidad para 5kg de carga. Tiene tres velocidades de centrifugado; 600 (10Hz), 800 (13,33Hz) y 1000 rpm (16,67Hz). En la parte superior las sujetan dos muelles y en la parte inferior tienen dos amortiguadores. Cuentan con un motor monofásico de 0,3kW. La primera lavadora se conecta a un transformador con escala graduada y en la segunda se utiliza un variador de frecuencia para poder hacer funcionar la lavadora en todo su rango de frecuencias. Como elementos de seguridad se introduce un interruptor magnetotérmico.

Para la adquisición de datos se elige un chasis National Instruments cDAQ 9174 en la que se insertarán las tarjetas 9230, de tres entradas analógicas de 24 bits y 12800 muestras por segundo y canal con conexiones BNC.

Se eligen unos acelerómetros industriales piezoeléctricos (tecnología IPC, IEPE) (Ver anexo 1). Se colocan dos acelerómetros por lavadora, ejes x e y, roscados en un apéndice metálico anclado al tambor que monitorizan la aceleración del plano frontal de la lavadora.



Imagen 4. Instalación fotoeléctrico

Para medir la velocidad de giro se elige un sensor fotoeléctrico fotorreflexivo modelo CY-192-A (Ver anexo 2). El voltaje de 12V se lo proporciona una fuente de alimentación. Se coloca en la parte trasera de la lavadora y se utiliza la corona de la correa para tomar la referencia de la velocidad. El acabado metálico de esta corona producía que el fotoeléctrico anotase un pulso por cada brazo de la corona, así que se enrollan con cinta negra y se coloca la pegatina reflectiva en una de ellas como se aprecia en la imagen 4.

3.2 Programa

El programa necesitaba contar con varios requisitos para cumplir los objetivos de este Trabajo Fin de Grado. Por un lado tenía que ser adecuado para realizar las prácticas del laboratorio y eso le exigía ser intuitivo, visual y fácilmente configurable. Aunque sencillo, debía alcanzar un nivel de precisión y resolución aceptable al ser verificado como se explica en el apartado 3.3. y proporcionar los datos necesarios para realizar de transmisibilidad en desplazamientos (gráfica 1).

La imagen 5 muestra el menú del programa. En la parte superior está la gráfica aceleración-tiempo, que mostrará la lectura de los acelerómetros y del fotoeléctrico. La gráfica inferior es la FFT de las señales. En ambas gráficas se puede elegir la escala de los ejes mientras se toman los datos menos el eje del tiempo, que dependerá del tiempo que le demos al programa para adquirir datos. Esto es dividir la muestras por ciclo entre la frecuencia de muestreo. La unidad de este eje es el segundo.

En la configuración de canales seleccionamos los canales de los acelerómetros y del fotoeléctrico, así como la unidad de la aceleración. Hay una leyenda para leer los canales y el indicador de la velocidad de giro.

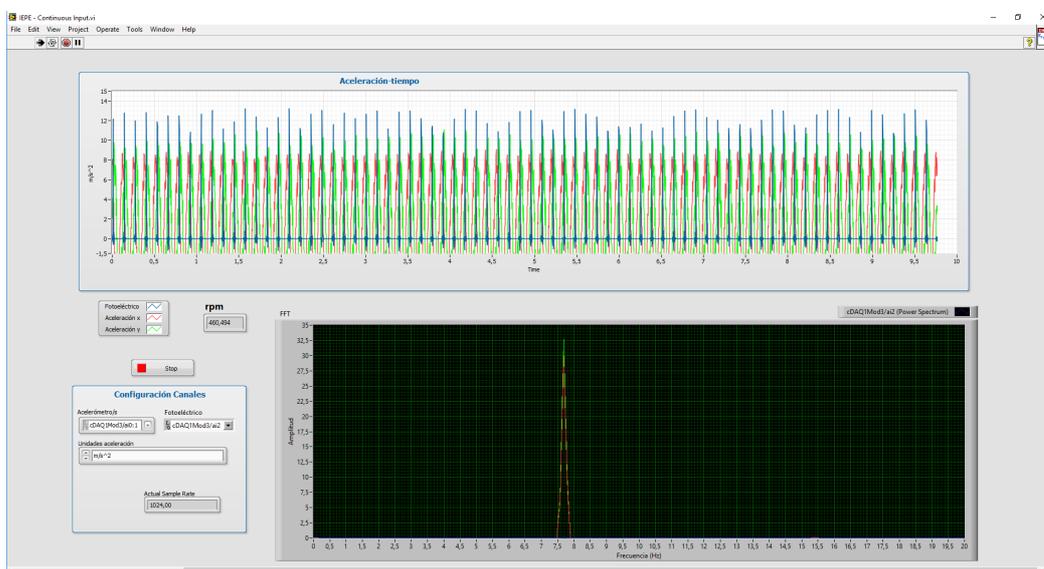
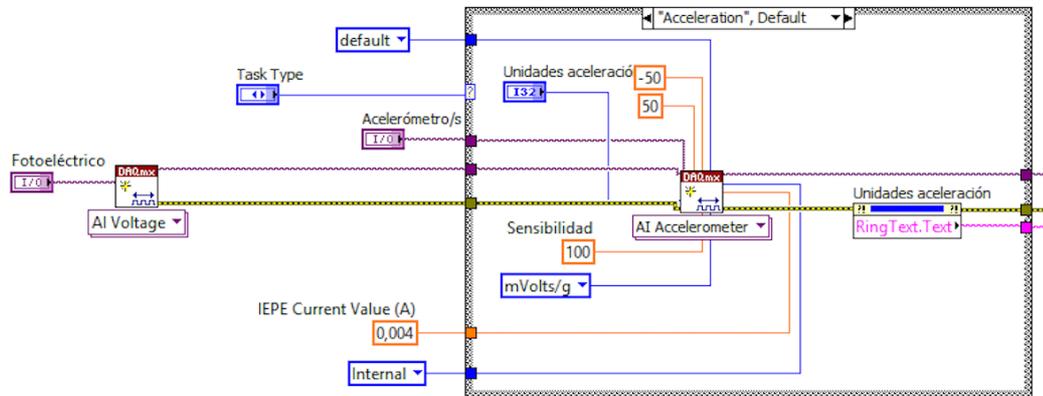


Imagen 5. Menú del programa

3.2.1 Diagrama de bloques

En esta parte iniciaremos los canales de los diferentes sensores. En primer lugar creamos un canal de entrada analógica que medirá voltaje y que

se destina a leer la señal del fotoeléctrico. A este se le asigna el canal físico que se seleccione desde el programa.



Configuración canales

Imagen 6. Configuración de canales

A continuación se crea otro canal de entrada analógica que medirá aceleración. Para este canal es necesario introducir un valor mínimo y máximo (-50 y 50g), la sensibilidad del acelerómetro y sus unidades (100mV/g)¹ y el valor y la fuente de la corriente de alimentación al ser piezoeléctricos (0,004 A con fuente interna). Las unidades de medida así como los canales se eligen desde el programa.

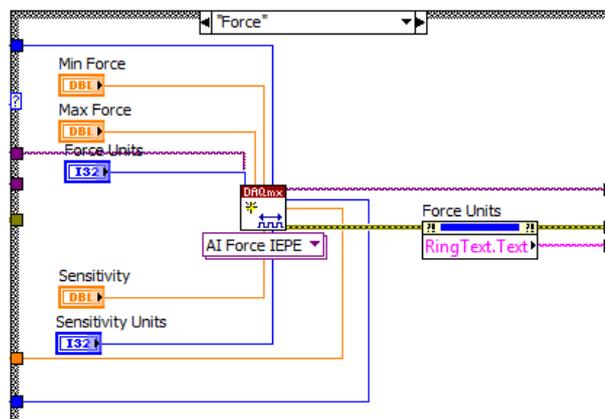


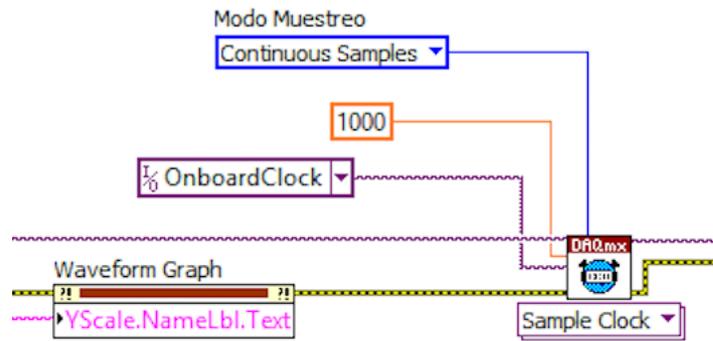
Imagen 7. Configuración sensor fuerza

Para aportar polivalencia al software se crea una estructura case para poder seleccionar el tipo de sensor que estamos utilizando, eligiendo entre aceleración y fuerza (ver imagen 7). En el apartado 5.1 se explica para qué se utilizaría la medida de fuerza.

Se añade un *timing* para configurar el modo y la cantidad de la toma de muestras. Se elige el modo de toma continua y un ratio de frecuencia de 1000 muestras/segundo. Utilizamos el reloj del ordenador de referencia.

¹ Cada acelerómetro está calibrado a diferente sensibilidad, pero se deja 100mV/g por ser la sensibilidad de diseño.

Una vez creados y configurados, se inician y se leen los canales. Es crucial introducir en la tarea *read* que estamos leyendo ondas analógicas de n canales con n muestras. Un parámetro muy relevante es el número de muestras por canal, llamado muestras por ciclo ya que es la cantidad de muestras que toma en cada bucle la estructura *while*. Esto significa que teniendo un ratio de frecuencia de 1000 muestras/segundo, si colocamos 10000, se actualizará el programa cada 10s. No se utilizan valores menores de diez veces más el valor del ratio de frecuencia para que la construcción de la onda sea correcta aunque se utilice el filtro para evitar el *antialiasing*. Dentro



Configuración muestreo

Imagen 8. Configuración de muestreo

del bucle *while* también debe estar incluido el procesamiento de la medida. Una vez leída, la señal se procesa de tres formas diferentes.

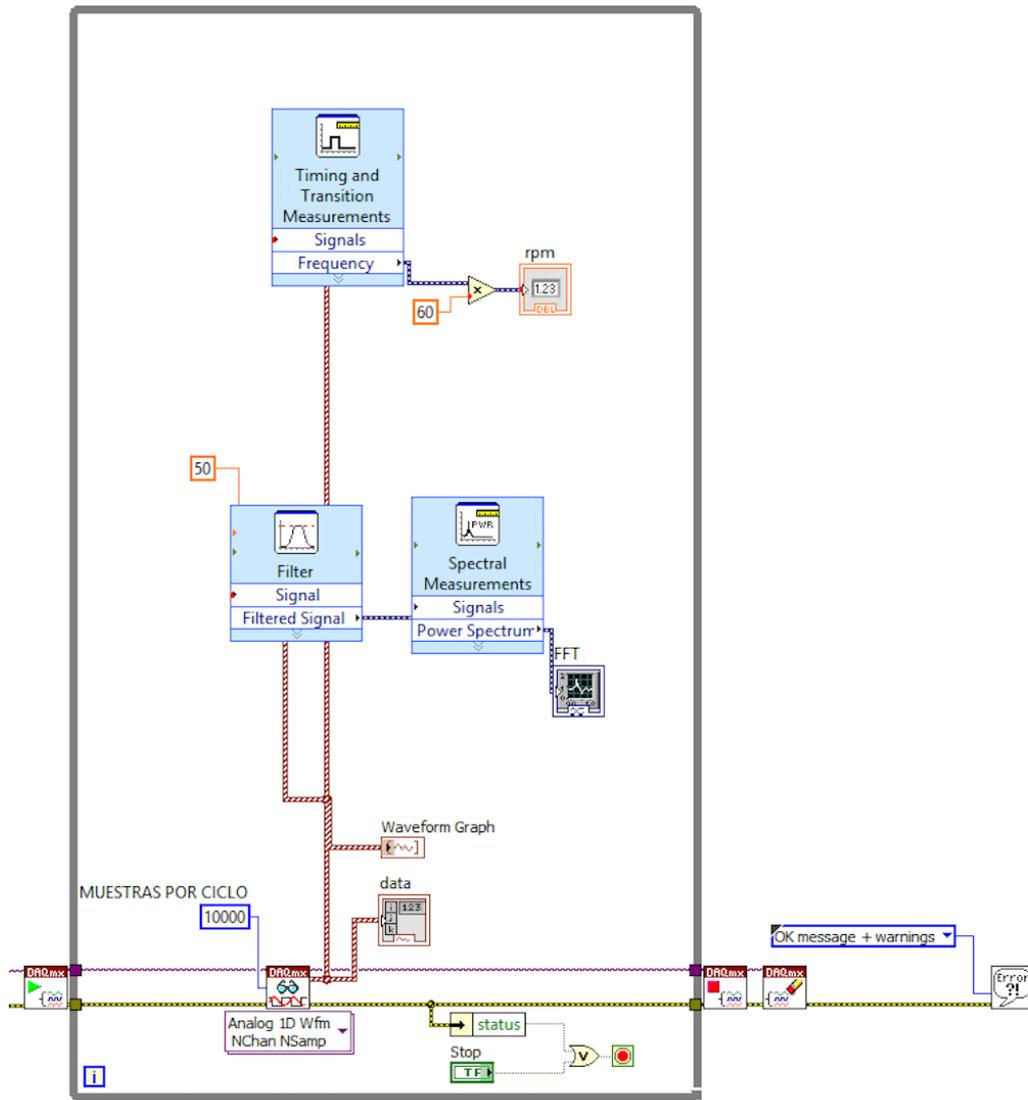
Por un lado, se realiza la gráfica de la señal. Esta es la gráfica aceleración-tiempo que aparece en el menú del programa. Aunque esta gráfica cambie el nombre y la escala según las unidades de aceleración (o de la fuerza) elegidas, en ella también podremos registrar el voltaje en Voltios con el que está funcionando el fotoeléctrico. En la imagen 5 se puede observar la alimentación a 12,2V.

Para leer la velocidad de giro añadimos el bloque para leer las características de la onda. En este caso seleccionamos que nos lea la frecuencia de la onda del fotoeléctrico. A esta medida se la multiplica por 60 para obtener las revoluciones por minuto, que aparecerán indicadas en el menú del programa. Se elige indicar la velocidad de giro en estas unidades al ser más intuitivas y fáciles de comparar con las velocidades de centrifugado de la lavadora.

Por último queda medir la amplitud de la aceleración. Antes de medir el espectro establecemos un filtro *pasabaja* de tipo *butterworth* con una frecuencia de corte de 50 Hz. La señal filtrada es introducida en el bloque *spectral measurements*, donde seleccionamos que nos realice el espectro en

frecuencias y la ventana tipo *hanning*. La salida es la FFT que se observa en la gráfica inferior del menú del programa.

Ya fuera del bucle *while*, se colocan los bloques *stop* y *clear* para terminar el software.



Adquisición datos

Imagen 9. Adquisición de datos

3.3 Verificación cadena de medida

Una vez se tienen conectados todos los componentes y el software sin errores, hay que comprobar el error cometido al tomar datos con la cadena de medida. De esta forma sabremos como de fiable son nuestros datos. Los parámetros a comprobar son la amplitud de la aceleración y la velocidad de giro, así como la resolución de nuestro software.

3.3.1 Acelerómetros

Para esta tarea, se procede a utilizar un analizador modelo 2034 (imagen 10), un amplificador modelo 2706 (imagen 11) y un excitador 4809 (imagen 12), todos ellos de la marca Brüel & Kjaer y propiedad del Dpto. Mecánica de la Universidad de Valladolid.

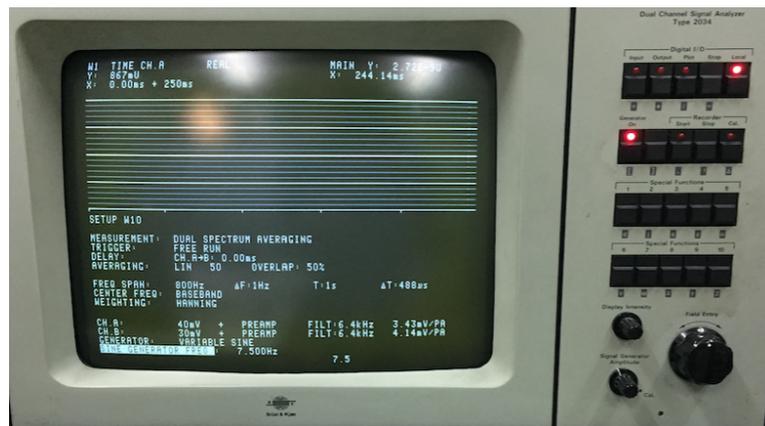


Imagen 10. Analizador generando seno a 7,5Hz.

El analizador nos genera una onda seno de la cual se puede modificar su frecuencia. Esta frecuencia la podremos introducir mediante teclado o también dando pequeños saltos de centésimas de Hertzio. Es recomendable hacer una calibración del analizador antes de su uso para que la forma de la



Imagen 11. Amplificador

onda generada sea lo más fiel a la función seno, eliminando la aparición de armónicos.

Conectado al analizador se encuentra el amplificador. Como su propio nombre indica, sirve para modificar la

amplitud de onda mediante los controles “attenuator” y “gain control”. Hay que destacar que el “attenuator” está en escala logarítmica y que cuanto mayor sea su valor menor será la amplitud de la onda. Es imprescindible que no se ilumine el testigo del “clipping”, indicando que la amplitud señalada a esa determinada frecuencia hace imposible que el excitador realice la onda correctamente al llegar a su límite físico, produciéndose choques y saltos.

Por último, la señal del amplificador es recibida por el excitador. El excitador es el responsable de reproducir la onda senoidal mediante la vibración de la membrana. Esta membrana consta de un agujero roscado en la cual se colocan los diferentes acelerómetros.

La forma de proceder para el chequeo será la siguiente:

La primera comprobación es que la gráfica aceleración-tiempo del software realiza una onda senoidal. Esto nos indica que el software recoge adecuadamente la forma de la onda.

A continuación se establece en el analizador una frecuencia y se comprueba en la gráfica FFT del software. Se amplía la escala de la gráfica del software para comprobar la desviación entre el valor indicado en el analizador y el medido.

Se introducen frecuencias en nuestro rango de funcionamiento (0-19Hz) y se observa que el error cometido es nulo. El programa recoge perfectamente la frecuencia de la onda con una resolución mayor a las décimas de Hertz. Si bien, al introducir variaciones menores de 0,1 Hertz, el algoritmo del software no detecta ese ligero cambio impidiendo que la gráfica realice el pico de la amplitud correctamente, es decir, no distingue el paso de 14 a 14,05 Hertz. Así pues establecemos que la resolución en frecuencia de nuestra cadena de medida es de 0,1. Esto será importante a la hora de realizar los barridos en frecuencia, tomando datos en saltos de 0,2 Hertz.

En segundo lugar, el amplificador nos permitirá analizar el error en la amplitud de la aceleración. Como podemos apreciar, el amplificador solo nos deja variar la amplitud de la onda de forma cualitativa, ya que el valor de la amplitud de onda depende del excitador que lo acoplemos. De esta forma, al variar un salto el *attenuator* estaremos reduciendo por diez o aumentando por diez la amplitud de la onda, ya que tiene escala logarítmica y la gráfica FFT escala lineal. Durante esta operación el *gain control* permanece fijo. Se comprueba que el valor de la amplitud aumenta o disminuye según lo introducido.

Por último, en el excitador se decide roscar un utensilio con el fin de poder colocar dos acelerómetros a la vez (incluso añadir un acelerómetro patrón y alternar la selección del canal con el software). Esto permite comprobar la medida multicanal del software y ver las posibles diferencias de lectura con el patrón. Como se observa en la imagen 12, para unir los acelerómetros al utensilio se utiliza cinta de doble cara y cera. Para este rango de bajas frecuencias, no es necesario que la unión sea roscada. Un detalle importante es colocar el excitador en el suelo, para minimizar las vibraciones transmitidas.



Imagen 12. Excitador

El fabricante de los acelerómetros solo incluía la calibración a la frecuencia de 100Hz, y no así la calibración a varias frecuencias. Esto imposibilita la realización de una calibración en varias frecuencias y sobre todo en nuestro rango de funcionamiento. El fabricante indica un error del 2% entre 0 y 50Hz.

3.3.2 Fotoeléctrico

Para corroborar la velocidad de giro basta con corroborar la medida del software con la de un tacómetro manual así como con la frecuencia registrada en la FFT. Ver imagen 5.

3.4. Mediciones

3.4.1 Constante de rigidez

La constante de rigidez de los resortes de la lavadora es un parámetro fundamental de un sistema masa-muelle-amortiguador. Se procede a calcular su valor de forma experimental y teórica.

Para el cálculo teórico se necesita medir el diámetro del alambre, el diámetro exterior, el número de espiras y el módulo de cizalladura. Para los diámetros se usa un pie de rey, con el cual medimos 4mm de diámetro de alambre y 35mm de diámetro exterior. El número de espiras es 8 y el módulo de cizalladura del acero es 77,2 GPa (Richard G. Budynas and J. Keith Nisbett, 2008). Utilizando la ecuación 16 se obtiene un resultado de 7202,33 N/m.

$$(16) \quad K = \frac{d^4 G}{8D^3 N}$$

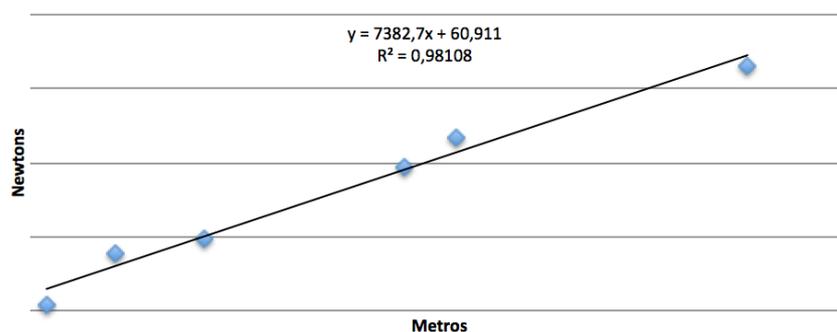
Se advierte que el valor del diámetro del alambre varía sensiblemente dependiendo de la sección en que lo midas. Los valores arrojados nunca superan los 4mm si bien todos ellos se quedan a micras de ese valor. Esto se debe a la deformación que sufren en el proceso de fabricación.

En cuanto a la forma de proceder experimentalmente, aplicaremos distintas fuerzas que conoceremos con ayuda de un dinamómetro y mediremos la elongación producida en el muelle. Según la Ley de Hooke, la elongación producida será linealmente proporcional a la carga aplicada, siendo la pendiente de esta recta el valor de nuestra constante de rigidez.

Los datos recogidos son los siguientes:

| | | | | | | |
|---------------------|------|------|-----|------|-------|-------|
| Fuerza (N) | 53,9 | 88,2 | 98 | 147 | 166,6 | 215,6 |
| Desplazamiento (mm) | 0,5 | 2,6 | 5,3 | 11,4 | 13 | 21,9 |

Tabla 1. Datos rigidez resorte



Gráfica 2. Constante de rigidez

La gráfica 2 resultante nos muestra una pendiente de 7382,7. Ese es el valor de la constante de rigidez medido experimentalmente (en N/m). El error entre el valor teórico y experimental es del 2,44%.

3.4.2 Pesajes

Un parámetro crucial en nuestro sistema es la masa. En concreto necesitamos conocer los parámetros m_0 y la m , que son las masas del rotor y la masa suspendida no rotatoria respectivamente. No obstante, para acotar las masas y facilitar el pesaje, mediremos las masas de las distintas partes de la lavadora.

Así, pesaremos por separado los contrapesos, el tambor y el rotor. En todos los pesajes hemos realizado cinco medidas y se ha tomado como resultado la media aritmética de las mismas. El instrumento de medida utilizado es el mismo dinamómetro que en el apartado 3.4.1.



Imagen 13. Pesaje contrapeso superior

Los resultados se resumen en la tabla 2:

| Objeto | Contrapeso superior | Contrapeso inferior | Masa Suspendida (M) | Masa Rotor (m_0) | Masa suspendida NO rotatoria (m) |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------------------|
| Masa (kg) | 10 | 8 | 33,5 | 3 | 30,5 |

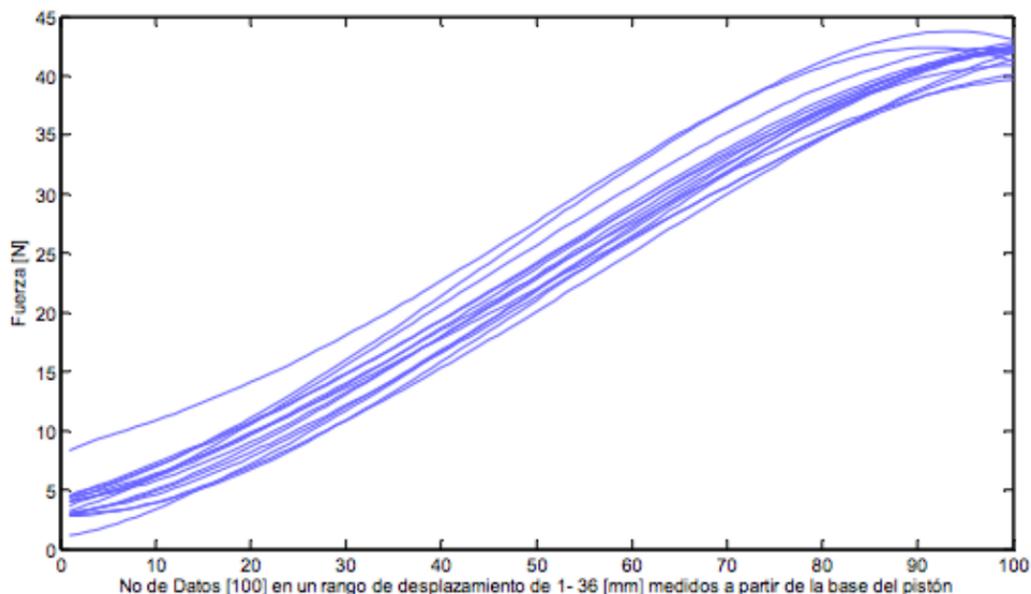
Tabla 2. Pesajes

Otra masa relevante es la que añade la ropa. En condiciones de funcionamiento, la ropa se empapa de agua durante el proceso de lavado y es precisamente durante el centrifugado cuando pierde la mayor parte de esa agua, siendo la masa del sistema variable. Para acotar el rango de masa que añade la ropa a la lavadora, se realizan diferentes pesajes de ropa seca y después mojada utilizando ropa de diferentes tejidos.

Se concluye que el peso de la ropa se multiplica por 2 al estar mojada. Sabiendo que es una lavadora con capacidad de carga para 5 kg de ropa seca, la masa que añade la ropa mojada a plena carga es de 10kg.

3.4.3 Constante de amortiguamiento

Por último se desea conocer el valor de la constante de amortiguamiento. La complejidad para elaborar el sistema necesario para conocer el valor de amortiguamiento supondría en sí un Trabajo Fin de Grado. Por ello, se busca en la bibliografía la gráfica que represente la fuerza en función del desplazamiento de un amortiguador de fricción para acotar la fuerza provocada por un amortiguador usado en lavadoras. Se observa en la gráfica 3 que la fuerza del amortiguador es lineal con el desplazamiento hasta alcanzar el final de carrera del pistón, que para ese caso en particular es de 40N.



Gráfica 3. Fuerza amortiguador fricción usado en lavadora doméstica (Alfonso Thompson Salinas, 2009).

4. ENSAYOS

4.1 Procesamiento de datos

Los ensayos que se han llevado a cabo consisten en hacer un barrido en frecuencias para anotar la amplitud de la aceleración que experimenta el tambor en cada frecuencia. Con ayuda del transformador o del variador, iremos aumentando la velocidad de giro en cantidades de 0,2Hz (12 rpm) y una vez alcanzada una velocidad estable iniciamos la lectura. Para una mejor medida, utilizamos la función *averaging* del bloque *spectral measurement* como se muestra en la imagen 14. Esta función anota varias medidas (10 en nuestro caso) y aporta la media de las mismas al finalizar. Esta forma de actuar se descarta para las prácticas al necesitar demasiado tiempo.

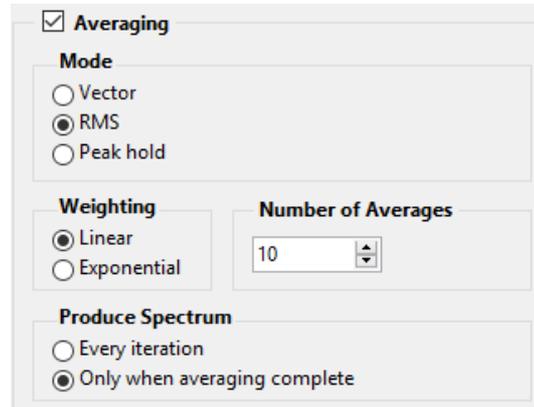
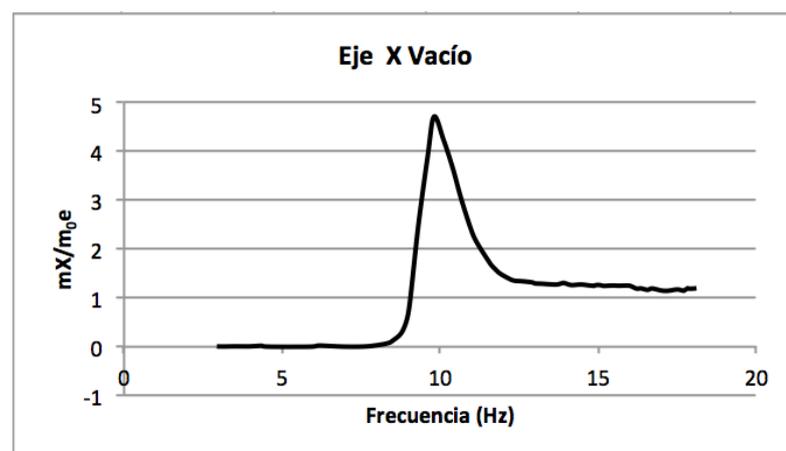


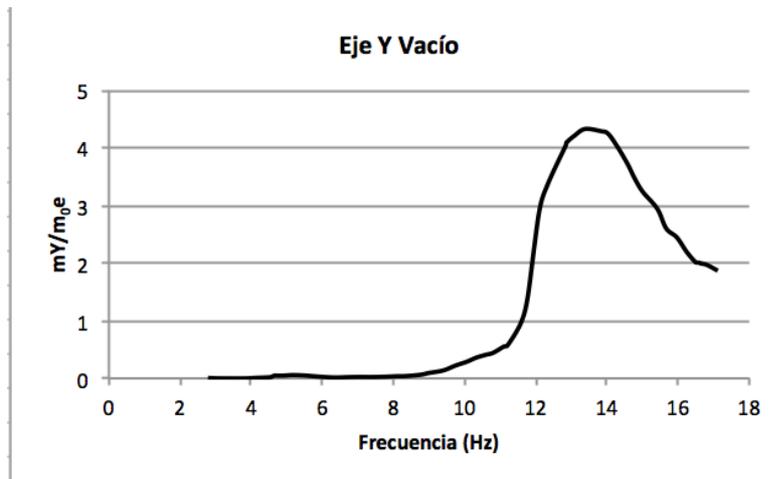
Imagen 14. Opciones *averaging*

4.2 Ensayos estudio suspensión

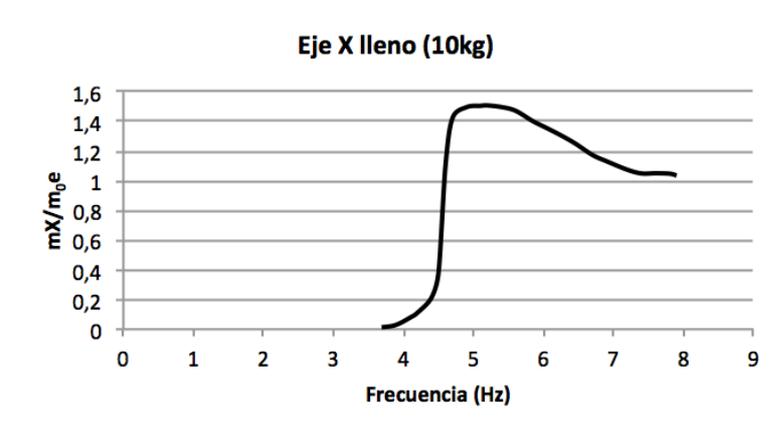
Para el análisis de la suspensión de la lavadora se realizan dos barridos, uno con la lavadora en vacío y otro con la lavadora a plena carga (10kg). A continuación se muestran las gráficas de transmisibilidad en desplazamientos:



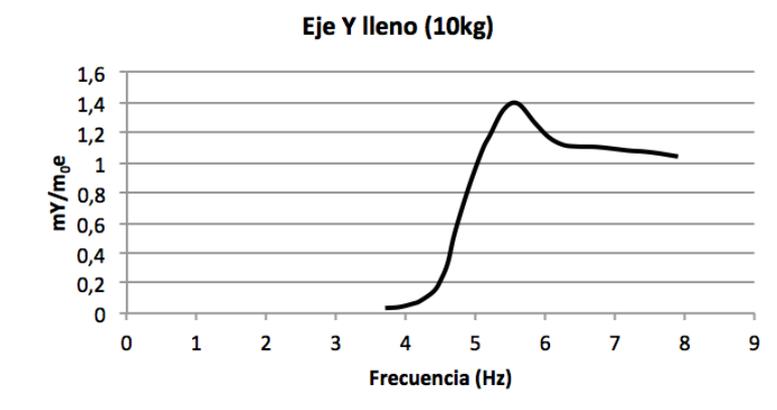
Gráfica 4. Eje x en vacío



Gráfica 5. Eje y en vacío



Gráfica 6. Eje x en máxima carga



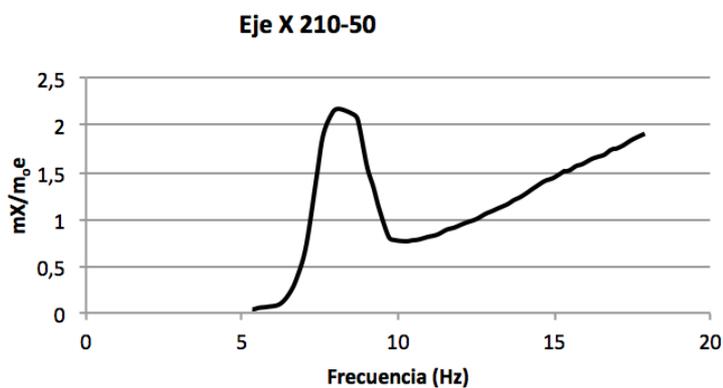
Gráfica 7. Eje y en máxima carga

4.3 Ensayos prácticos de laboratorio

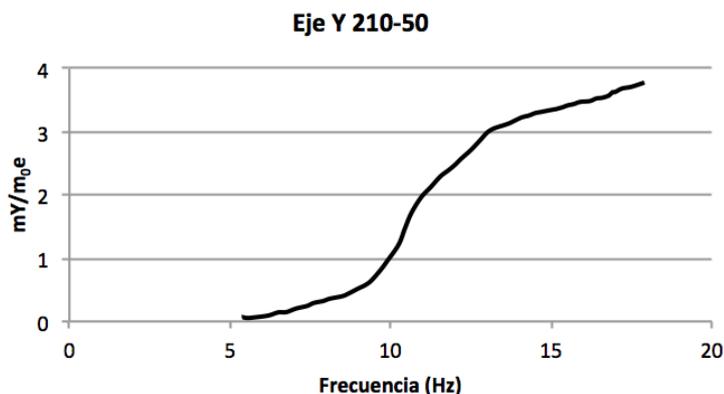
Se idea una barra que permita introducir un desequilibrio para realizar barridos durante las prácticas de laboratorio. Este desequilibrio se realiza con ayuda de una barra roscada elaborada en el taller de la universidad (ver imagen 15). En ella se pueden colocar pesas de masas conocidas (210 gramos cada una) a una excentricidad elegida. Se decide hacer un ensayo con 210 gramos a 50mm y otro con 420 gramos a 50mm. A continuación se muestran los resultados:



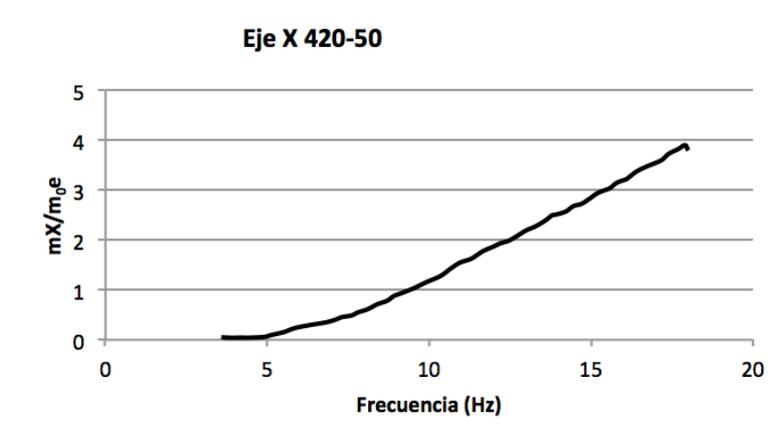
Imagen15. Barra desequilibrio



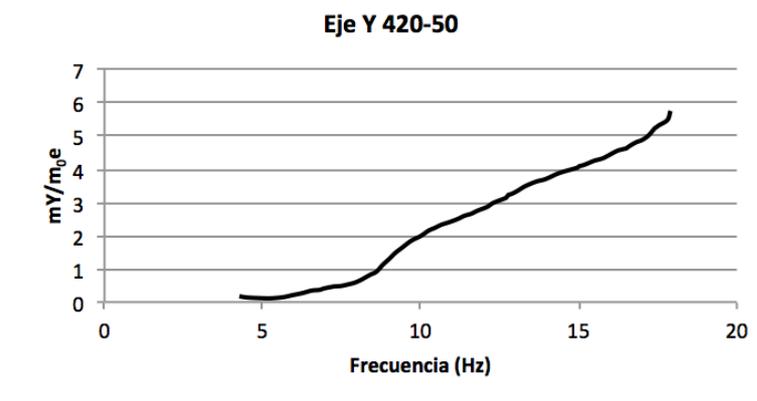
Gráfica 8. Eje x desequilibrio 10500 gr-mm



Gráfica 9. Eje y desequilibrio 10500 gr-mm



Gráfica 10. Eje x desequilibrio 21000gr-mm



Gráfica 11. Eje y desequilibrio 21000gr-mm

5. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Carrera se ha cumplido satisfactoriamente. Se ha construido un banco de ensayos que sirve para que los alumnos puedan obtener de forma experimental los resultados teóricos aprendidos en el aula, observando los componentes y el software necesario para obtener la gráfica de transmisibilidad. Además, esta cadena de medida ha sido verificada obteniendo unos excelentes resultados. Esta resolución puede mejorarse aumentando el ratio de frecuencia de muestreo (hasta el máximo de la tarjeta de 12800 muestras/segundo), pero al aumentar después las muestras por ciclo, el tiempo de adquisición de datos aumentaría en demasía para la realización de las prácticas.

En cuanto al estudio de la suspensión, se observan las siguientes conclusiones:

Del barrido en vacío (gráficas 4 y 5) obtenemos un desequilibrio residual del rotor de 550gr-mm. En el eje x tenemos la frecuencia de resonancia en 9,8 Hz y en el eje y en 13,4Hz, ambas velocidades de funcionamiento de la lavadora.

Con la lavadora a plena carga (gráficas 6 y 7) las frecuencias de resonancia son 5,2Hz (eje x) y 5,4Hz (eje y), ambas muy por debajo de la velocidad mínima de centrifugado de 600rpm. Esto indica un buen diseño de la suspensión debido a que la lavadora solo funcionará en resonancia cuando centrifugue en vacío, situación poco probable de producirse. De esta forma, a medida que incrementemos la masa de ropa las velocidades de funcionamiento estarán más lejos de la frecuencia de resonancia del sistema.

El cálculo teórico de estas frecuencias de resonancia se lleva a cabo mediante la ecuación (18) :

$$(18) \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Sin embargo, los resultados arrojados por esta ecuación difieren en gran medida de los registrados experimentalmente. Esto se debe a la rigidez que añaden otros componentes a parte de los muelles, como es la goma de la boca de apertura o los amortiguadores. Además, el modelo real tiene tres grados de libertad siendo de gran influencia el movimiento en el eje z, que no tiene ningún elemento que lo restrinja. Como se puede observar en la imagen 16, existe un importante espacio libre entre el contrapeso superior y el cajón



Imagen16. Hueco eje z

de detergente. En nuestro modelo de dos grados de libertad, no tenemos en cuenta este movimiento.

En cuanto a las gráficas de los desequilibrios introducidos (gráficas 8, 9, 10 y 11), observamos que las gráficas aumenta con la velocidad de giro en vez de alcanzar un valor estable si bien se aprecia una resonancia en la gráfica 8 en 7,4Hz (fuera de la franja de funcionamiento). Este incremento se debe a que el desplazamiento aumenta debido al movimiento producido en el eje z, que hace que el recorrido que sigue el rotor sea mayor.

5.1 Futura línea de trabajo.

Viendo la influencia del tercer grado de libertad, se piensa en incluir la medida de aceleración del eje z.

Como futura línea de trabajo se propone la colocación de unos transductores de fuerza en los apoyos de la lavadora para cuantificar la transmisibilidad de fuerza. Recordemos que el software está preparado para ello y se cuenta con espacio para alojar los sensores en las tarjetas de adquisición. Realizar la gráfica de transmisibilidad en fuerza nos permitiría valorar el compromiso de diseño entre desplazamientos y fuerza transmitida.

Otra línea de trabajo interesante sería la colocación de otros acelerómetro en el rotor para conocer el efecto del *whirling*. La forma de la lavadora y su funcionamiento complican este estudio.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alfonso Thompson Salinas. (2009). *Mejora de diseño de suspensión de lavadora automática de carga vertical*. México: SOMIM.
- Balakumar Balachandran y Edward B.Magrab. (2006). *Vibraciones*. Ed. Thomson.
- Inman, D. J. (1996). *Engineering vibration*. Prentice-Hall.
- Richard G. Budynas and J. Keith Nisbett. (2008). *Shigley's mechanical engineering design* (8ª ed.). Mc Graw Hill.
- Universidad de Valladolid. (2015-2016). *Apuntes Mecánica de Máquinas y Mecanismos*. Capítulo 9.
- William T.Thomson . (1988). *Theory of vibration with applications*. Prentice-Hall.