

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN BANCADA
PARA MICRO CÁMARA REOLÓGICA**

AUTOR: Alberto Checa Gracia

TUTOR: Marco Antonio Álvarez Valenzuela

Leganés, Octubre de 2013

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 ESTADO DEL ARTE	7
1.1.1 Transformadas de Fourier.	7
1.1.2 Adquisición de señales	11
1.1.3 Tratamiento de señal	13
1.2 PROBLEMA	13
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.4 DESCRIPCIÓN.....	14
2. PROCESO EXPERIMENTAL	15
2.1 MÉTODO DE ESTUDIO.....	15
2.1.1 Elección de método de estudio.....	15
2.1.2 Esquema del estudio realizado.....	16
2.1.3 Pasos seguidos para la adquisición de datos	18
2.1.4 Tratamiento de señal	20
2.2 EXPLICACIÓN DE PROCESOS A SEGUIR MEDIANTE DIAGRAMAS	24
2.3 IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES	26
2.3.1 Silentblock.....	26
2.3.2 Refrigeración de la micro cámara reológica.....	28
2.3.3 Bancadas	29
3. RESULTADOS	30
3.1 ANÁLISIS GRÁFICO	30
3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	43
3.2.1 Análisis de disipación de vibraciones en los tres ejes principales.....	43
3.2.2 Introducción al análisis de señales.....	44
3.2.3 Representación más característica eje X.....	45
3.2.4 Representación más característica eje Y.....	48
3.2.5 Representación más característica eje Z.....	51
4 CONCLUSIONES.....	54

5 TRABAJOS FUTUROS	55
6.- BIBLIOGRAFÍA	56
7 ANEXOS.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 Representación de colocación de acelerómetros	17
Ilustración 2 Acelerometro con cera de abeja aplicada en la base	19
Ilustración 3 Representación de la variación de la amplitud de señal en el dominio del tiempo	21
Ilustración 4 Cámara reológica	22
Ilustración 5 Refrigeración cámara reológica	23
Ilustración 6 Características de Aislador de Vibraciones tipo SF-2	27
Ilustración 7 Características de Aislador de Vibraciones tipo C	27
Ilustración 8 Sistema de refrigeración de cámara reológica constituido por cuatro ventiladores	28
Ilustración 9 Bancada cámara reológica	29
Ilustración 10 Vibraciones eje X. a) Mesa, b) Cámara, c) Aguja	31
Ilustración 11 Vibraciones eje Y. a) Mesa, b) Cámara, c) Aguja	31
Ilustración 12 Vibraciones eje Z. a) Mesa, b) Cámara, c) Aguja	32
Ilustración 13 Vibraciones eje X. d) Mesa, e) Cámara, f) Aguja	32
Ilustración 14 Vibraciones eje Y. d) Mesa, e) Cámara, f) Aguja	33
Ilustración 15 Vibraciones eje Z. d) Mesa, e) Cámara, f) Aguja	33
Ilustración 16 Vibraciones eje X. g) Mesa, h) Cámara, i) Aguja	34
Ilustración 17 Vibraciones eje Y. g) Mesa, h) Cámara, i) Aguja	34
Ilustración 18 Vibraciones eje Z. g) Mesa, h) Cámara, i) Aguja	35
Ilustración 19 Vibraciones eje X. j) Mesa, k) Cámara, l) Aguja	35
Ilustración 20 Vibraciones eje Y. j) Mesa, k) Cámara, l) Aguja	36
Ilustración 21 Vibraciones eje Z. j) Mesa, k) Cámara, l) Aguja	36
Ilustración 22 Vibraciones eje X. m) Mesa, n) Cámara, o) Aguja	37
Ilustración 23 Vibraciones eje Y. m) Mesa, n) Cámara, o) Aguja	37
Ilustración 24 Vibraciones eje Z. m) Mesa, n) Cámara, o) Aguja	38
Ilustración 25 Vibraciones eje X. p) Mesa, q) Cámara, r) Aguja	38
Ilustración 26 Vibraciones eje Y. p) Mesa, q) Cámara, r) Aguja	39
Ilustración 27 Vibraciones eje Z. p) Mesa, q) Cámara, r) Aguja	39
Ilustración 28 Vibraciones eje X. s) Mesa, t) Cámara, u) Aguja	40
Ilustración 29 Vibraciones eje Y. s) Mesa, t) Cámara, u) Aguja	40
Ilustración 30 Vibraciones eje Z. s) Mesa, t) Cámara, u) Aguja	41
Ilustración 31 Vibraciones eje X. v) Mesa, w) Cámara, x) Aguja	41
Ilustración 32 Vibraciones eje Y. v) Mesa, w) Cámara, x) Aguja	42
Ilustración 33 Vibraciones eje Z. v) Mesa, w) Cámara, x) Aguja	42

Ilustración 34 Espectro de frecuencias	44
Ilustración 35 Explicación análisis de datos	45
Ilustración 36 Comparación vibraciones mesa eje X.....	46
Ilustración 37 Representación más característica equipo apagado, eje X	47
Ilustración 38 Representación vibraciones eje X en Aguja	48
Ilustración 39 Comparación vibraciones mesa eje Y.....	48
Ilustración 40 Representación más característica equipo apagado, eje Y	49
Ilustración 41 Comparación vibraciones refrigeración encendida mesa eje Y	50
Ilustración 42 Comparación vibraciones refrigeración encendida mesa eje Y	50
Ilustración 43 Comparación vibraciones apagado mesa eje Z.....	51
Ilustración 44 Representación más característica equipo apagado, eje Z	52
Ilustración 45 Comparación vibraciones refrigeración encendida mesa eje Z	52
Ilustración 46 Representación más característica eje Z encendido.....	53
Ilustración 47 Especificaciones aislador de vibraciones tipo SF-2.....	60
Ilustración 48 Especificaciones aislador de vibraciones tipo C	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Relación de acelerómetros y posición	18
Tabla 2 Relación de datos obtenidos.....	19
Tabla 3 Hora y modo refrigeración durante medición	20
Tabla 4 Vibraciones en el equipo	30
Tabla 5 Resultados obtenidos de las mediciones	54

1.INTRODUCCIÓN.

Una vibración es una propagación de una onda elástica la cual puede descomponerse en una serie de señales sinusoidales denominadas armónicos, los cuales pueden identificarse como armónicos de alta, baja y media frecuencia.

A lo largo de los años, las vibraciones han sido objeto de estudio debido a que son una parte intrínseca de cualquier sistema. Con el fin de poder analizar su comportamiento, surge la necesidad de desarrollar sistemas con los que obtener datos de manera sencilla. De este modo, comienzan a surgir distintos equipos de medida tales como osciloscopios o vibrógrafos, desarrollándose posteriormente diversos tipos de acelerómetros y sistemas con los que poder realizar estos estudios. Inicialmente, estos estudios se realizaban en el dominio del tiempo en los cuales es posible detectar las vibraciones. Posteriormente, conforme avanzaba la tecnología, se fueron desarrollando nuevos sistemas de tratamiento de señales y analizadores de espectro, con los cuales se facilita el diagnóstico de fallos.

Los estudios de vibración se han convertido en un proceso clave a la hora de desarrollar cualquier producto. Tal es la utilidad de estos análisis, que han dado origen a desarrollar generadores de vibraciones en los cuales, se simulan las condiciones requeridas con el fin de obtener diagnósticos estructurales en diversas fases del desarrollo de un producto.

Actualmente, los estudios de vibraciones se realizan con diversos fines como son la reducción de tiempos de desarrollo de un producto, asegurar la idoneidad de los productos para la aplicación final y en base a la normativa de vibraciones existente, realizar la evaluación de riesgos para la salud de los trabajadores y usuarios de distintas máquinas.

Así en la industria ferroviaria [1] son necesarios con el fin de determinar como influirá el paso de los trenes sobre las edificaciones e infraestructuras próximas, asegurando que cuando se construya el proyecto, las vibraciones no afecten negativamente al entorno

1.1 ESTADO DEL ARTE

1.1.1 Transformadas de Fourier.

Transformada de Fourier (FT).

La transformada de Fourier (FT) [2-6] es el método más utilizado para llevar a cabo estudio de señales dada su simplicidad y su claro significado físico, ya que representa la descomposición del espectro de frecuencias de la misma en una serie de señales sinusoidales. Es el método más efectivo en caso de tratarse de una señal estacionaria, cuyo espectro no varía con el tiempo. Este método tiene limitaciones, ya que en caso de tratar una señal no estacionaria o para algunas frecuencias específicas, las amplitudes no varían con el tiempo, por tanto, el uso del mismo, podría inducir a error.

La transformada de Fourier, está constituida de las denominadas “series de Fourier”, las cuales descomponen una función $x(t)$ periódica y continua, en una serie de armónicos con la siguiente estructura:

$$x(t) = a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi t}{T} + a_2 \cos \frac{4\pi t}{T} + \dots + b_1 \sin \frac{2\pi t}{T} + b_2 \sin \frac{4\pi t}{T} + \dots \quad (1.1)$$

o, en notación más compacta,

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \sin \frac{2\pi kt}{T}) \quad (1.2)$$

en la cual a_0 , a_k y b_k son los coeficientes de Fourier, que vienen dados por:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_T x(t) dt$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt \quad \text{con } k \geq 1 \quad (1.3)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin \frac{2\pi kt}{T} dt \quad \text{con } k \geq 1$$

Con el propósito de trabajar con una notación más compacta, se definen las siguientes relaciones:

$$\theta_k = \arctg \frac{b_k}{a_k} \quad (1.4)$$

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (1.5)$$

Por tanto, se redefinen los coeficientes a_k y b_k como

$$a_k = A_k \cos \theta_k \quad (1.6)$$

$$b_k = A_k \sin \theta_k \quad (1.7)$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (1.2) correspondiente a la serie de

Fourier, se llega a:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos \frac{2\pi kt}{T} - \theta_k) \quad (1.8)$$

Por su mayor utilidad, se puede escribir la serie de Fourier en forma compleja teniendo en cuenta la fórmula de De Moivre ecuación (1.9) y las relaciones de Euler.

$$e^{i\phi} = \cos \phi \quad (1.9)$$

$$\cos \left(\frac{2\pi kt}{T} \right) = \frac{1}{2} \left(e^{\frac{i2\pi kt}{T}} + e^{\frac{-i2\pi kt}{T}} \right) \quad (1.10)$$

$$\sin \left(\frac{2\pi kt}{T} \right) = \frac{1}{2i} \left(e^{\frac{i2\pi kt}{T}} - e^{\frac{-i2\pi kt}{T}} \right) \quad (1.11)$$

definiendo

$$X_k = \frac{1}{2} (a_k - ib_k) \quad (1.12)$$

se obtiene la serie de Fourier en forma compleja:

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} X_k e^{\frac{i2\pi kt}{T}} dt \quad (1.13)$$

$$X_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{\frac{i2\pi kt}{T}} dt \quad (1.14)$$

Conociendo que:

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{T} \quad (1.15)$$

la transformada de Fourier $X(\omega)$ de una función $x(t)$ se define como

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1.16)$$

obteniendo la transformada inversa de Fourier

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (1.17)$$

Transformada de Fourier en tiempo discreto (DTFT).

La DTFT es uno de los métodos más efectivos para llevar a cabo el análisis de frecuencias de señales, obteniendo un espectro con frecuencia continua y periódica partiendo de señales discretas y aperiódicas.

Esta transformada está representada por la ecuación 1.18, en la que $x(n)$ es la señal discreta y no periódica, ω la frecuencia y $X(\omega)$ la transformada obtenida en el dominio de la frecuencia.

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \cdot e^{-j\omega n} \quad (1.18)$$

$$X(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(\omega) e^{j\omega n} d\omega \quad (1.19)$$

La limitación computacional de este tipo de transformada de Fourier, reside en la necesidad de disponer de un muestreo infinito de muestras para obtener un espectro continuo y discreto. Lo cual está limitado por la capacidad de los computadores.

Transformada discreta de Fourier (DFT).

En procesos de adquisición de datos, la adquisición de la señal se lleva a cabo mediante técnicas digitales, realizándose un muestreo de la misma[8] en unos instantes equiespaciados un tiempo Δt , denominado intervalo de muestreo, durante un tiempo T , denominado tiempo de muestreo.

A fin de aplicar la transformada de Fourier en la señal obtenida y analizar la misma, es necesario modificar dicha transformada, obteniéndose de este modo la transformada discreta de Fourier (DFT). Si la serie temporal continua $x(t)$ de la ecuación 1.14 fuera desconocida y no se dispusiera más que de valores de muestra espaciados uniformemente y representados por la sucesión discreta x_r , con $r=0,1,2,\dots,N-1$, donde N fuera el número de muestras, $t=k\cdot\Delta t$ $\Delta t=T/N$, se aproximaría:

$$X_k = \frac{1}{T} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-i(2\pi k/T)(r \Delta t) \Delta t} \quad (1.20)$$

Sustituyendo $T = N\Delta t$ se llega a la definición formal de la transformada discreta de Fourier

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-i(2\pi kr/N)} \text{ con } k = 0,1,2, \dots, N-1 \quad (1.21)$$

y de la transformada inversa discreta de Fourier

$$X_r = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-i(2\pi kr/N)} \text{ con } k = 0,1,2, \dots, N-1 \quad (1.22)$$

Definiendo $\omega = 2\pi k/N$, se puede redefinir la DFT quedando por tanto definida por la ecuación (1.23).

$$X(\omega_k) = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-i(\omega r)} \quad (1.23)$$

Debido a que la obtención de un número infinito de muestras de la señal sería algo imposible, con la DFT no es posible obtener un espectro continuo en frecuencia.

Transformada rápida de Fourier (FFT).

A fin de obtener información adicional, difícil de localizar en las señales originales, se aplica la transformación matemática de seles. De este modo, se aplica la transformada de Fourier.

El número elevado de operaciones a realizar, supone un gran inconveniente que presenta la transformada discreta de Fourier. Esto se debe a que se deben realizar un total de N multiplicaciones del término para cada uno de los N valores de x_r , lo que supone un total de N^2 multiplicaciones.

$$(x_r e^{-i(2\pi kr/N)}) \quad (1.24)$$

Para simplificar estos cálculos, Cooley y Tukey desarrollaron un nuevo algoritmo, más rápido y relativamente sencillo, denominado transformada rápida de Fourier (FFT) que permite reducir considerablemente el número de operaciones a efectuar [8]. El funcionamiento básico de la FFT consiste en subdividir la serie Xk en un conjunto de sucesiones de menor número de elementos. Una vez efectuada la subdivisión, se calcula la DFT a cada subconjunto y se combinan entre sí obteniendo finalmente la transformada de la serie original

De este modo se consigue reducir sustancialmente el número de operaciones a realizar, mejorando por tanto el rendimiento de los procesadores a la hora de llevar a cabo el cálculo de la DFT.

1.1.2 Adquisición de señales

El proceso de adquisición de señales [10-12], consiste en transformar señales físicas en tensiones eléctricas para posteriormente digitalizarlas. La información es obtenida mediante distintos tipos de sensores, los cuales necesitan tanto de un hardware como de un software de adquisición. El hardware más utilizado para este proceso es la tarjeta de adquisición de datos, la cual adecua la señal a niveles compatibles con el software que realiza la transformación a señal digital.

Para realizar una correcta toma de señales, el muestreo, debe realizarse en torno a dos veces la mayor de las frecuencias y previamente debe realizarse un

acondicionamiento de señal, en el cual, se distinguen varias etapas: amplificación, excitación, filtrado, multiplexado, aislamiento y linealización.

Los dispositivos utilizados para obtener las señales de vibración son los acelerómetros.

Los acelerómetros, son instrumentos transductores de aceleración que permiten registrar la intensidad de la aceleración.

En función del modo de obtención de la señal, se pueden distinguir cinco tipos de acelerómetros, cada uno de ellos y sus características serán introducidos a continuación.[12, 13]

- Acelerómetros mecánicos: Mediante la deformación de una galga extensiométrica miden la aceleración producida, la cual es directamente proporcional a la aceleración aplicada al acelerómetro.
- Acelerómetros piezoresistivos: El funcionamiento de estos sensores, está basado en el efecto piezoresistivo consistente en una variación de un semiconductor, causado por su expansión y compresión que influye en la movilidad de los electrodos bajo carga mecánica. Permiten realizar mediciones desde los 0Hz hasta unos 30KHz
- Acelerómetros piezoeléctricos: Este tipo de acelerómetro, se basa en la deformación de un determinado cristal, el cual al ser sometido a una tensión mecánica produce un cambio en su estructura cristalina, produciéndose una diferencia de potencial y carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada. Este tipo de acelerómetro no introduce atenuación ni desfase en la señal.
- Acelerómetros capacitivos: Se basa en la variación de la capacitancia de un condensador producida por el movimiento de dos placas, las cuales modifican la corriente que circula entre ambas. Conocida la capacitancia del condensador, se evalúa la diferencia de corriente obteniéndose de esta manera las aceleraciones correspondientes. Son capaces de medir aceleraciones en un amplio rango de frecuencias. Suelen emplearse para aplicaciones baja o de muy baja frecuencia.

1.1.3 Tratamiento de señal

Para realizar el estudio de señales, [14-17] se debe acudir al dominio del tiempo o al dominio de la frecuencia. En el dominio tiempo, se obtiene una perspectiva natural de la señal en la que se muestra la variación de la amplitud de la señal respecto del tiempo resultando muy complicado obtener sus componentes fundamentales, lo cual supone retornar al dominio de la frecuencia. En este dominio, se representa la amplitud de la señal en función de la frecuencia, en la cual se aprecian todas las componentes de la señal resaltando las componentes fundamentales de la misma, las cuales, se corresponden con picos verticales bien diferenciados. A esta representación del espectro de frecuencia, se le denomina espectro de frecuencia.

Uno de los métodos más efectivos para realizar la transformación entre ambos dominios, es la transformada de Fourier. Primeramente, se distinguirán cada uno de los tipos de transformada en función del tipo de señal a analizar (continua o discreta) y del tipo de respuesta a obtener tras la realización de la transformada (espectro continuo o discreto).

1.2 PROBLEMA

Pese a existir aisladores de vibración en la cámara reológica llevada a estudio, se siguen observando vibraciones en la aguja y micro cámara de la misma, dificultando de esta manera los estudios [19] en los cuales se determina experimentalmente la influencia de las vibraciones en la medida de la tensión superficial comprobándose la importancia de la presencia de resonancias en el movimiento de la gota y se demuestra que el uso de una bancada antivibratoria compuesta permite reducir en dos órdenes de magnitud la dispersión cuadrática media de la medida de tensión superficial.

1.3 OBJETIVOS

En este estudio, se pretende analizar las vibraciones que se transmiten a lo largo de diferentes bancadas de una cámara reológica y que afectan a la aguja y a la micro cámara en la cual se realizarán diferentes estudios de tensión superficial de fluidos en cámara micro-reológica. A continuación se analizarán los resultados obtenidos con el fin de poder identificar las frecuencias de vibración naturales a las que se encuentra

sometida, tanto en condiciones normales (cuando únicamente afectan las vibraciones del medio) como en condiciones de funcionamiento de la misma, esto es, cuando todos los dispositivos de refrigeración se encuentran activos.

Este estudio, dará cabida a trabajos posteriores en los cuales se tratarán de aislar las frecuencias de vibración mediante el uso de diversos sistemas.

Inicialmente, las diferentes bancadas de la cámara reológica se encuentran separadas mediante aisladores de vibraciones o *silentblocks*, los cuales, disipan las vibraciones existentes para disminuir al máximo el movimiento de la cámara. Conociendo las características de los mismos, se va a llevar a cabo la evaluación de su correcto funcionamiento y posteriormente, determinar si estos son adecuados en función de los resultados experimentales obtenidos mediante la toma de datos en distintas condiciones de funcionamiento.

1.4 DESCRIPCIÓN

Se realizan mediciones en cada una de las partes en las cuales se pretende minimizar el movimiento vibratorio con el fin de detectar en que frecuencias se encuentran los máximos movimientos y posteriormente tratar de aislarlas.

2. PROCESO EXPERIMENTAL

En el presente capítulo, se describirá el proceso necesario para la adquisición de las señales vibratorias, la disposición de los acelerómetros y los componentes del equipo de ensayo.

Este estudio ha de llevarse a cabo por la necesidad de conocer el modo en que afectan las vibraciones en cada uno de los elementos de la cámara reológica con el fin de realizar estudios de tensión superficial, en el cual se cuenta con una gota de un pico litro.

El motivo por el cual se requiere aislar las vibraciones, es tener la posibilidad de controlar los movimientos de la gota de fluido y en el cual se analizarán diferentes propiedades y comportamientos. De esta manera, se podrá predecir el comportamiento de cada gota y por tanto se obtendrá una mejora de los análisis realizados en dicha máquina.

Las medidas han sido tomadas en el taller mecánico de la Universidad Carlos III de Madrid en días consecutivos y en diferentes modos de funcionamiento de la refrigeración con un intervalo de treinta minutos entre mediciones. Debido a la sensibilidad de los equipos de medición también se realizaron los estudios en distintos momentos del día para de este modo, conocer la influencia de factores externos en las señales de vibración obtenidas.

2.1 MÉTODO DE ESTUDIO

En el estudio llevado a cabo, se dispone de una señal discreta (punto a punto) obtenida mediante valores periódicos.

2.1.1 Elección de método de estudio

Una vez conocidos los diferentes métodos de estudio de señales discretas, se procede a seleccionar el método con el cual se va a realizar el estudio de las vibraciones transmitidas a lo largo de cada una de las etapas.

Teniendo en cuenta el tipo de señal, el tamaño de muestra y la limitación de datos y capacidad de procesamiento de los equipos, se ha descartado la transformada de Fourier en tiempo discreto (DTFT), la transformada discreta de Fourier (DFT) también es descartada puesto que no permite obtener un espectro continuo de frecuencias. Del mismo modo, se descarta la transformada de Fourier por la gran cantidad de operaciones que deben realizarse para obtener resultados.

El método seleccionado es la FFT (Fast Fourier Transform o Transformada rápida de Fourier) debido a la reducción del número de operaciones que deben realizarse para obtener la transformada de la serie original. Esta decisión se debe a la limitación de los procesadores y al tamaño de las muestras obtenidas de los distintos acelerómetros.

2.1.2 Esquema del estudio realizado

A continuación, se realiza una una representación de la disposición de los acelerómetros utilizados para medir las vibraciones en los puntos de interés de la micro-cámara reológica.

Se pueden distinguir tres acelerómetros los cuales estan situados en:

- Mesa: , La cual transmite las vibraciones a los diferentes elementos de la cámara reológica
- Cámara: Su función es obtener las imágenes del fluido a estudiar con las cuales se realizarán los estudios de tensión superficial.
- Aguja: Aporta una gota del fluido y permite modificar ciertas condiciones como la atura y anchura de la misma.

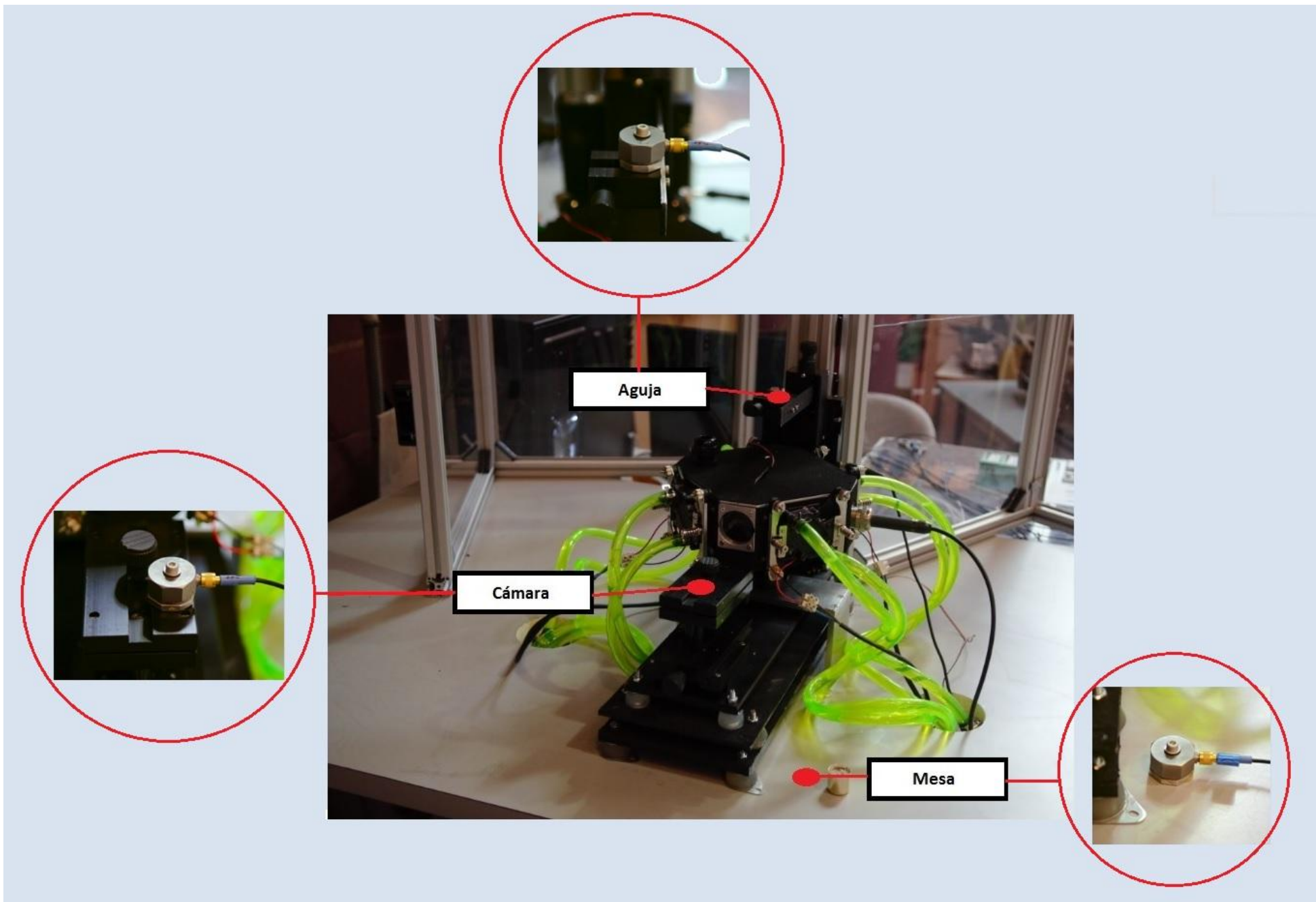


Ilustración 1 Representación de colocación de acelerómetros

2.1.3 Pasos seguidos para la adquisición de datos

Para el proceso de adquisición de señales se llevan a cabo los siguientes pasos en el orden indicado.

1. Elección del punto adecuado para realizar la medición. En este punto se deben tener en cuenta los puntos de los cuales se quiere obtener información de modo que todos los datos que se obtengan tengan la mayor utilidad posible.
2. Seleccionar el tipo de acelerómetro necesario para obtener la mayor cantidad de datos posibles.
3. Seleccionar el acondicionador y analizador necesario para poder enviar la información obtenida de las mediciones a un ordenador. Para este fin, se cuenta con una tarjeta de adquisición la cual cuenta con acondicionadores de señal y convertidores.
4. Selección de software necesario para poder registrar los datos obtenidos de la tarjeta de adquisición. Este proceso se realiza mediante la herramienta LabVIEW, el cual almacena los datos generando un archivo para su posterior análisis.

Conocido el procedimiento a seguir a la hora de realizar la recogida de datos, y basándonos en los puntos 1 y 2 del procedimiento explicado anteriormente, se disponen tres acelerómetros triaxiales de la forma indicada anteriormente:

POSICIÓN ACELERÓMETRO	NÚMERO DE ACELERÓMETRO
Mesa	1
Cámara	2
Aguja	3

Tabla 1 Relación de acelerómetros y posición

Para la fijación de los mismos se utiliza cera de abeja, la cual proporciona la sujeción y rigidez necesaria para obtener los datos necesarios. Con el fin de evitar dañar los acelerómetros, se han fabricado además unas bases en las cuales se fijan los acelerómetros mediante tornillos y en las cuales se aplica la cera de abeja.



Ilustración 2 Acelerómetro con cera de abeja aplicada en la base

De esta manera se obtienen los datos en distintos puntos y en distintos modos de funcionamiento con los que posteriormente se realizará el estudio de las vibraciones.

	MESA	CÁMARA	AGUJA
ENCENDIDO	X, Y, Z	X, Y, Z	X, Y, Z
APAGADO	X, Y, Z	X, Y, Z	X, Y, Z

Tabla 2 Relación de datos obtenidos

Para llevar a cabo el estudio, primeramente se debe realizar un procesado de la información obtenida con el objetivo de detectar rasgos característicos de las señales y de esa manera, tratar de disminuir el ruido para observar con mayor precisión el comportamiento de las vibraciones a lo largo de las distintas etapas. El ruido presente en las mediciones, proviene de cada uno de los elementos que se encuentran en el taller en el cual se realizó el estudio y de elementos externos . Además, debido a los diferentes modos de funcionamiento de la micro cámara reológica, se realizan mediciones tanto con los equipos de refrigeración encendidos como apagados, para de esta manera, conocer la posible resonancia estructural de la bancada.

Una vez realizadas las mediciones, se debe clasificar la información obtenida en función del las horas y el día para poder obtener patrones de ruidos.

A continuación, se adjunta una tabla de identificación de las pruebas realizadas y el modo en el que se realizan las mediciones.

ESTUDIO	ESTADO DE REFRIGERACIÓN
1	Apagado
2	Encendido
3	Apagado
4	Encendido
5	Apagado
6	Encendido
7	Apagado
8	Encendido
9	Apagado

Tabla 3 Hora y modo refrigeración durante medición

2.1.4 Tratamiento de señal

Una vez obtenidas las señales, se realiza el tratamiento de las mismas. Para ello, se implementan individualmente los datos obtenidos de los acelerómetros. De cada uno de ellos, se obtienen tres columnas de datos las cuales se corresponden con los tres ejes principales obteniéndose finalmente nueve columnas de datos por estudio.

Graficando los datos obtenidos de los acelerómetros, se obtiene la variación de la amplitud de señal en el dominio del tiempo.

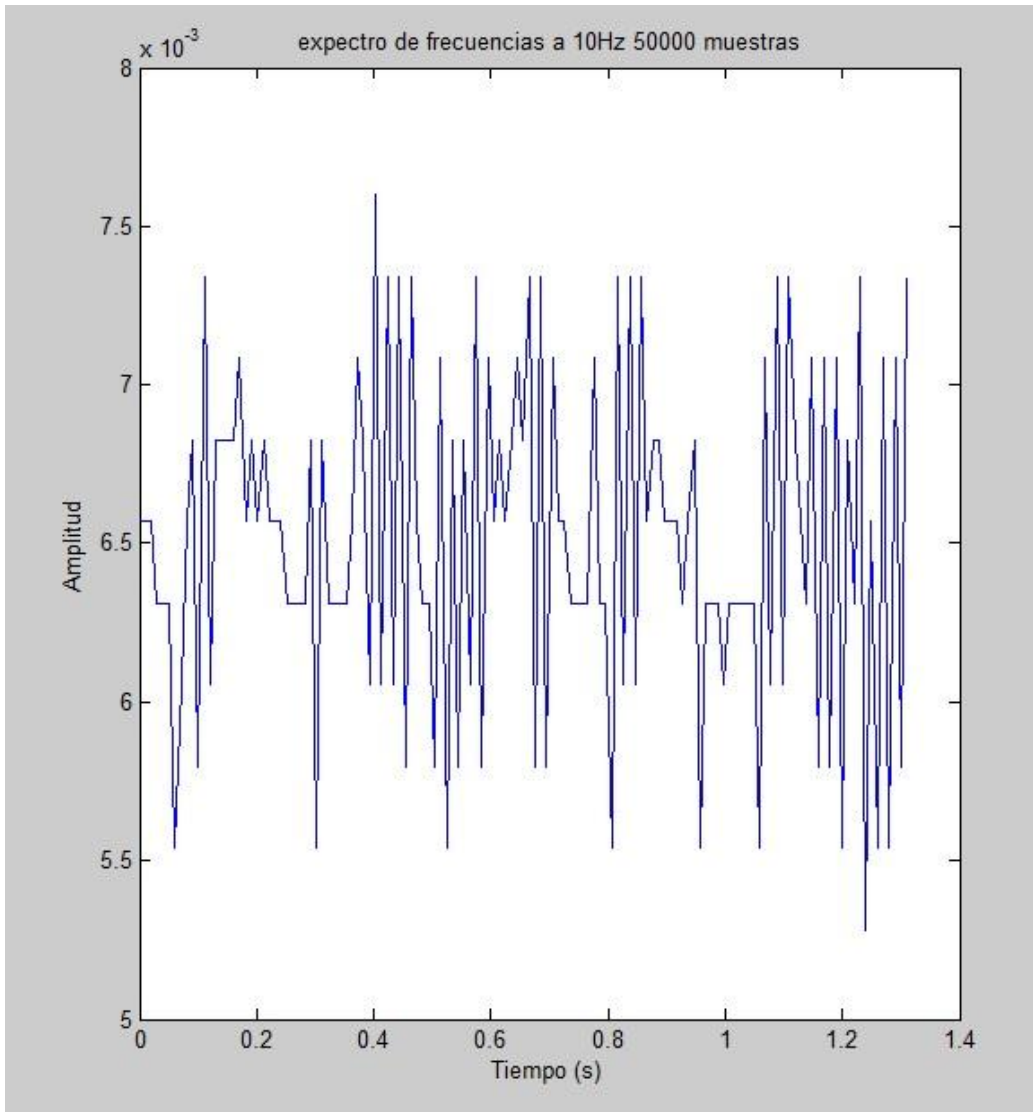


Ilustración 3 Representación de la variación de la amplitud de señal en el dominio del tiempo

En esta imagen, se representa un fragmento de la amplitud de señal obtenida de los acelerómetros en el cual se observa el comportamiento de la señal en cada instante de tiempo.

Previo al análisis de la señal, se realiza un pre-procesado de los datos obtenidos para eliminar mediciones que pudiesen inducir a error para finalmente implementar los mismos en “Matlab”.

Para realizar el análisis de las señales obtenidas, se recurre a la programación de la FFT, la cual está compuesta por dos programas:

- En el primero de ellos, se genera un eje de frecuencias y se genera el vector tiempo, para posteriormente, realizar la transformación y normalización de los datos obtenidos y se centran los valores de la transformada. Para ello, el programa sigue la siguiente secuencia: Una vez indicada el tipo de función que se pretende reproducir, calcula la longitud del vector de datos introducido. Seguidamente, con la longitud del vector, el tiempo de muestreo el tamaño de la muestra, se genera un eje de frecuencias para finalmente calcular la transformada y normalizarla.
- En el segundo, se representa el espectro de frecuencias según el cual se analizarán los datos obtenidos. Para ello, se grafica el espectro de frecuencias y los valores obtenidos mediante la transformada de Fourier.

Ambos programas han de ejecutarse en secuencia dado que son complementarios.

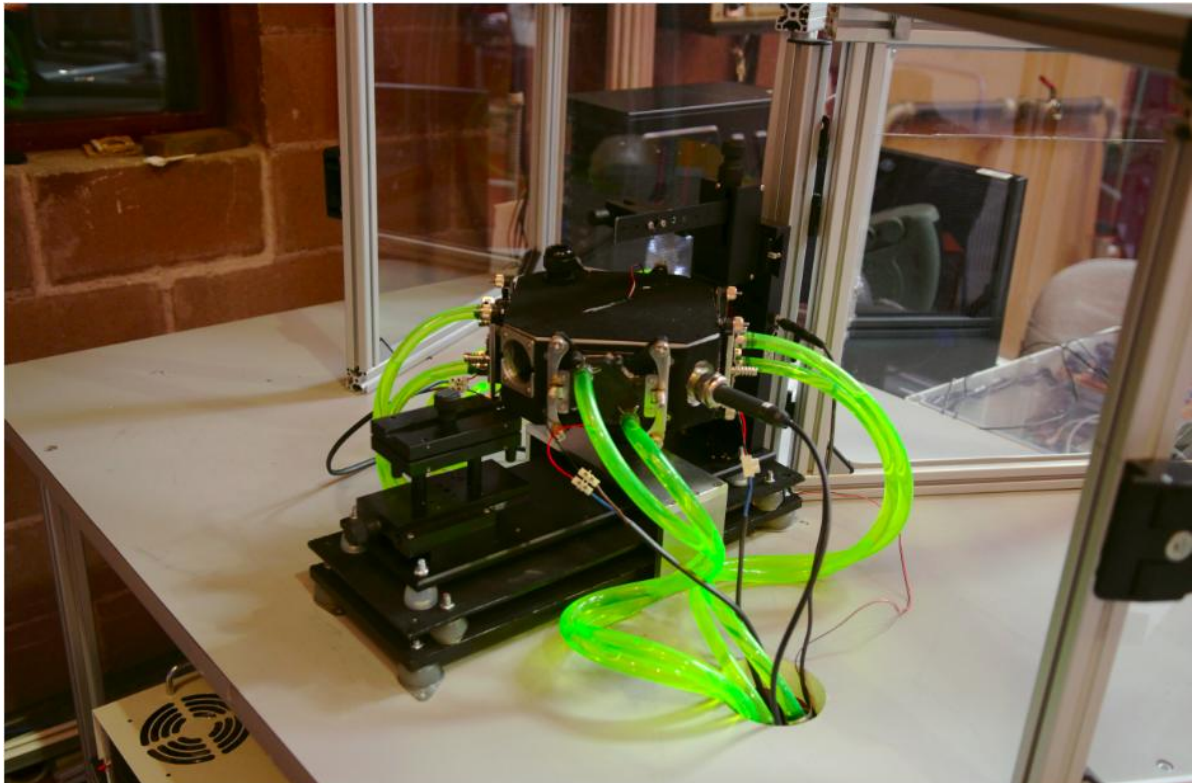


Ilustración 4 Cámara reológica



Ilustración 5 Refrigeración cámara reológica

2.2 EXPLICACIÓN DE PROCESOS A SEGUIR MEDIANTE DIAGRAMAS

DIAGRAMA DE SISTEMA DE ADQUISICIÓN

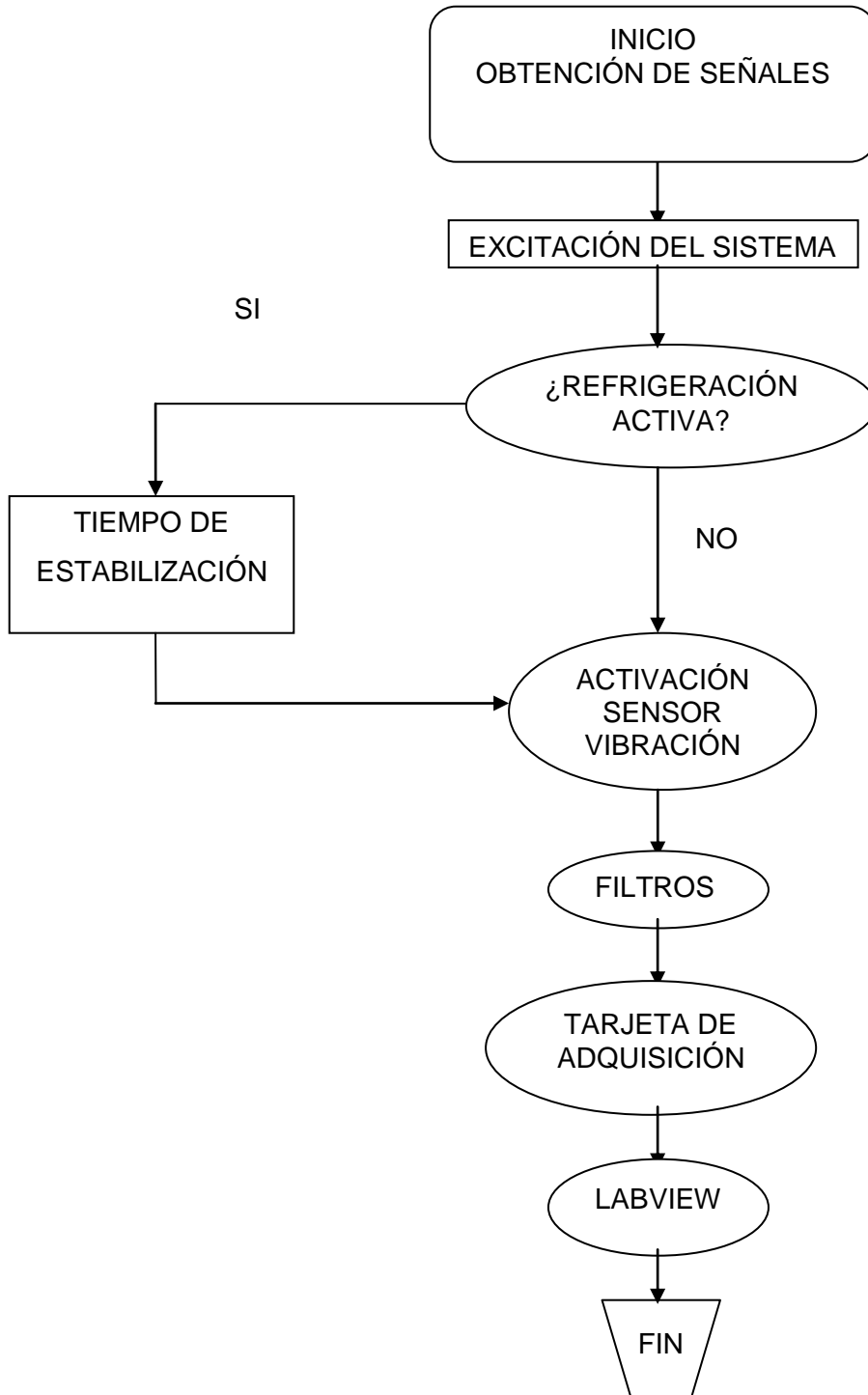
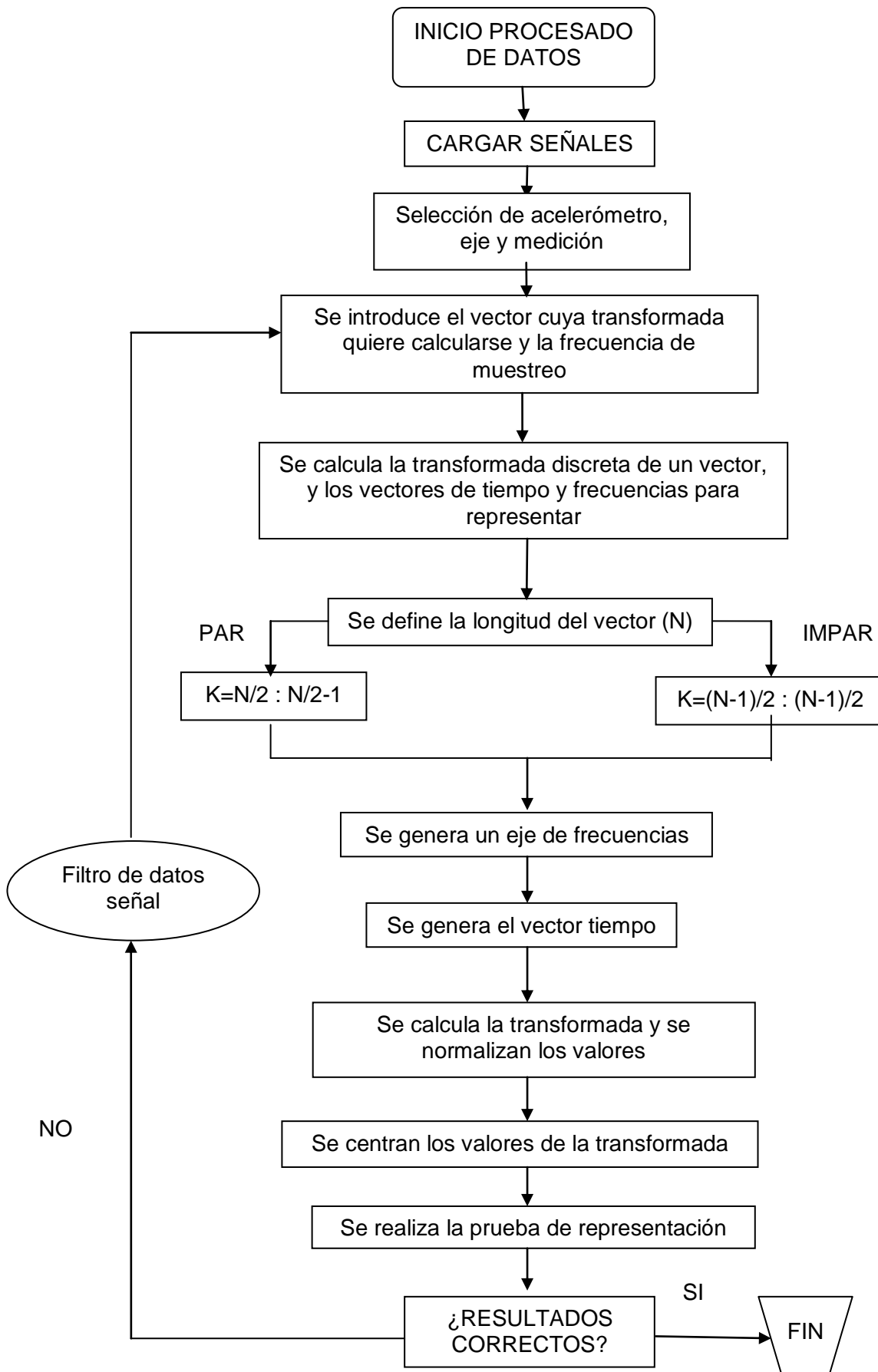


DIAGRAMA DE PROCESADO DE SEÑALES



2.3 IDENTIFICACIÓN DE COMPONENTES

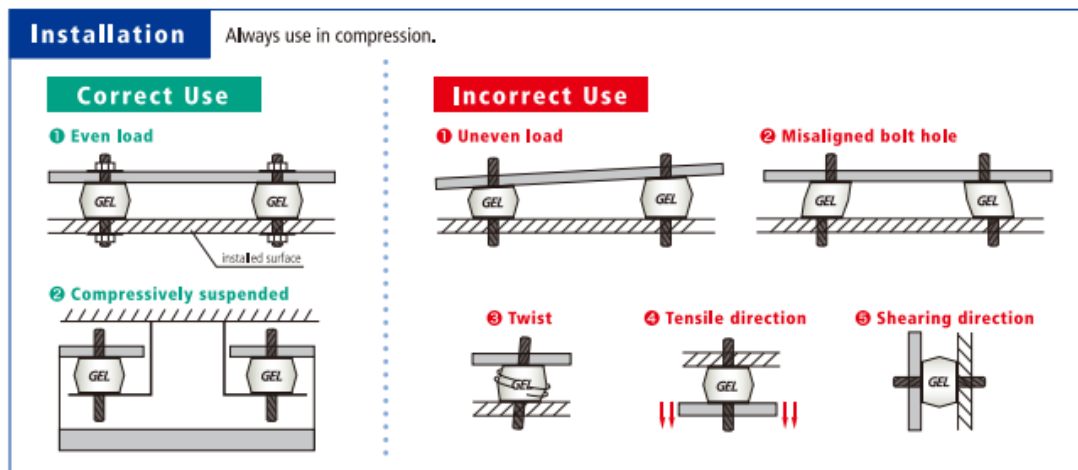
La máquina en la cual se ha desarrollado el estudio de vibraciones, consta de los siguientes elementos, los cuales serán analizados individualmente.

2.3.1 Silentblock

Un silentblock es un elemento compuesto por un material elastómero y cuya función es amortiguar las vibraciones. Son un sistema de aislamiento pasivo constituidos por un gel disipador de energía.

A continuación se detallan las características de los distintos tipos de aisladores de vibraciones o *silentblocks*.

Previo a la realización de las mediciones, debe comprobarse la correcta colocación de los mismos de modo que se cumplan las condiciones de diseño necesarias para el correcto funcionamiento.



Aislador de vibraciones tipo SF-2



En la primera etapa de aislamiento, se dispone de cuatro aisladores de vibraciones de tipo SF-2 con las características que se detallan a continuación.

Type SF

For applications where a plate at bottom is preferred instead of a bolt.

Part No.	Optimum Load (kg/4 points)	Resonance Point (Hz)	Resonance Magnification (dB)	Recommended Frequency (Hz)
SF-2	5 ~ 13	15 ~ 10	12 ~ 13	22 ~
SF-5	13 ~ 30	13 ~ 9	15 ~ 16	19 ~
SF-10	30 ~ 50	12 ~ 9	19 ~ 21	17 ~

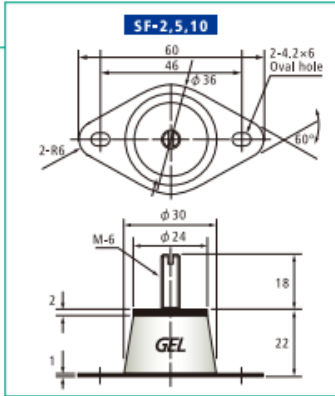


Ilustración 6 Características de Aislador de Vibraciones tipo SF-2

Aislador de vibraciones tipo C



Es el aislador presente en la segunda etapa de aislamiento, se dispone de cuatro aisladores de vibraciones de tipo C con las siguientes características.

Type θ

Part No.	Optimum Load (kg/4 points)	Resonance Point (Hz)	Resonance Magnification (dB)	Recommended Frequency (Hz)	h (mm)
θ - A	2.0 ~ 3.2	16 ~ 15	12	23 ~	13
θ - B	1.6 ~ 2.4	13 ~ 11	13 ~ 12	18 ~	18
θ - C	3.2 ~ 8.0	14 ~ 12	13 ~ 12	20 ~	18

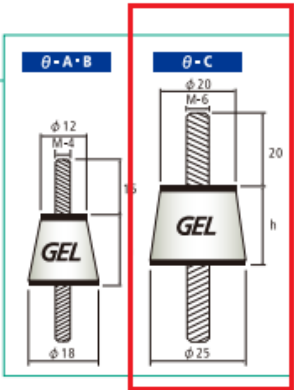


Ilustración 7 Características de Aislador de Vibraciones tipo C

Una vez conocidas todas sus características, estas deben tenerse en cuenta a la hora de estudiar los resultados, puesto que los valores de los puntos de resonancia suponen un incremento de las vibraciones.

2.3.2 Refrigeración de la micro cámara reológica

Para la refrigeración de la micro cámara reológica, se dispone además de un sistema de refrigeración accionado por cuatro ventiladores, los cuales suponen una fuente de excitación al sistema, ampliando su energía en las zonas en las cuales las frecuencias de resonancia están próximas a las de excitación.

Este sistema, se encuentra unido a la mesa de estudio mediante la utilización de una estructura metálica sujeta mediante tornillos. Es considerada la principal fuente de vibraciones cuando se encuentra activa.



Ilustración 8 Sistema de refrigeración de cámara reológica constituido por cuatro ventiladores

En esta imagen se observa que además de los cuatro ventiladores, cuenta con un sistema capaz de medir las temperaturas de entrada y salida del refrigerante.

2.3.3 Bancadas

La cámara reológica está constituida por tres bancadas separadas mediante los aisladores indicados anteriormente. En estas, se encuentran fijados la aguja y la cámara con la que se realizan estudios de reológicos. La cámara sobre la tercera bancada y la aguja en la segunda.

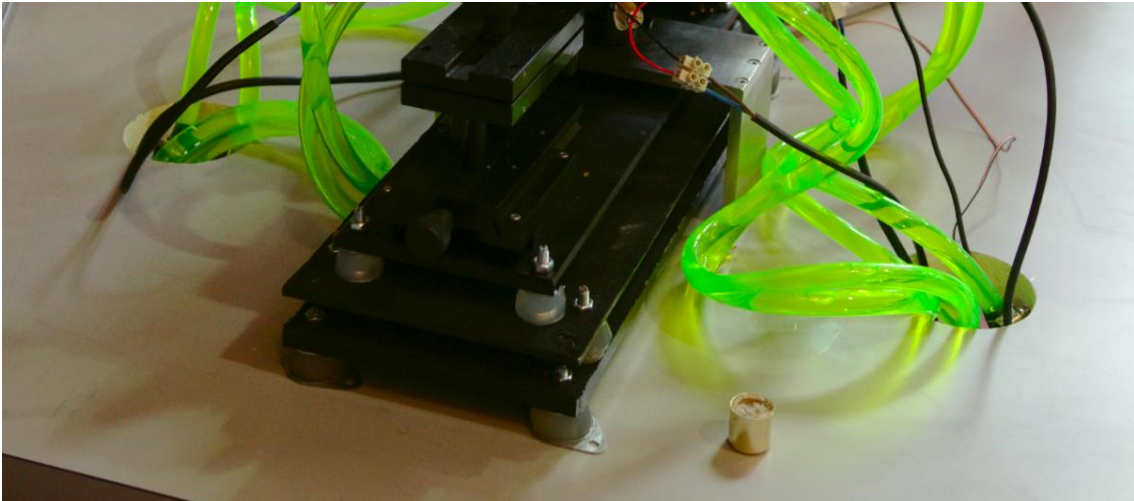


Ilustración 9 Bancada cámara reológica

3. RESULTADOS

3.1 ANÁLISIS GRÁFICO

En este capítulo, se incluirán los resultados obtenidos en los diferentes estudios realizados, indicando la hora, estado de la refrigeración y eje de referencia para facilitar su posterior análisis.

La disposición de las gráficas se basa en la amplitud esperada de vibraciones en cada punto y la necesidad de aislamiento deseado en cada uno de ellos, por tanto, se podrán diferenciar tres columnas de gráficas obtenidas. El punto en el cual se requiere la menor vibración posible dados los usos de la máquina estudiada, será la aguja. Esto es porque cualquier vibración por mínima que esta fuese influiría en los estudios realizados. El segundo punto en importancia a la hora de aislar vibraciones será la micro cámara reológica, la cual realiza la grabación de imágenes a cámara super lenta según las cuales se realizarán diferentes estudios. Por último se estudiará la mesa, en la cual se registra la señal de vibración sin ningún tipo de aislador y por tanto podrá considerarse la misma que la señal origen de vibración.

De este modo, y ordenando de menor a mayor necesidad de aislamiento de vibración, las imágenes se disponen de la siguiente manera. Las gráficas que se encuentran en la parte izquierda se corresponden con los datos obtenidos mediante acelerómetros en la mesa. En la columna central, se encuentran las gráficas correspondientes a la micro cámara. Por último en la columna de la derecha se observan las gráficas correspondientes a las vibraciones registradas en la aguja, con la cual se realizan diferentes estudios de comportamiento de fluidos.

Así mismo, se incluye una descripción gráfica con el objetivo de facilitar la posición real de cada uno de los acelerómetros en los cuales debe estudiarse la vibración.

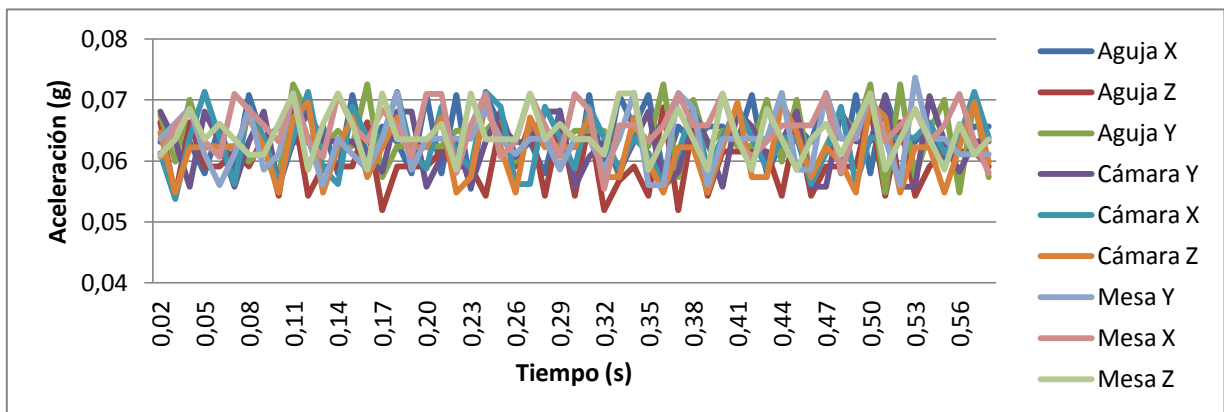


Tabla 4 Vibraciones en el equipo

Prueba 1: En esta secuencia podemos apreciar la variación de frecuencias y la disminución de la amplitud de las mediciones correspondientes al estudio 1 con el equipo de refrigeración apagado.

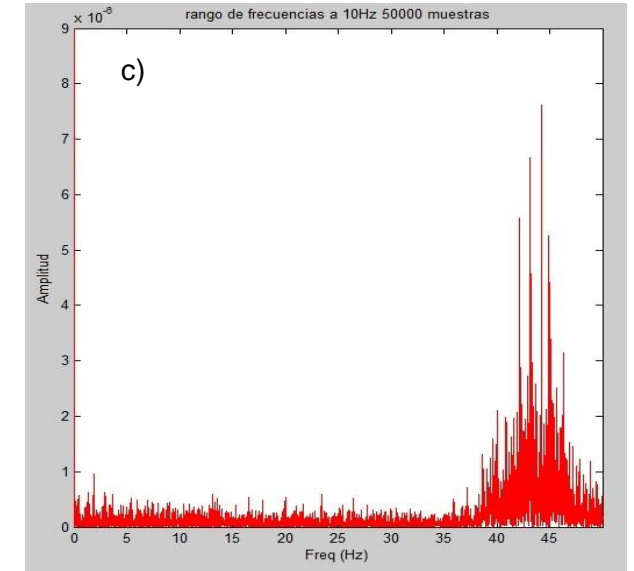
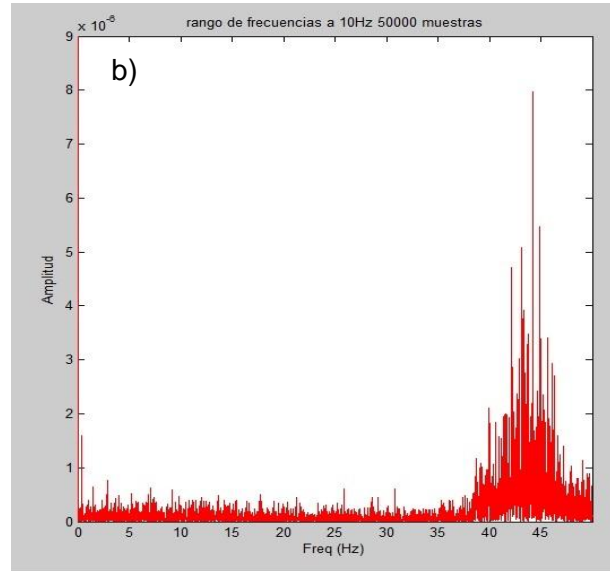
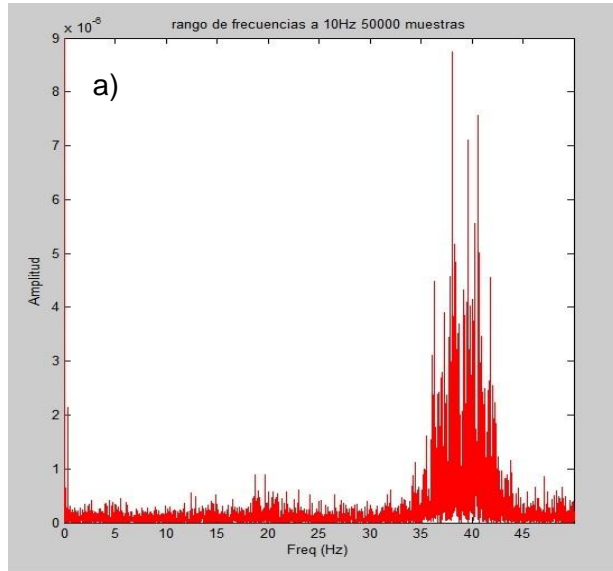


Ilustración 10 Vibraciones eje X. a) Mesa, b) Cámara, c) Aguja

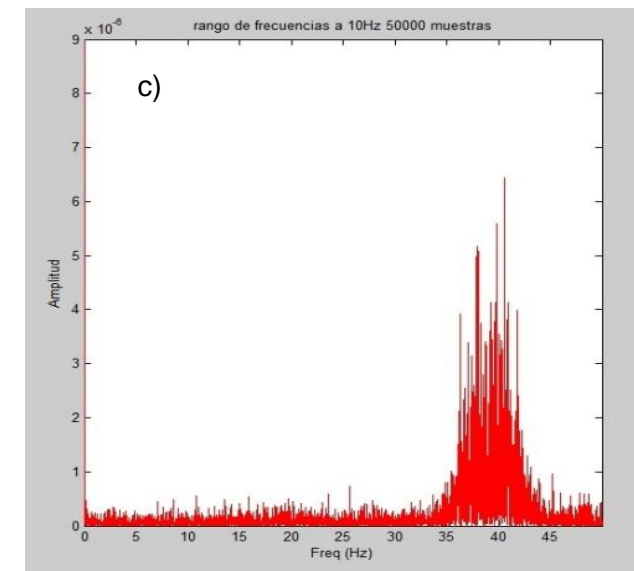
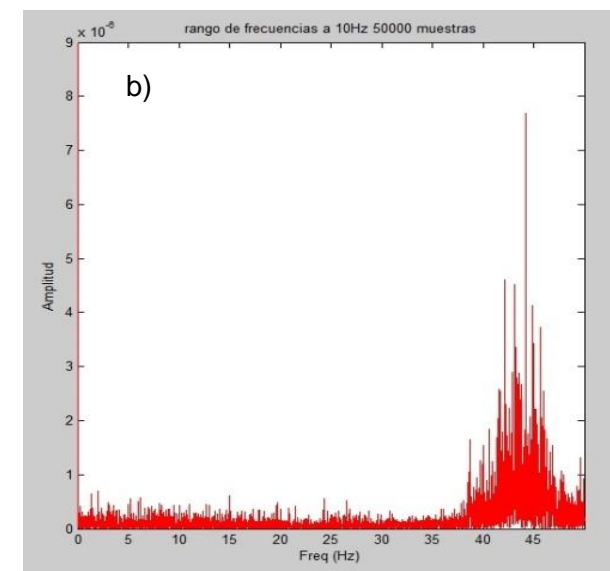
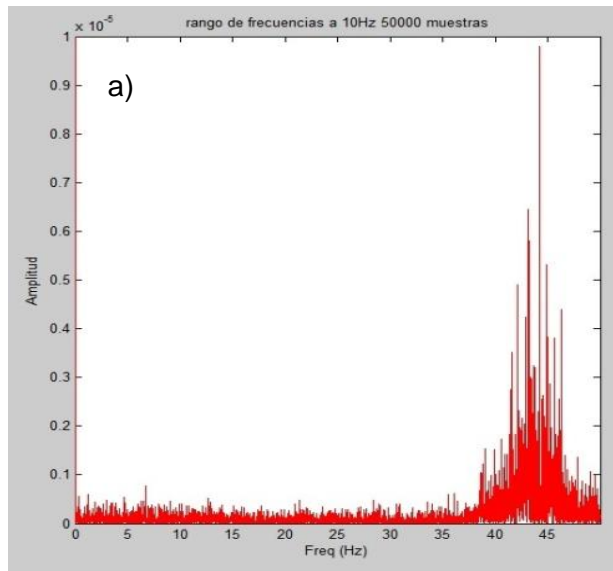


Ilustración 11 Vibraciones eje Y. a) Mesa, b) Cámara, c) Aguja

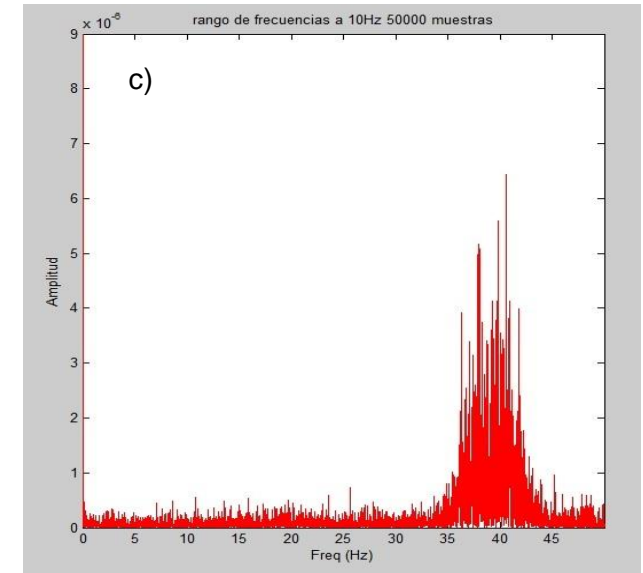
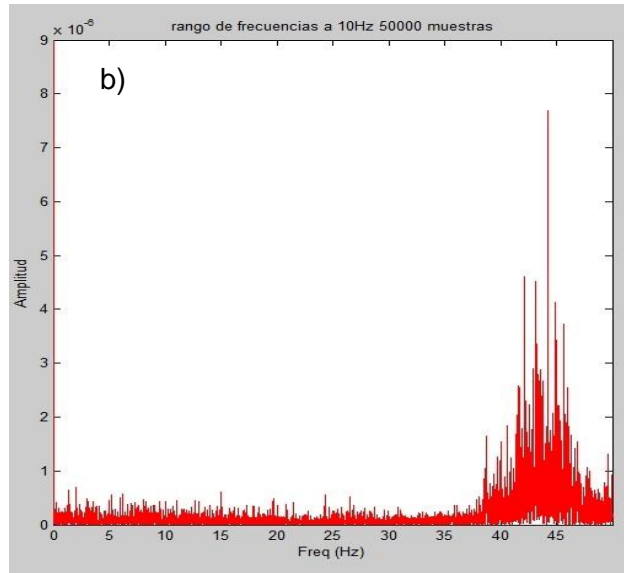
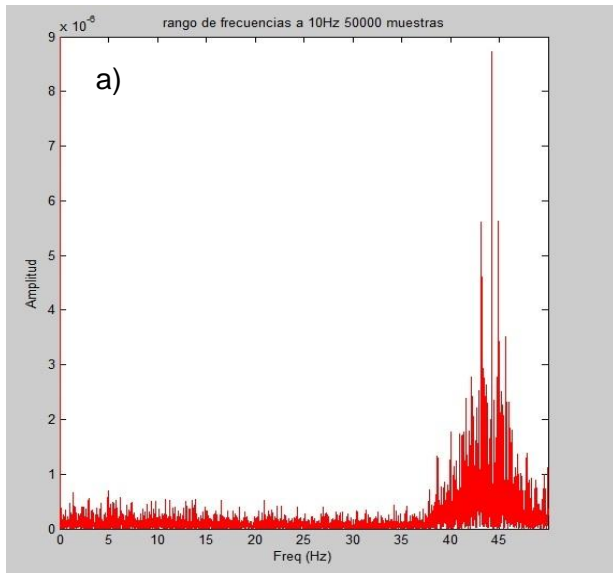


Ilustración 12 Vibraciones eje Z. a) Mesa, b) Cámara, c) Aguja

Prueba 2: En esta secuencia podemos apreciar la variación de frecuencias y la disminución de la amplitud de las mediciones correspondientes al estudio 2 con el equipo de refrigeración apagado

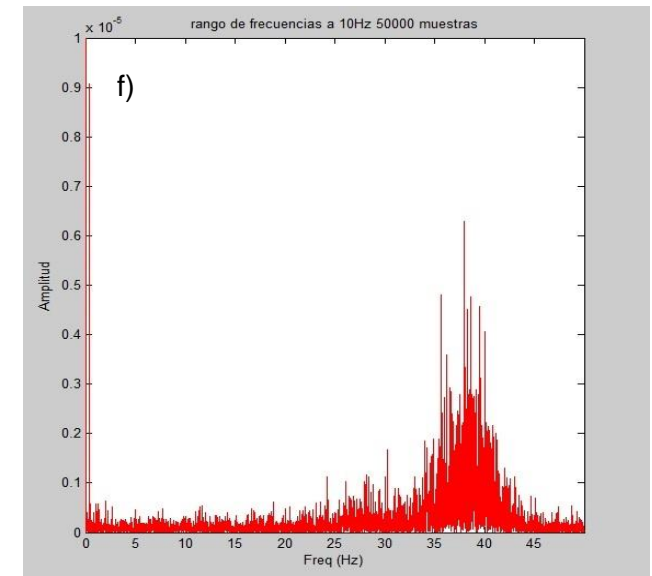
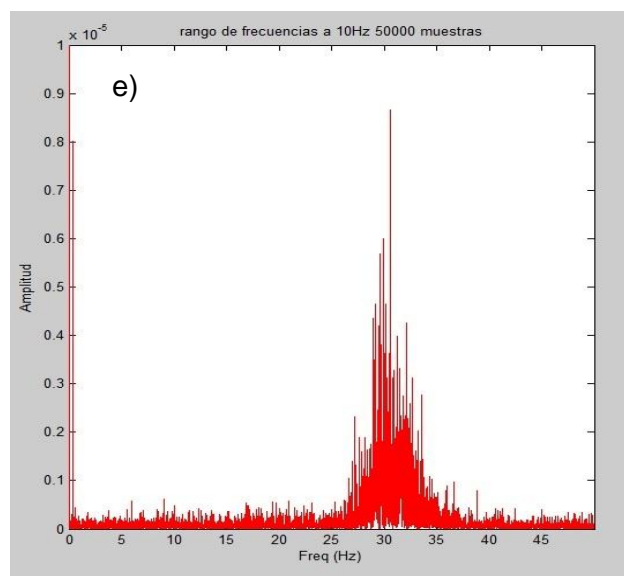
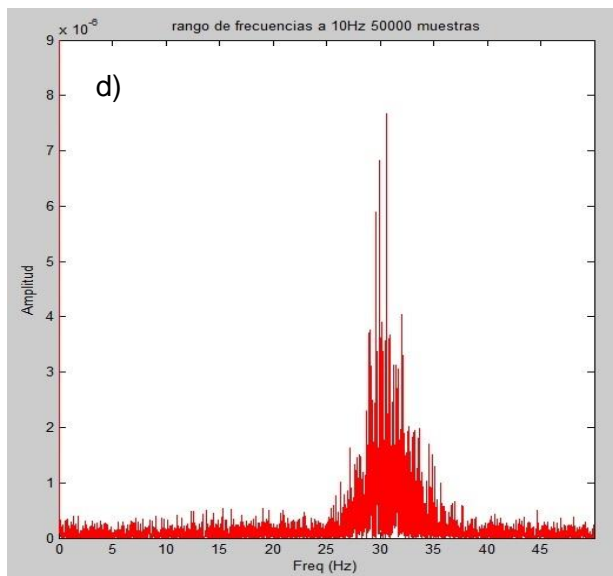


Ilustración 13 Vibraciones eje X. d) Mesa, e) Cámara, f) Aguja

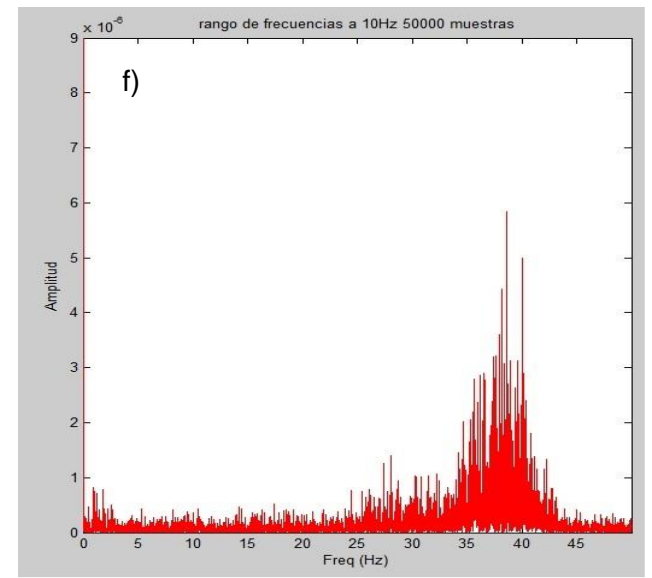
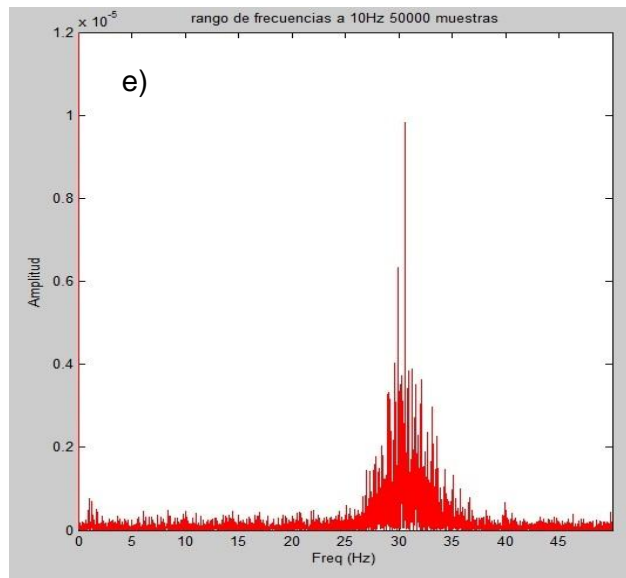
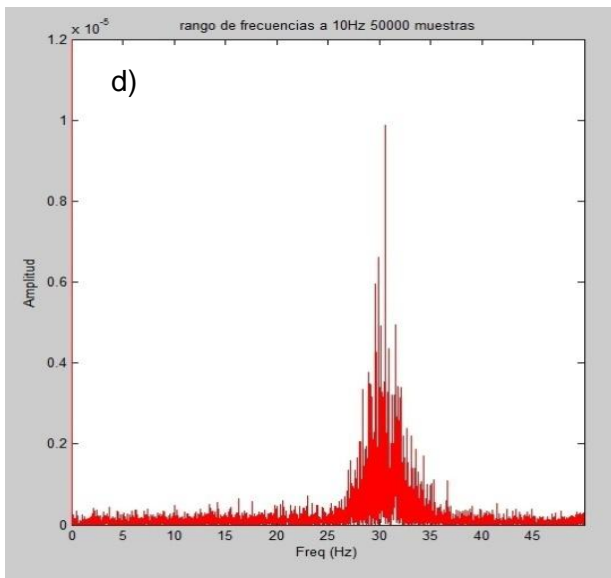


Ilustración 14 Vibraciones eje Y. d) Mesa, e) Cámara, f) Aguja

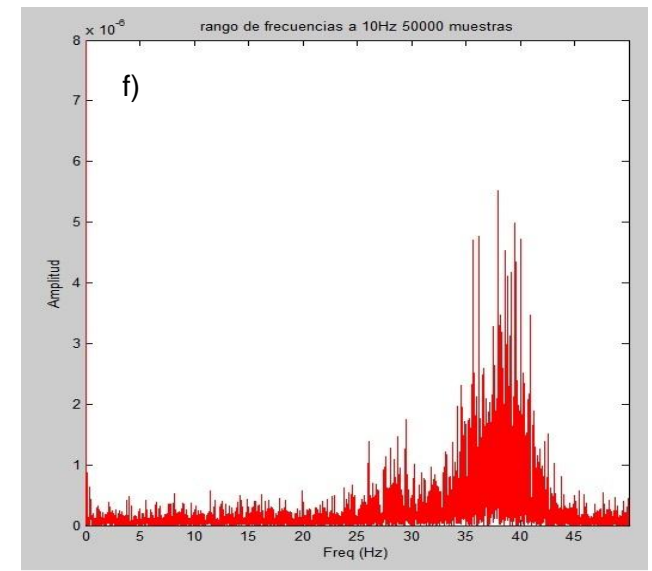
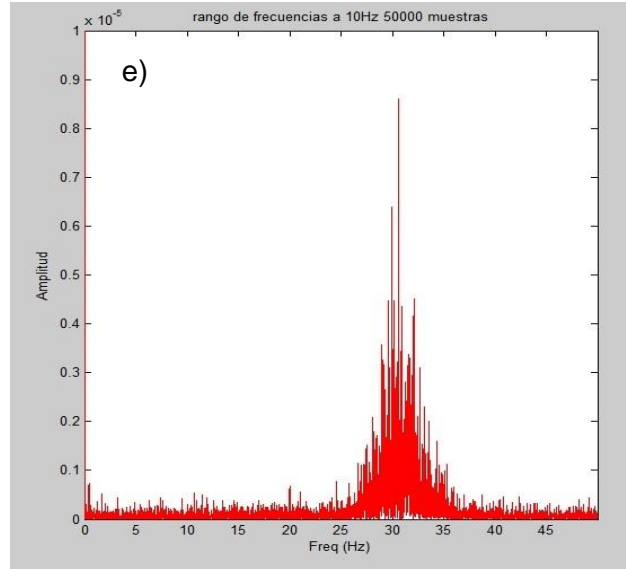
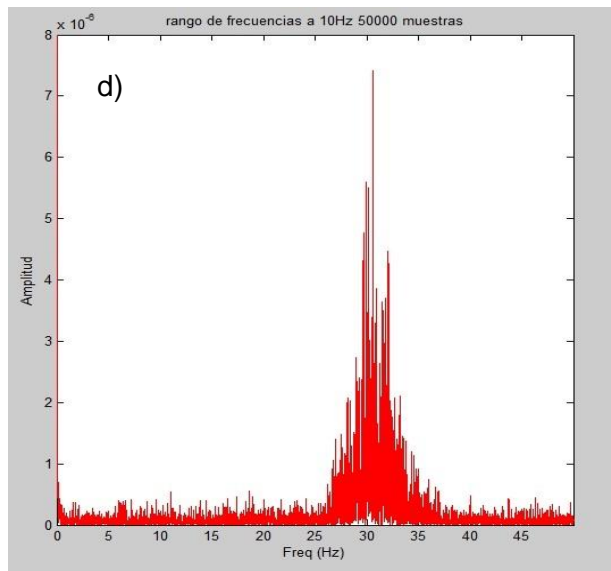


Ilustración 15 Vibraciones eje Z. d) Mesa, e) Cámara, f) Aguja

Prueba 3: En esta secuencia podemos apreciar la variación de frecuencias y la disminución de la amplitud de las mediciones correspondientes al estudio 3 con el equipo de refrigeración apagado.

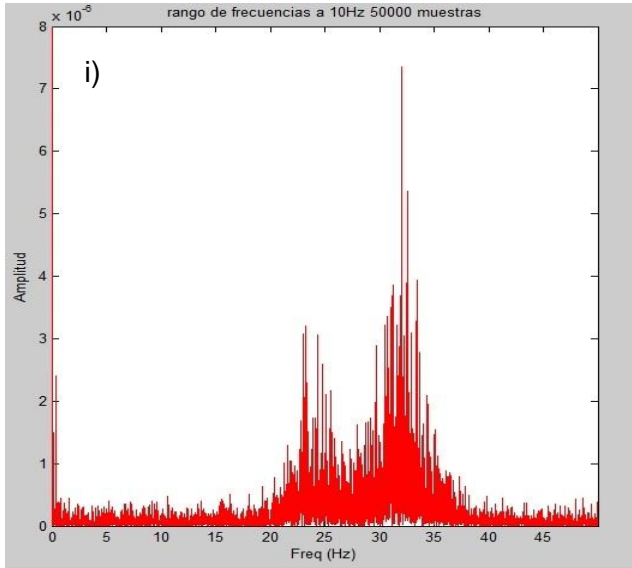
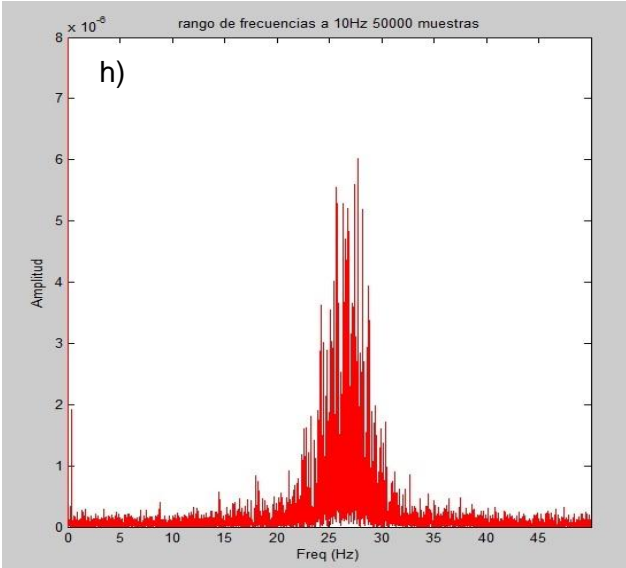
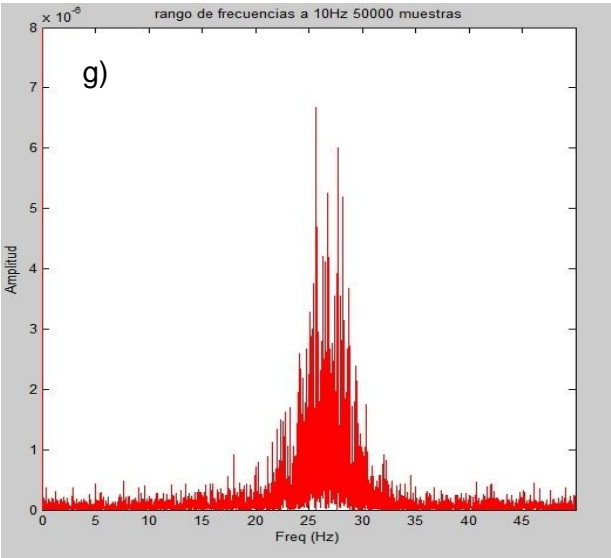


Ilustración 16 Vibraciones eje X. g) Mesa, h) Cámara, i) Aguja

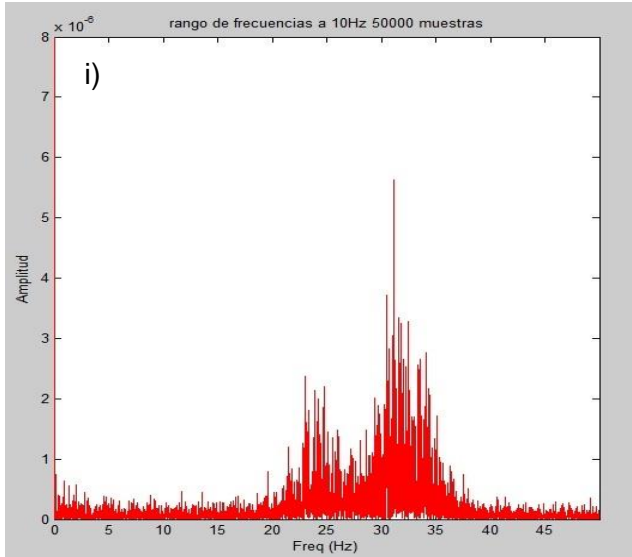
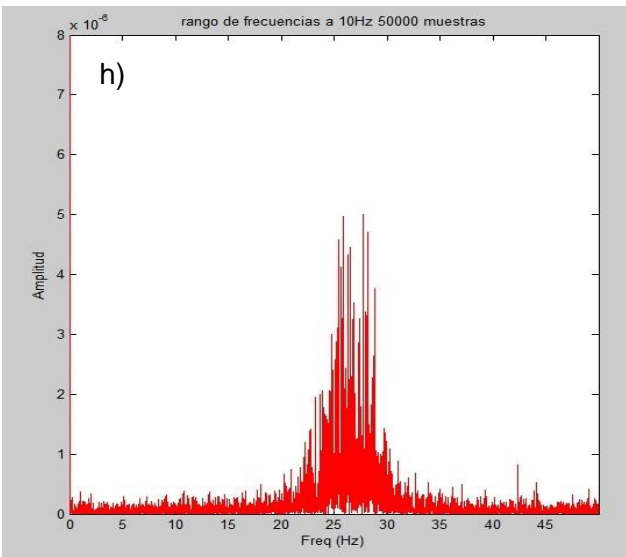
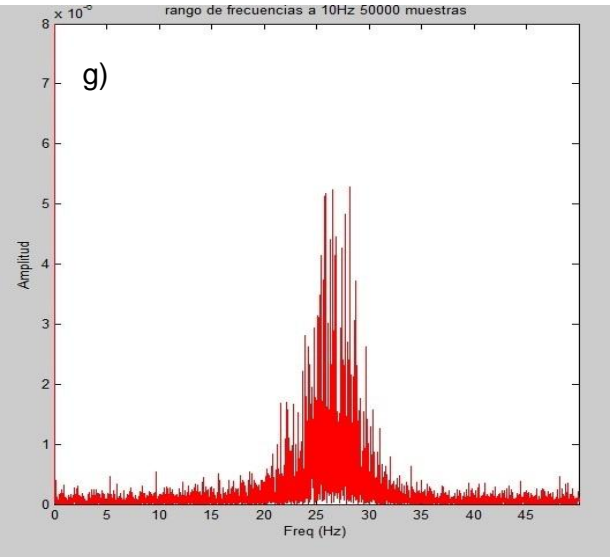


Ilustración 17 Vibraciones eje Y. g) Mesa, h) Cámara, i) Aguja

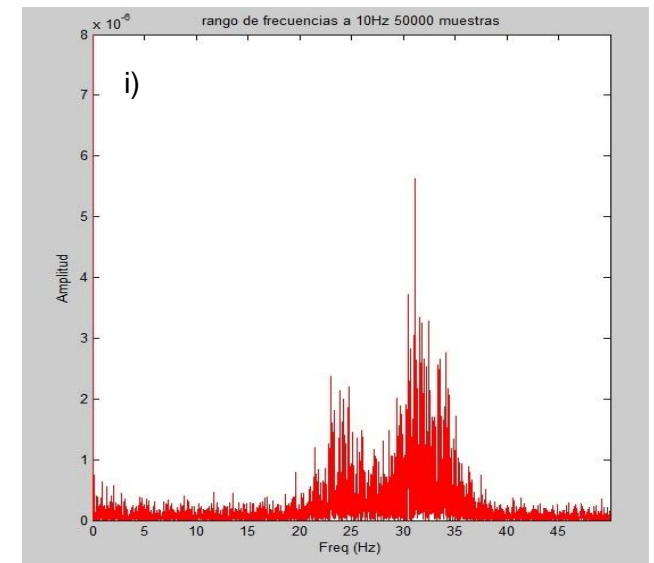
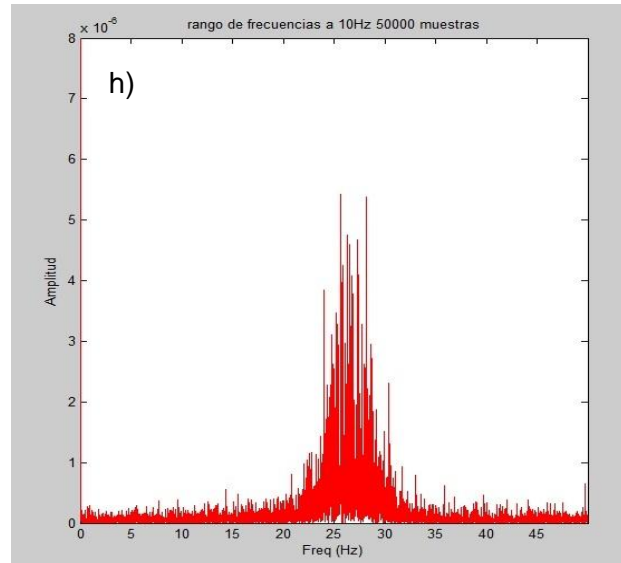
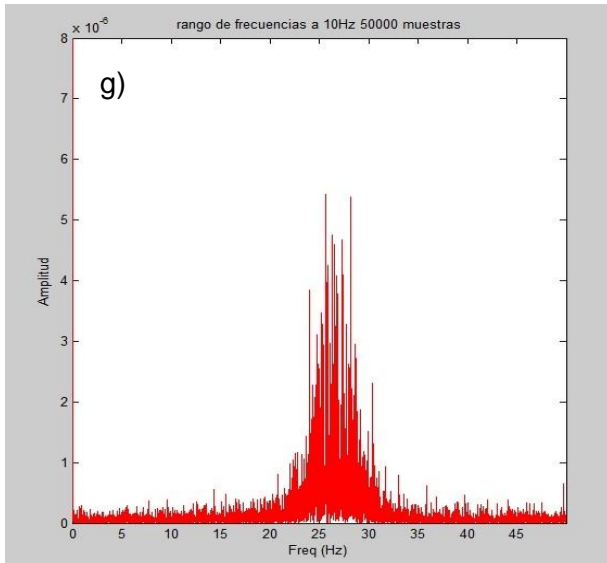


Ilustración 18 Vibraciones eje Z. g) Mesa, h) Cámara, i) Aguja

Prueba 4: En esta secuencia podemos apreciar la variación de frecuencias y la disminución de la amplitud de las mediciones correspondientes al estudio 2 con el equipo de refrigeración apagado

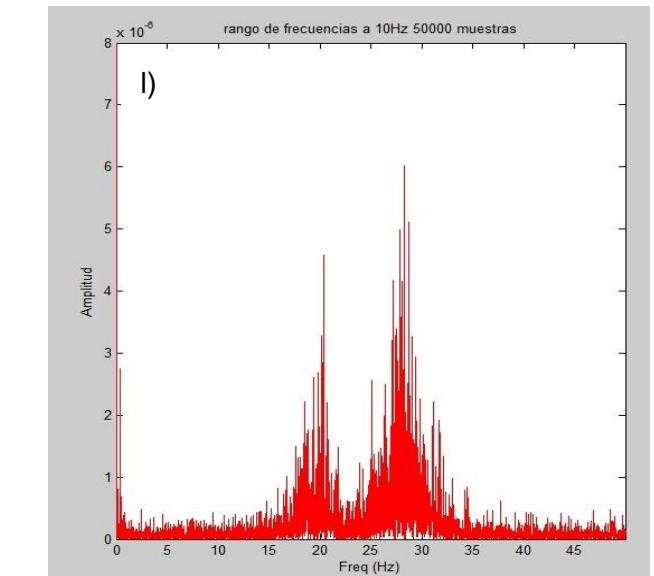
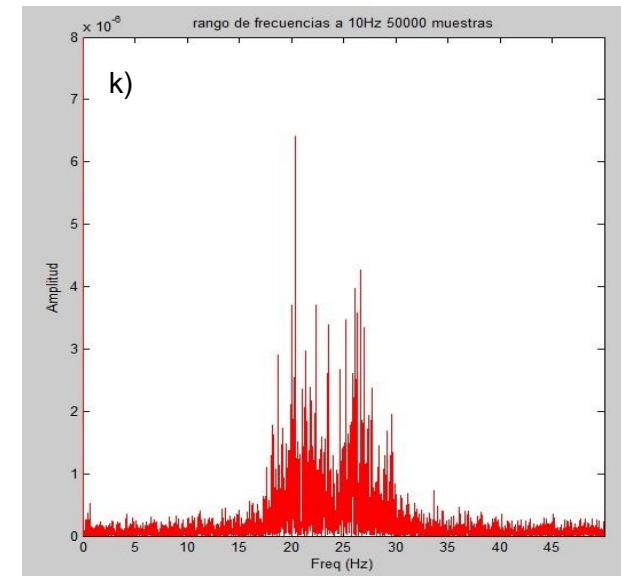
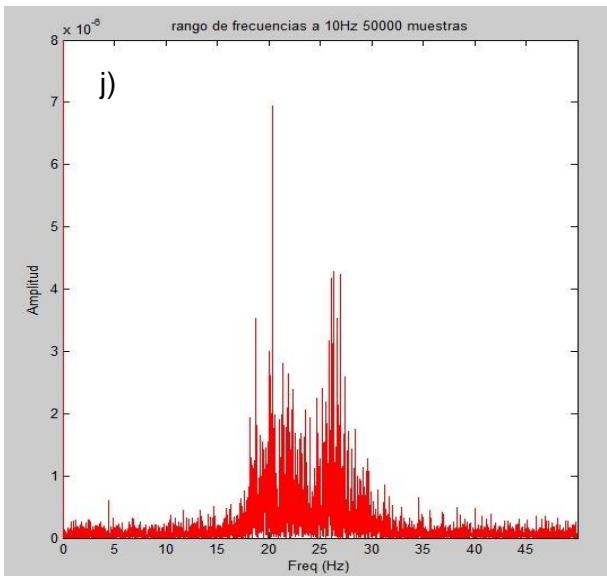


Ilustración 19 Vibraciones eje X. j) Mesa, k) Cámara, l) Aguja

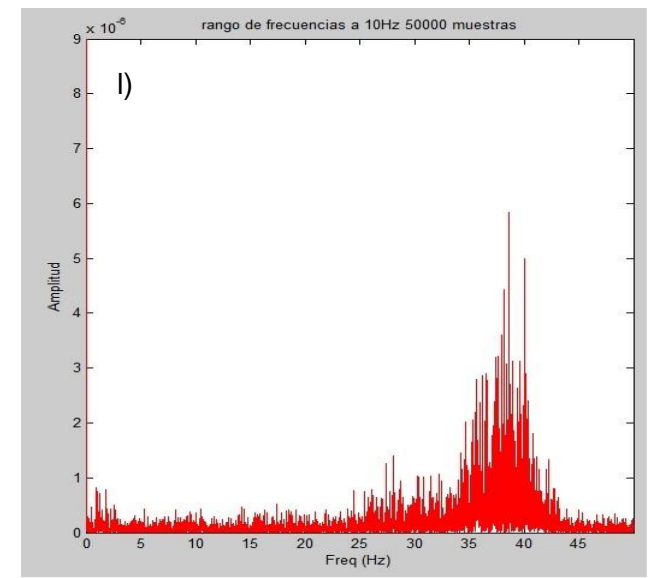
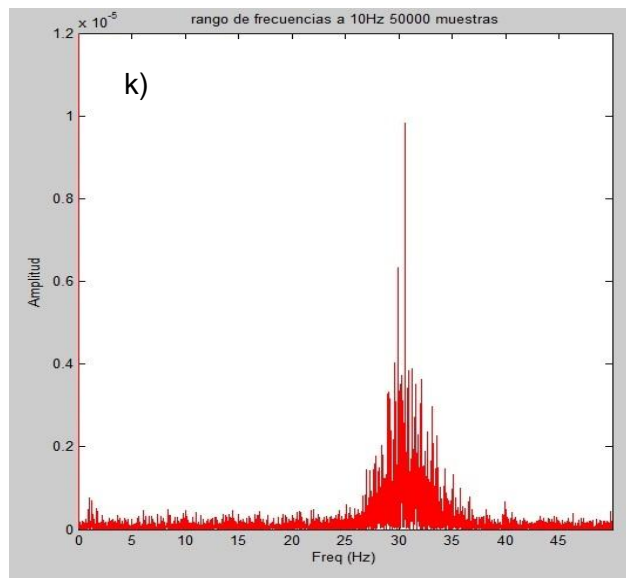
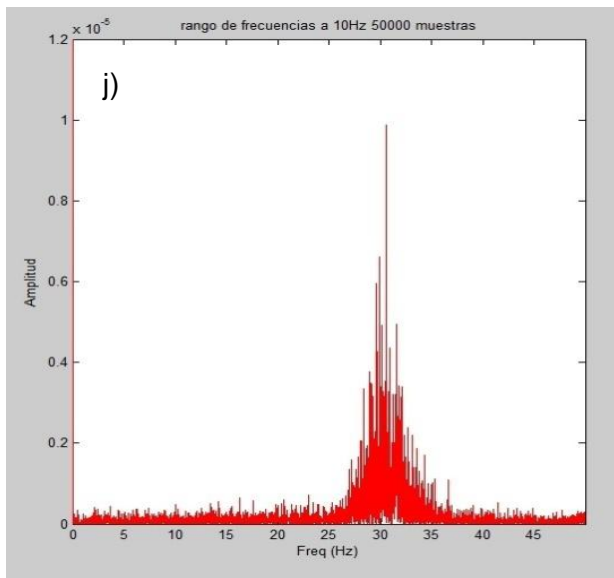


Ilustración 20 Vibraciones eje Y. j) Mesa, k) Cámara, l) Aguja

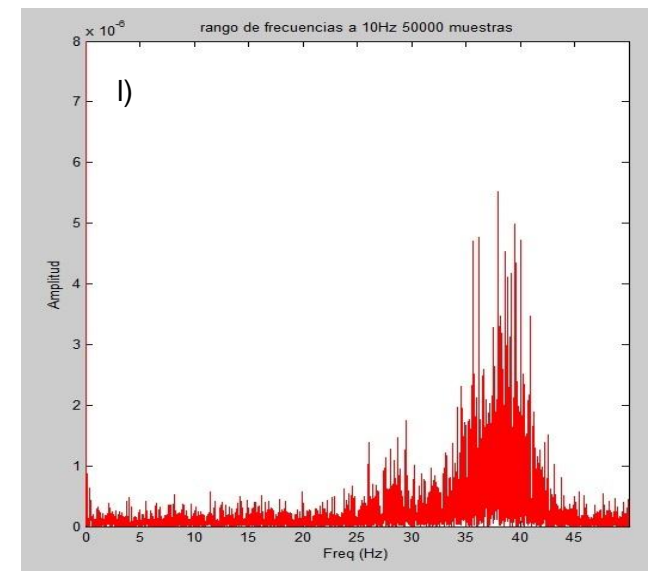
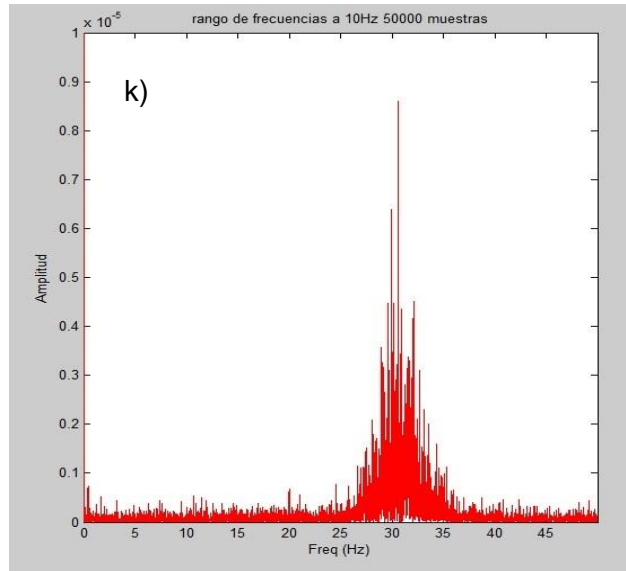
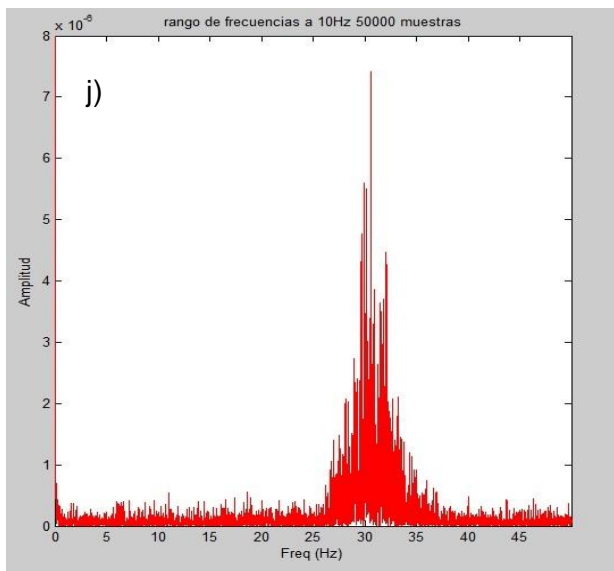


Ilustración 21 Vibraciones eje Z. j) Mesa, k) Cámara, l) Aguja

Prueba 5: En esta secuencia podemos apreciar la variación de frecuencias y la disminución de la amplitud de las mediciones correspondientes al estudio 5 con el equipo de refrigeración encendido.

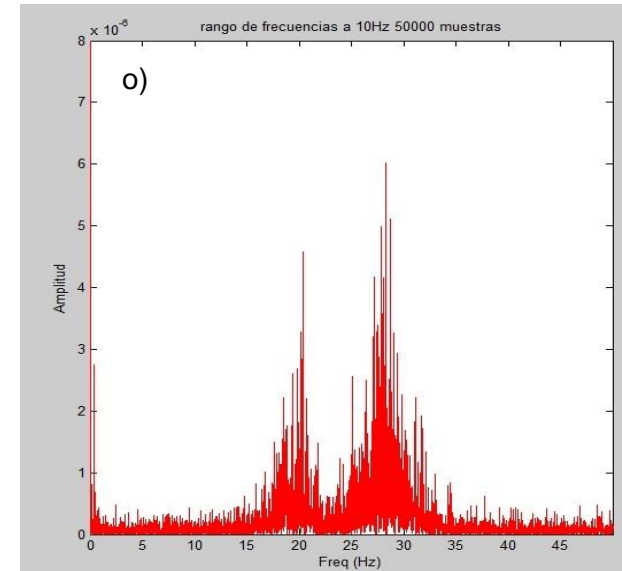
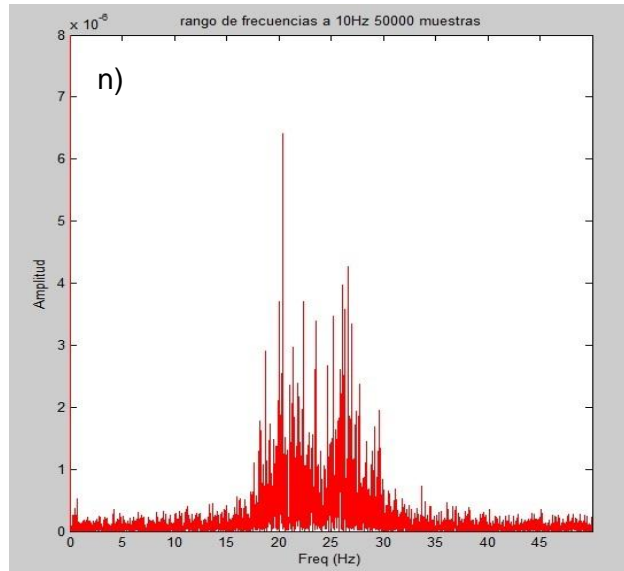
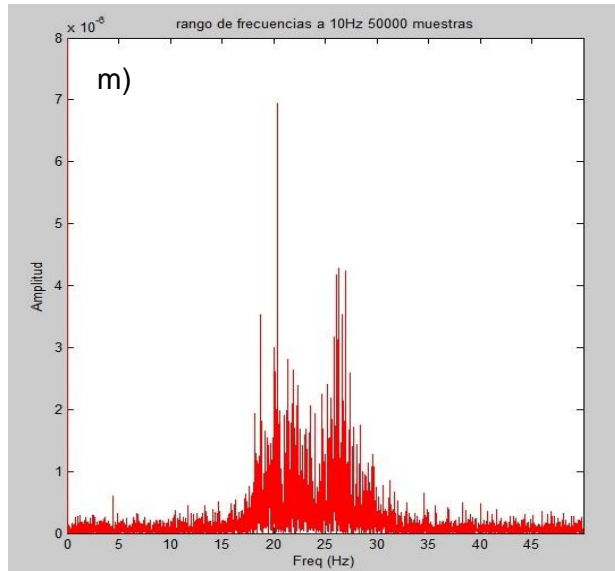


Ilustración 22 Vibraciones eje X. m) Mesa, n) Cámara, o) Aguja

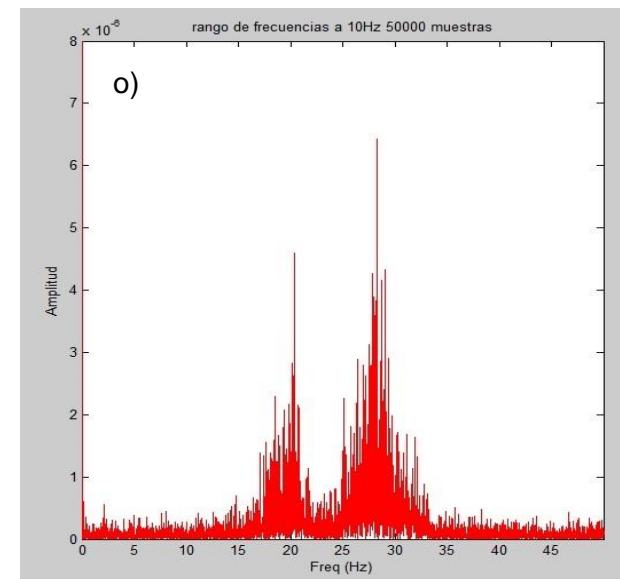
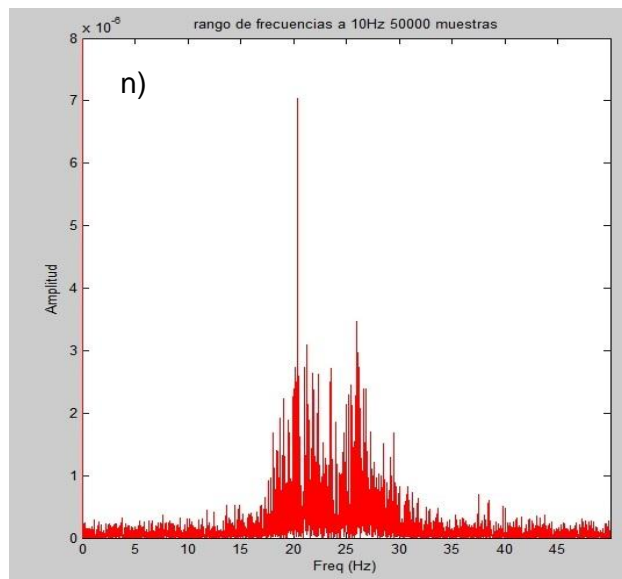
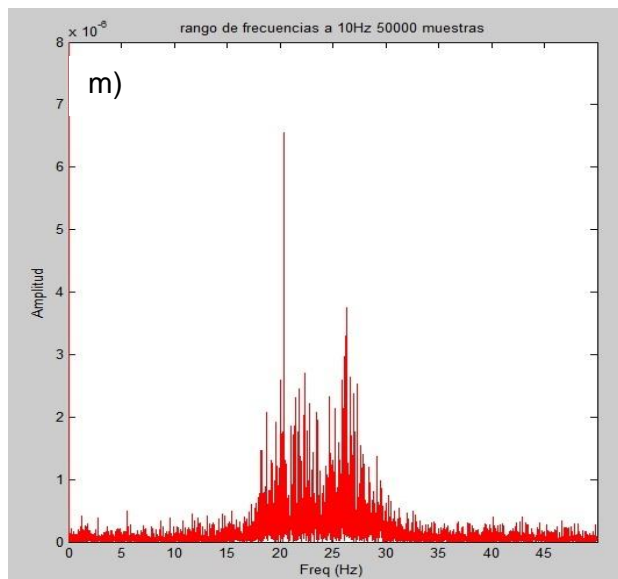


Ilustración 23 Vibraciones eje Y. m) Mesa, n) Cámara, o) Aguja

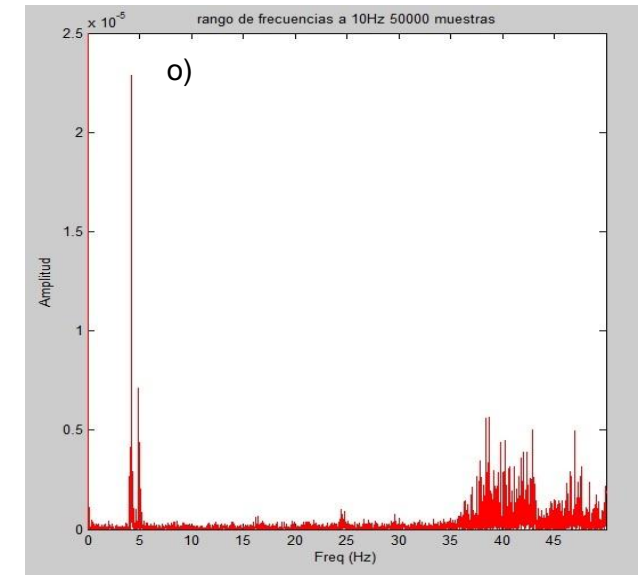
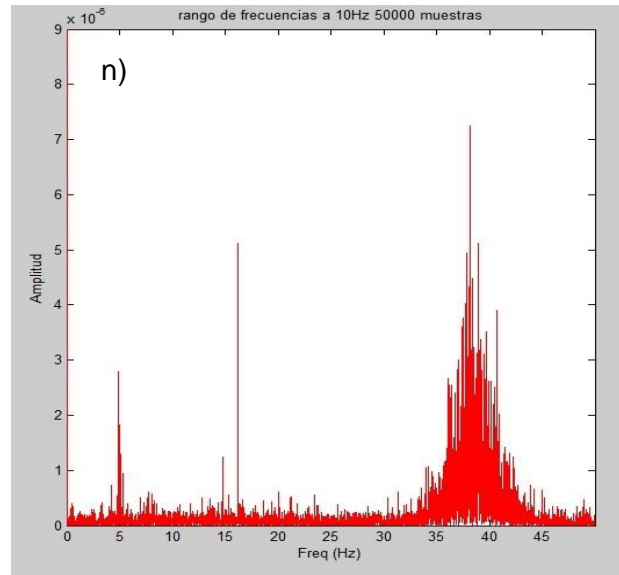
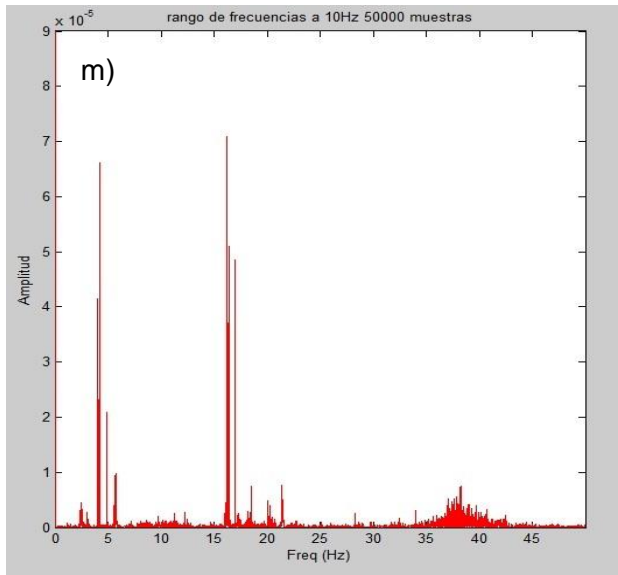


Ilustración 24 Vibraciones eje Z. m) Mesa, n) Cámara, o) Aguja

Prueba 6: En esta secuencia podemos apreciar la variación de frecuencias y la disminución de la amplitud de las mediciones correspondientes al estudio 6 con el equipo de refrigeración encendido

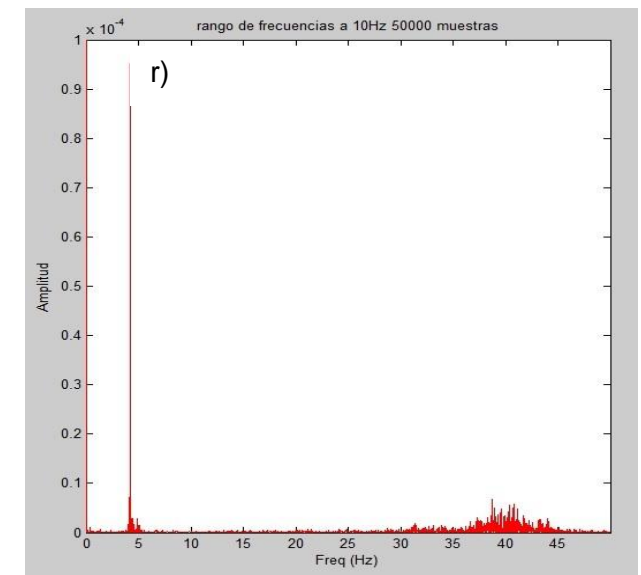
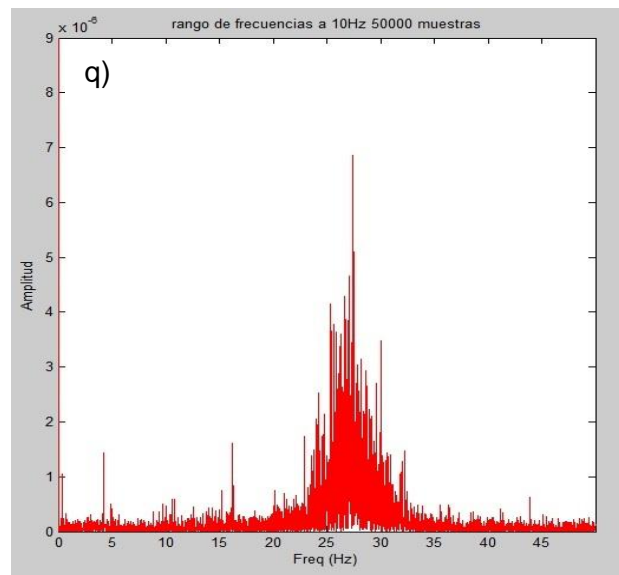
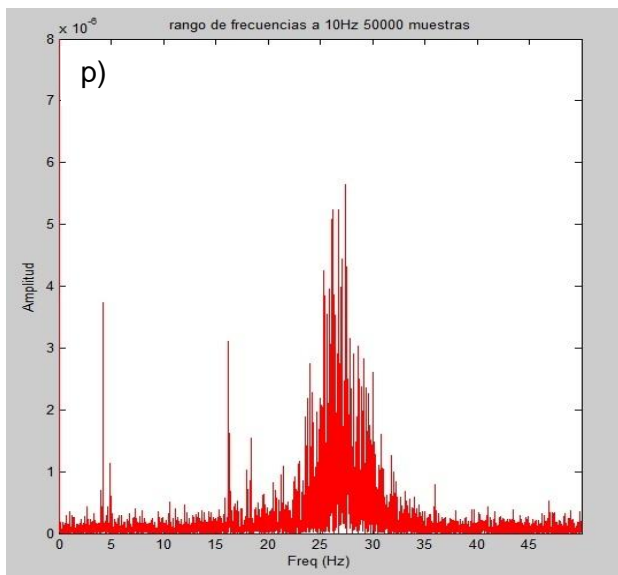


Ilustración 25 Vibraciones eje X. p) Mesa, q) Cámara, r) Aguja

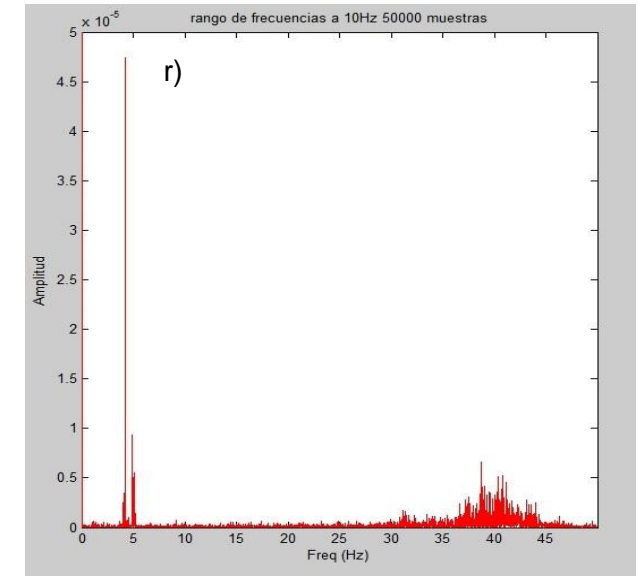
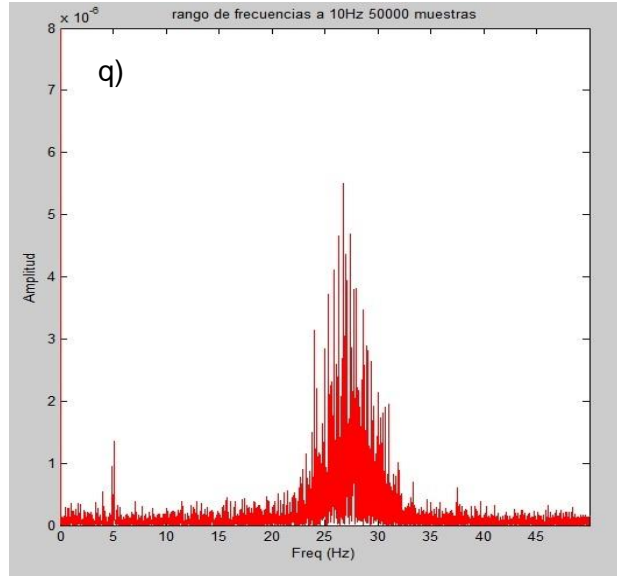
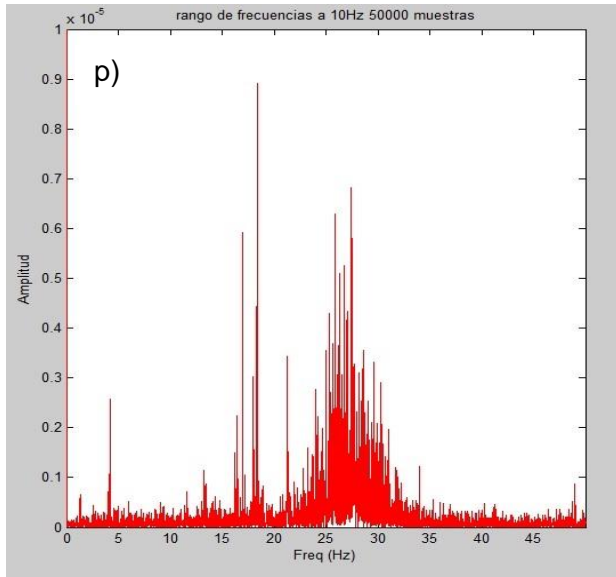


Ilustración 26 Vibraciones eje Y. p) Mesa, q) Cámara, r) Aguja

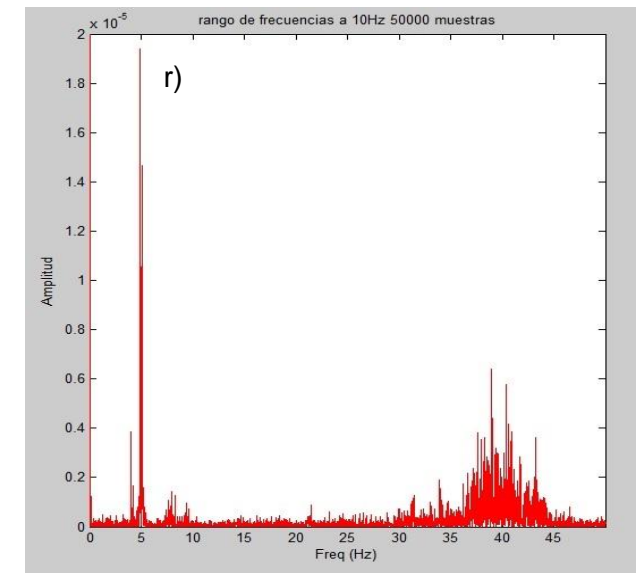
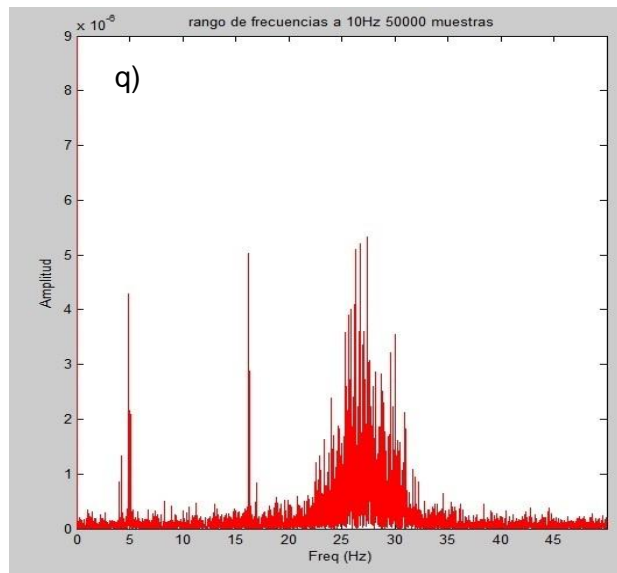
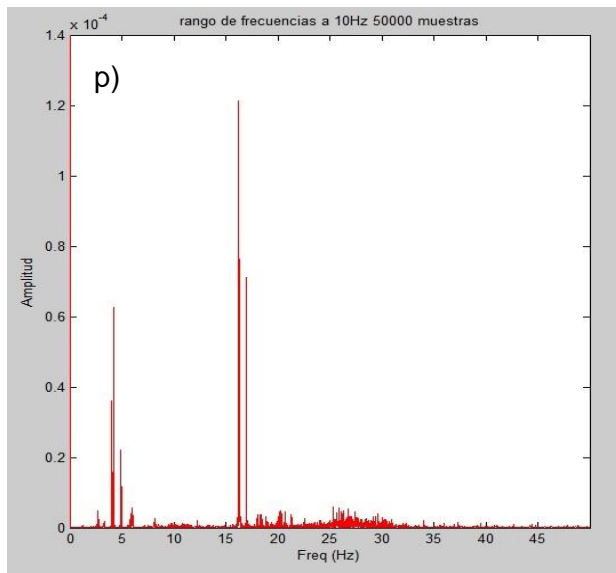


Ilustración 27 Vibraciones eje Z. p) Mesa, q) Cámara, r) Aguja

Prueba 7: En esta secuencia podemos apreciar la variación de frecuencias y la disminución de la amplitud de las mediciones correspondientes al estudio 7 con el equipo de refrigeración encendido.

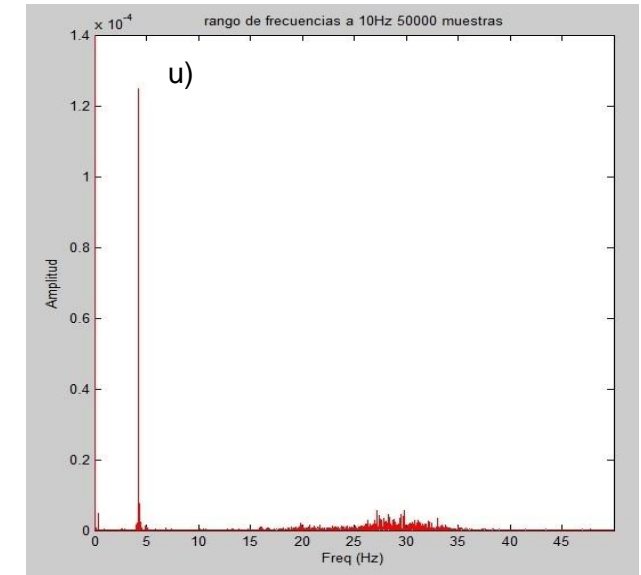
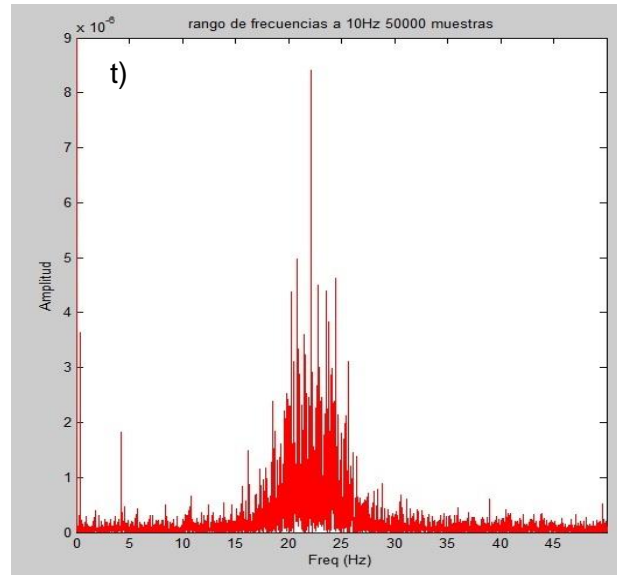
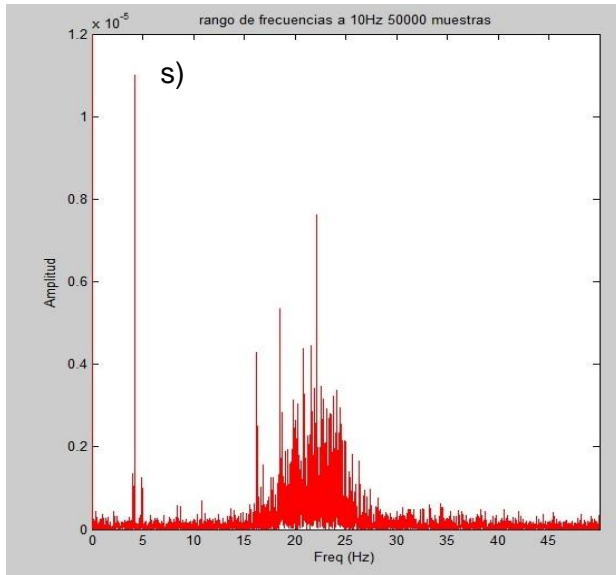


Ilustración 28 Vibraciones eje X. s) Mesa, t) Cámara, u) Aguja

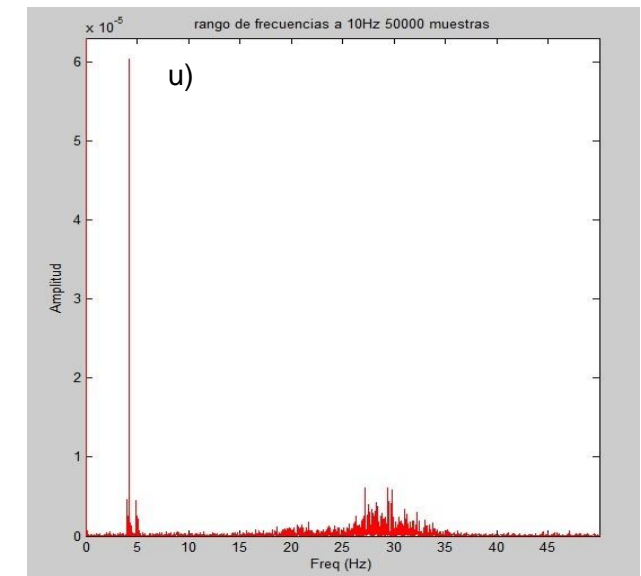
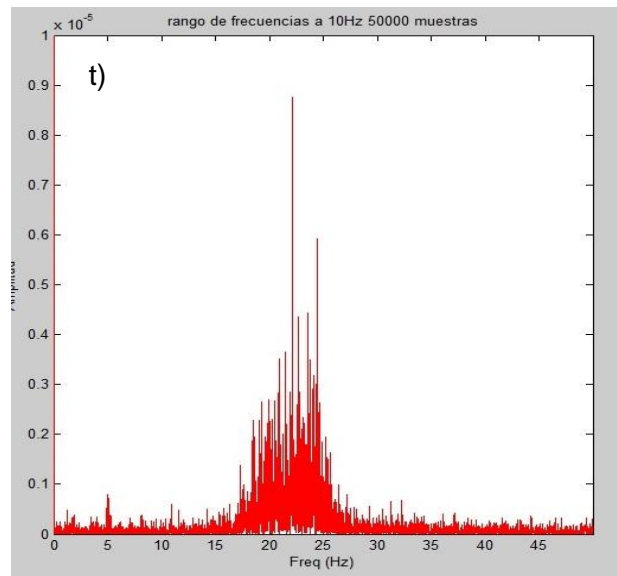
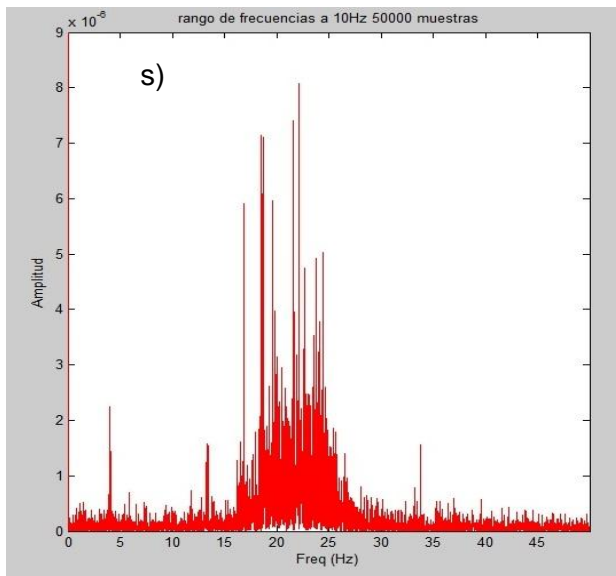


Ilustración 29 Vibraciones eje Y. s) Mesa, t) Cámara, u) Aguja

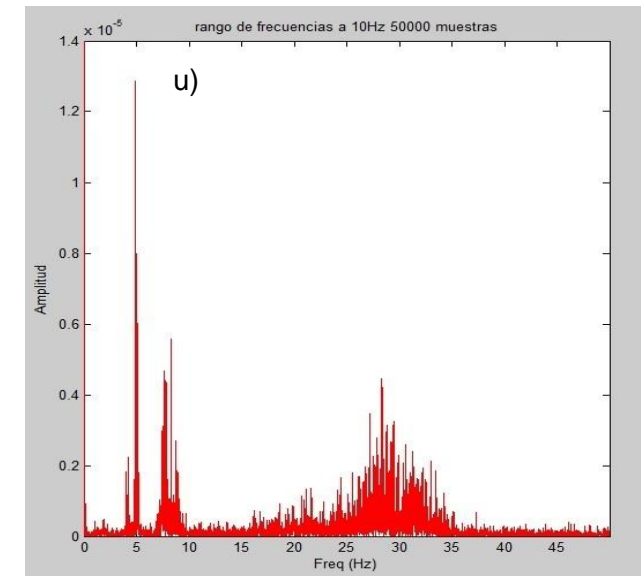
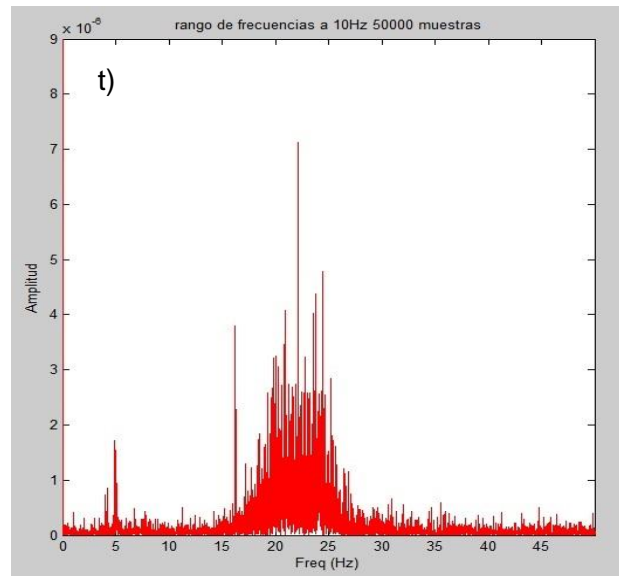
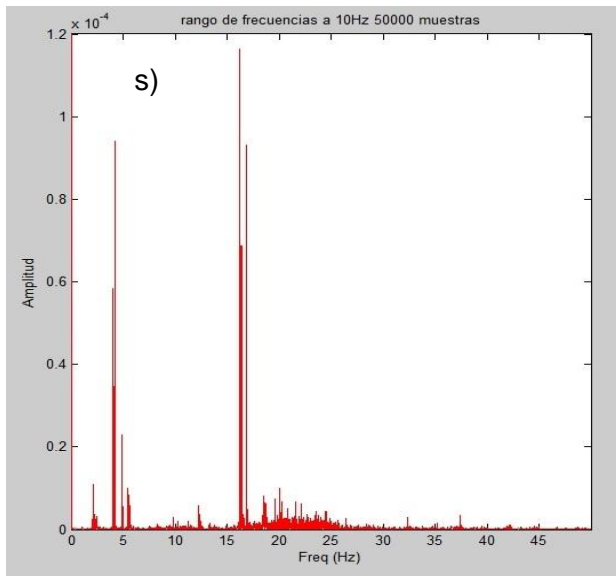


Ilustración 30 Vibraciones eje Z. s) Mesa, t) Cámara, u) Aguja

Prueba 8: En esta secuencia podemos apreciar la variación de frecuencias y la disminución de la amplitud de las mediciones correspondientes al estudio 8 con el equipo de refrigeración encendido

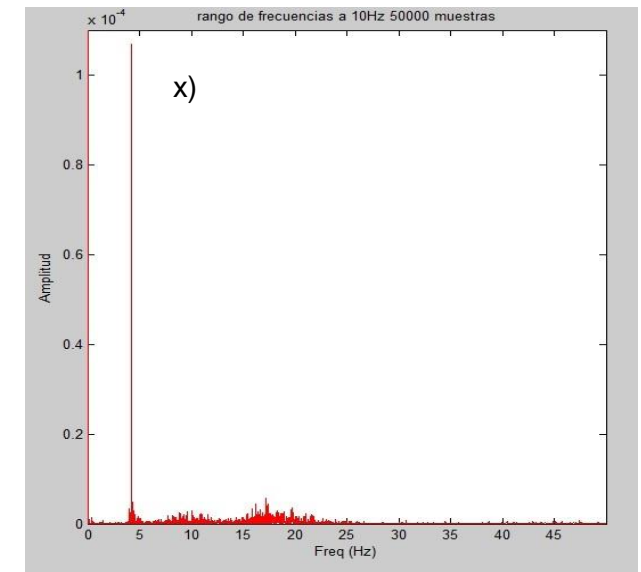
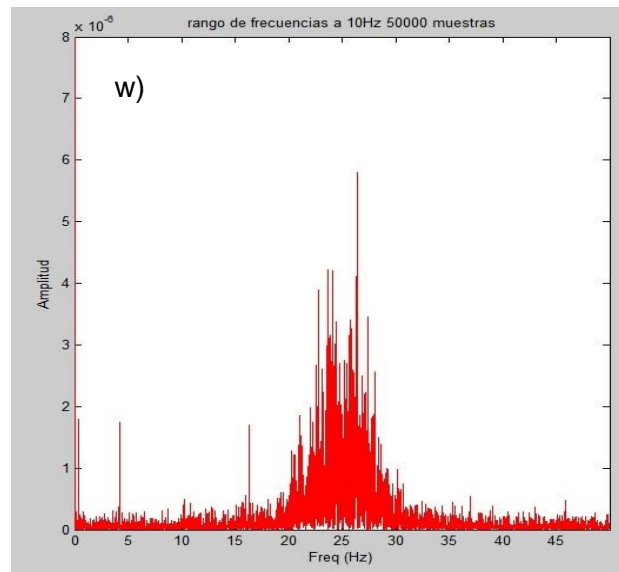
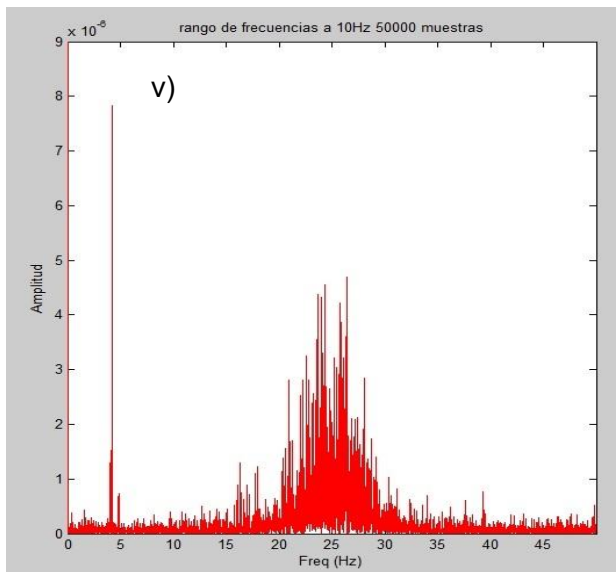


Ilustración 31 Vibraciones eje X. v) Mesa, w) Cámara, x) Aguja

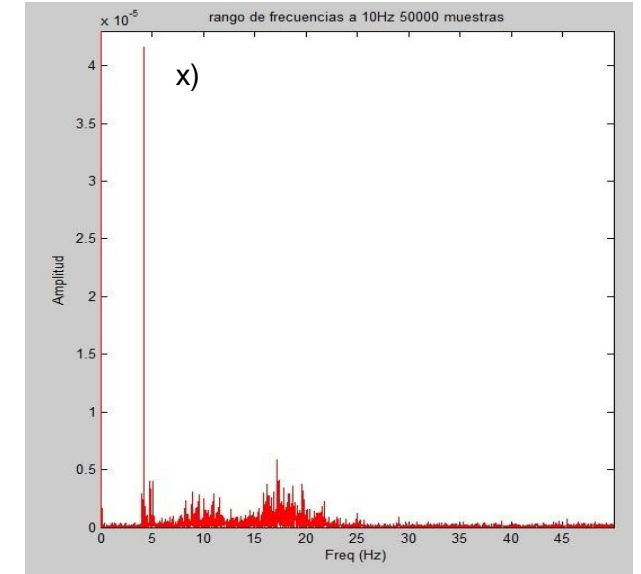
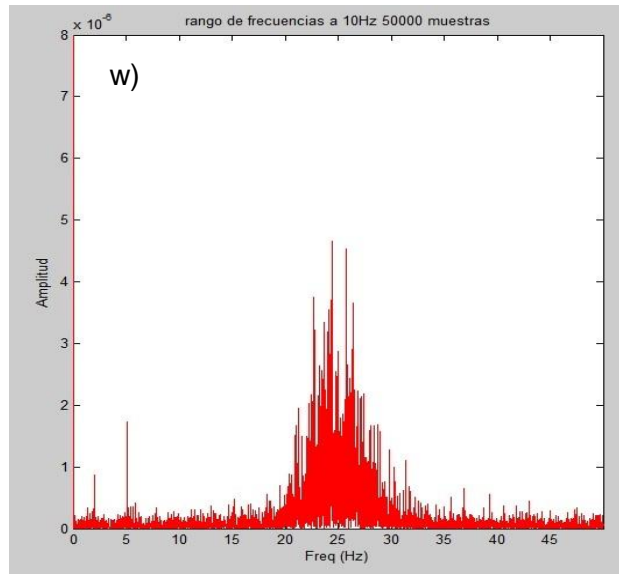
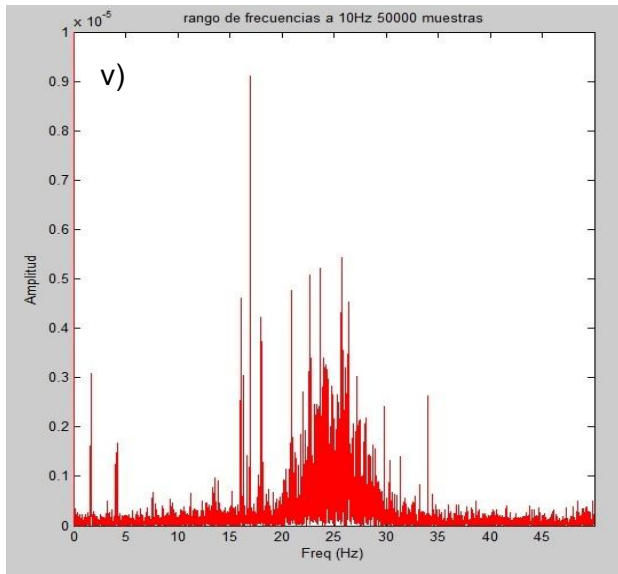


Ilustración 32 Vibraciones eje Y. v) Mesa, w) Cámara, x) Aguja

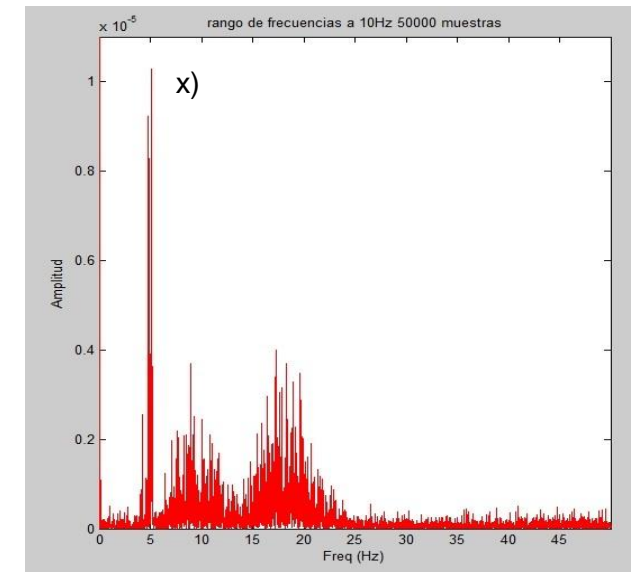
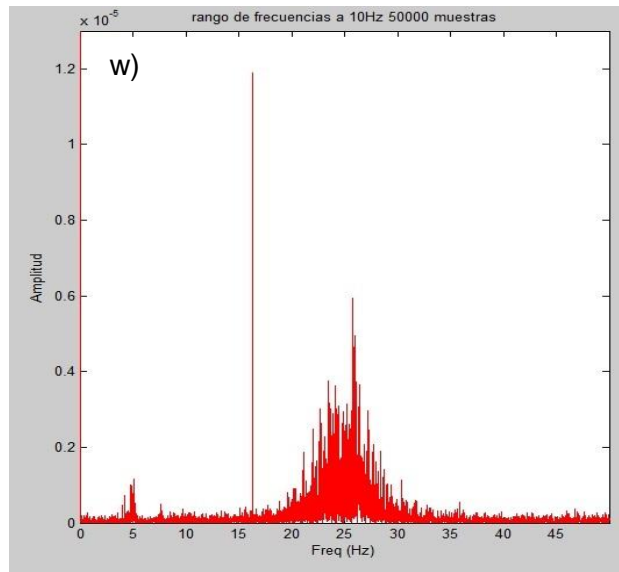
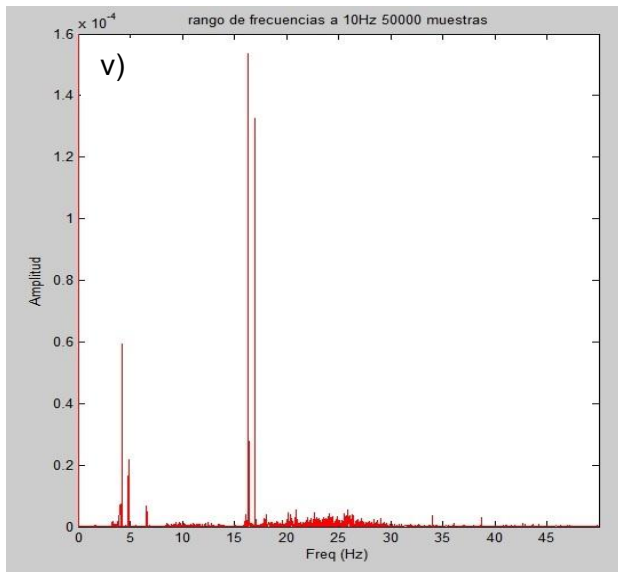


Ilustración 33 Vibraciones eje Z. v) Mesa, w) Cámara, x) Aguja

3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado, primeramente se analizarán los resultados obtenidos con el fin de detectar posibles defectos en el diseño. Para ello, se observarán los datos obtenidos mediante la comparación de las gráficas tras el tratamiento de señales y la correspondiente transformación mediante la FFT. De esta manera se podrán detectar posibles problemas de diseño o el incorrecto funcionamiento de los aisladores de vibraciones

Una vez conocidas las características técnicas de cada uno de los aisladores de vibraciones empleados en su fabricación, se realizará también una comparativa de los resultados obtenidos y los resultados que cabría esperar en función de las características conocidas con anterioridad. Para ello, las frecuencias de vibración registradas en la mesa serán tomadas como fuente de vibración de los demás elementos que componen el sistema a estudiar.

3.2.1 Análisis de disipación de vibraciones en los tres ejes principales

Mediante la comparación gráfica de las señales a lo largo de las diferentes etapas de aislamiento, se obtiene un patrón de vibraciones las cuales pueden ser debidas al ruido presente en el taller en el cual se realizaron las mediciones.

Inicialmente se realiza un análisis del comportamiento de los tres elementos en los cuales se requiere conocer las vibraciones (mesa, cámara y aguja) diferenciando el modo de refrigeración activa e inactiva y posteriormente se estudiarán las similitudes de comportamiento existentes entre ambas detectando posibles defectos de aislamiento de vibraciones.

Conociendo que la amplitud aportada en las gráficas corresponde con la fuerza de excitación se podrá estimar una transmisibilidad, la cual es el cociente entre la fuerza transmitida y la fuerza de excitación

Cuando la frecuencia de excitación coincide con una de las frecuencias naturales del sistema, se produce el fenómeno de resonancia, en el cual se amplifican las vibraciones del sistema propiciando grandes desplazamientos, por tanto son un punto a tener en cuenta en el estudio realizado con el fin de identificarlas y tratar de evitar estas frecuencias de vibración.

3.2.2 Introducción al análisis de señales

El criterio seguido en el análisis de los resultados obtenidos es el siguiente.

Los datos obtenidos serán analizados en el espectro de frecuencias. Dado que no existen valores superiores a los 50 Hz, el rango de frecuencias estudiado estará comprendido entre los 0 y los 50 Hz.

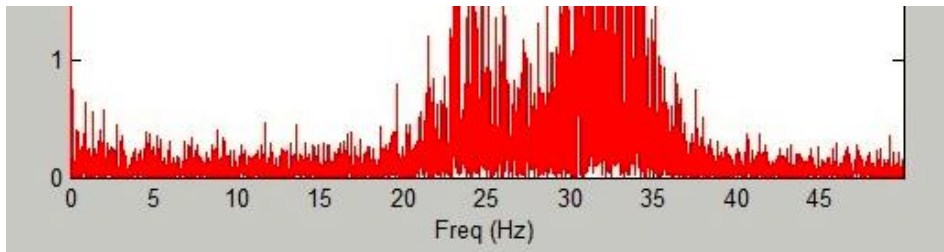


Ilustración 34 Espectro de frecuencias

A la hora de analizar los resultados obtenidos de la amplitud, se deben tener en cuenta los índices de los valores en las cuales se obtienen dichos resultados puesto que se encuentran entre los 10^{-4} y 10^{-6} N lo cual supone diferencias de hasta 100 veces el valor de dicha amplitud. Los valores de la amplitud se muestran en el eje Y de la gráfica y son los valores que tratan de disminuirse mediante la colocación de aisladores de vibraciones o silentblocks.

En primer lugar, se deben buscar puntos en los cuales exista una concentración de vibraciones, para ello se tendrán en cuenta tanto la amplitud como el rango de frecuencias en el que estas se encuentran. El motivo por el cual se analiza el rango de frecuencias y no cada una de las frecuencias de forma individual reside en la variabilidad de los resultados obtenidos en cada una de las mediciones realizadas y la necesidad de aislar las vibraciones existentes en los tres ejes mediante un único tipo aislador por etapa.

Como punto de partida, las vibraciones medidas en la mesa serán tomadas como referencia por ser las únicas que no cuentan con etapas de aislación de vibraciones y por tanto serán las más cercanas al valor real de la señal existente.

En la siguiente figura, pueden apreciarse claramente dos rangos de vibraciones identificados como (1) y (2)

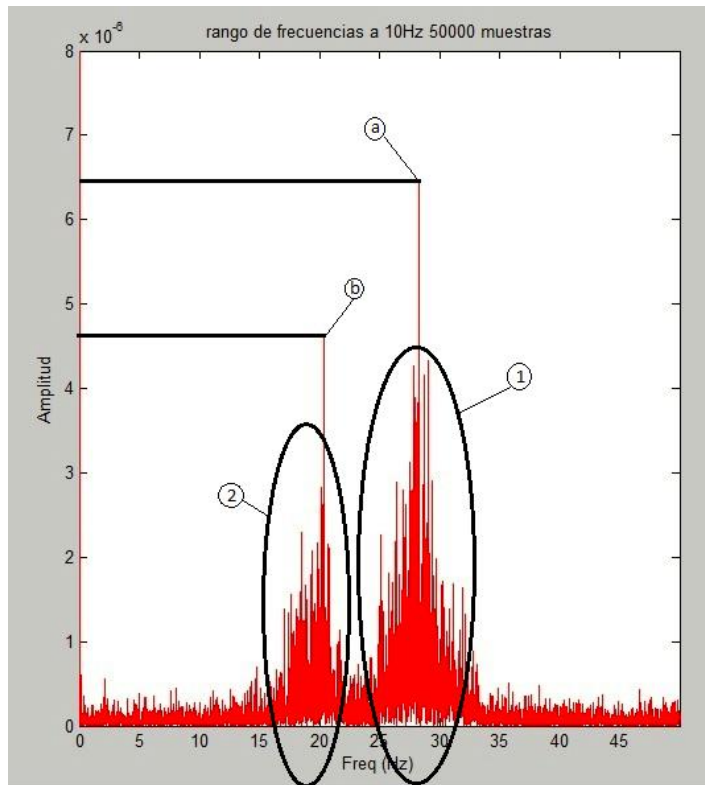


Ilustración 35 Explicación análisis de datos

Posteriormente, se debe analizar la amplitud de cada una de las vibraciones para poder comprobar el correcto funcionamiento de los silentblocks utilizados en cada una de las etapas. De este modo, en la figura anterior, se pueden observar dos picos de valor aproximado $6.4 \cdot 10^{-5}$ N y $4.7 \cdot 10^{-5}$ N (a) y (b) respectivamente.

3.2.3 Representación más característica eje X

En este apartado se analizará la evolución de las vibraciones a lo largo de las diferentes etapas de aislamiento de vibraciones. Debe tenerse en cuenta el tipo de vibración presente en cada estudio, puesto que pueden existir variaciones entre los resultados obtenidos en cada estudio dependiendo del estado de la refrigeración.

A continuación se comentarán los resultados más característicos obtenidos de las mediciones con el equipo de refrigeración activo e inactivo.

Refrigeración apagada

En primer lugar, se observan todas las gráficas obtenidas en la mesa en cada uno de los estudios realizados.

De este modo, se obtiene:

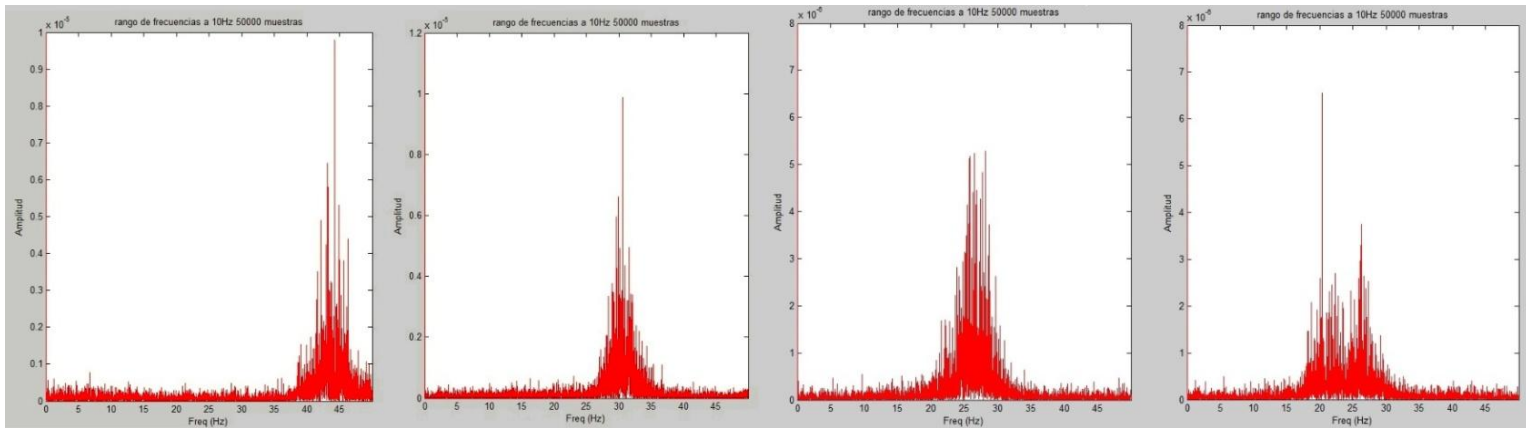


Ilustración 36 Comparación vibraciones mesa eje X

De esta comparativa, se observa que los valores obtenidos en los cuales se obtiene una concentración de vibraciones, se encuentra entre los 20 y los 30Hz, observándose en el estudio 1 (efectuado a las 10.00 horas del día 19 de julio de 2013) un pico de frecuencia cercano a los 43Hz. Al contar con una medición con dos picos claramente diferenciados en torno a 20Hz y otro entorno a los 26Hz, se pasará a analizar esta última por tratarse de la señal que a priori podría aportar más información acerca del desarrollo de las vibraciones la máquina estudiada.

De la anterior comparativa, también se puede observar que la amplitud de la señal se encuentra en torno a los $7.5 \cdot 10^{-4}$ N de máximo.

Conocidos los aisladores de vibraciones montados en el equipo, cabría esperar una reducción de la amplitud de vibración obtenida en un rango de frecuencias comprendido entre los 20 y los 22Hz, frecuencias de uso de los aisladores recomendadas por el fabricante.

A continuación se procede al análisis gráfico de los resultados obtenidos en la medición que anteriormente se ha considerado más característica.

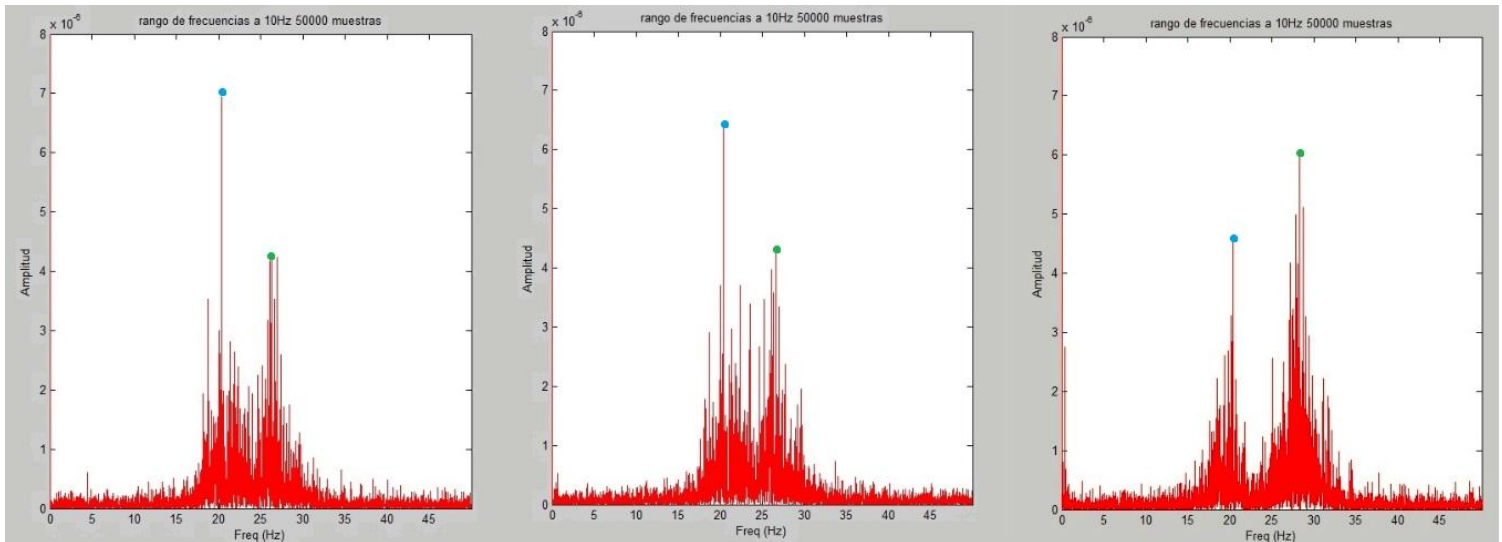


Ilustración 37 Representación más característica equipo apagado, eje X

En esta secuencia, se aprecian las frecuencias de vibración obtenidas en los tres elementos llevados a estudio. Se pueden distinguir dos rangos de concentración de vibración, uno comprendido entre los 17 y 22 Hz (puntos en azul) y el otro comprendido entre los 24 y 30Hz (puntos en verde). En primer lugar, se aprecia una ligera disminución del valor de la amplitud en el primer rango de vibraciones, mientras que en el segundo se observa un aumento de la amplitud de vibración correspondiente a la aguja, lo cual puede deberse a resonancia existente en la máquina.

Refrigeración activa

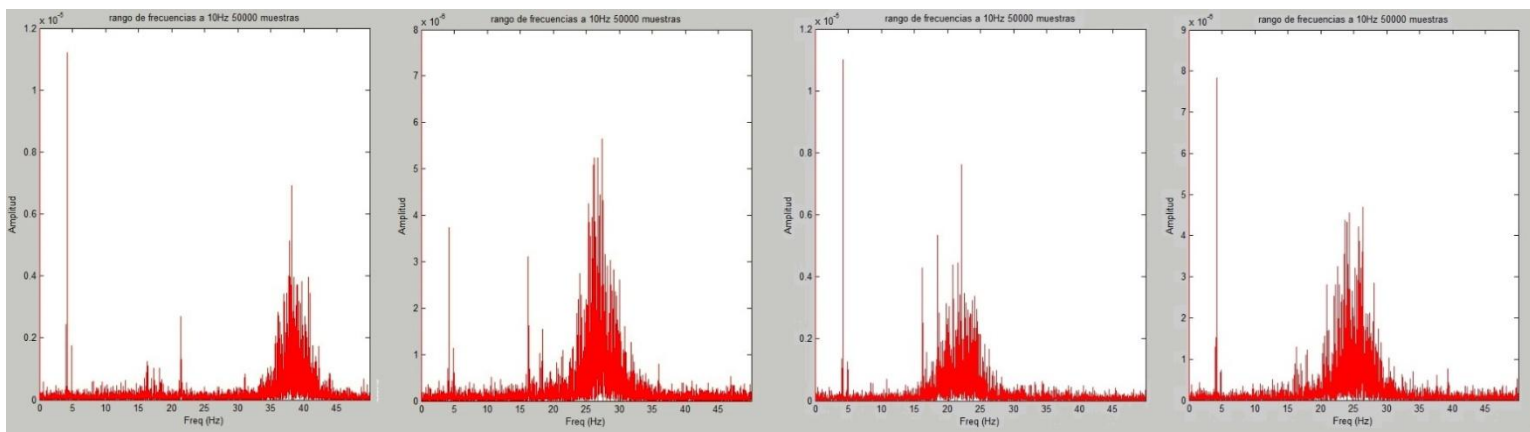


Ilustración 64 Comparación vibraciones refrigeración encendida mesa eje X

En la figura anterior se aprecian tres rangos de frecuencia comunes en los estudios realizados. De esta manera, se considerarán los rangos entre 3 y 5Hz, 15 y 16Hz y por último, un rango de mayor amplitud correspondiente a una frecuencia comprendida entre los 23 y los 28Hz.

Pese a ser la mesa la considerada como punto de referencia para el análisis de las figuras, se observa que el lugar en el cual se producen las mayores vibraciones es en la aguja, y por tanto, esta ha de ser el punto en el cual se debe centrar el estudio.

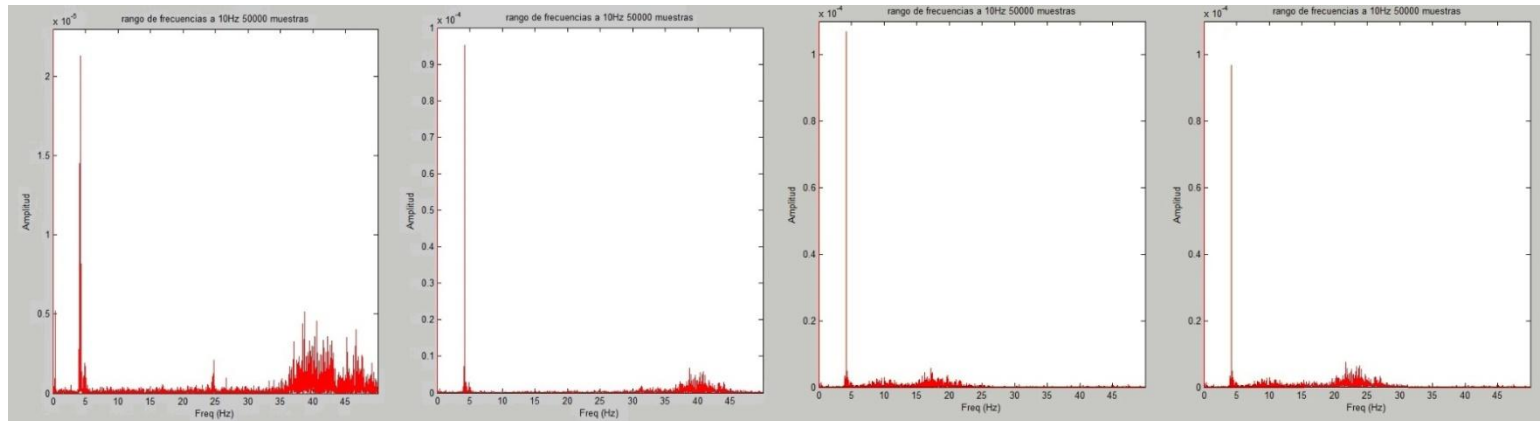


Ilustración 38 Representación vibraciones eje X en Aguja

En este caso, se observa una amplitud cercana a los $1 \cdot 10^{-4}$ N a una frecuencia de 4 Hz. En este punto, se amplifica notablemente la amplitud de las vibraciones partiendo de una amplitud cercana a los $1.2 \cdot 10^{-5}$ N. El motivo por el cual se produce este fenómeno, puede deberse a que esa frecuencia exista resonancia de algún elemento que sirva como soporte de la misma y de esta manera aumenten las vibraciones.

3.2.4 Representación más característica eje Y

Refrigeración apagada

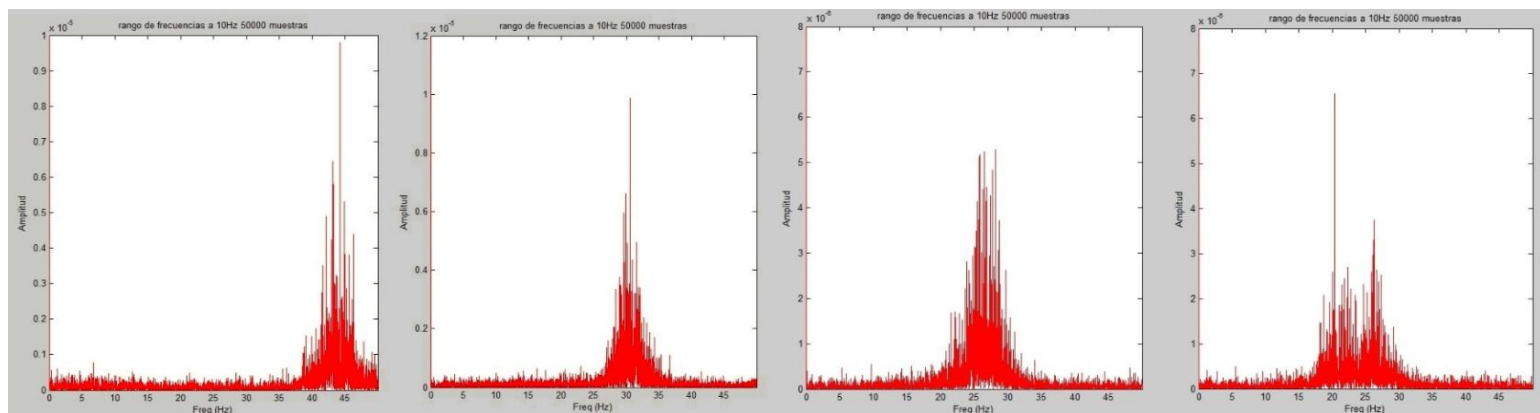


Ilustración 39 Comparación vibraciones mesa eje Y

En esta comparativa, al igual que ocurre en las mediciones registradas en el eje X, se puede observar un rango de frecuencias comprendida entre los 17 y los 32 Hz, observándose en la medición efectuada a las 10.00 horas del día 19 de julio de 2013 un pico de frecuencia cercano a los 44 Hz. Del mismo modo que ocurre en las

mediciones obtenidas en el eje X, contamos con una medición con dos picos claramente diferenciados, una en torno a 20Hz y otro entorno a los 26Hz, (correspondiente a la medición efectuada a las 17.30 horas del día 18 de julio de 2013). Por tanto, se pasará a analizar esta última por tratarse de la señal que a priori podría aportar más información acerca del desarrollo de las vibraciones la máquina estudiada.

De la anterior comparativa, también se puede observar que la amplitud de la señal se encuentra en torno a los $8 \cdot 10^{-4}$ m de máximo.

Conocidos los aisladores de vibraciones montados en el equipo, cabría esperar una reducción de la amplitud de vibración obtenida en un rango de frecuencias comprendido entre los 20 y los 22Hz, frecuencias de uso de los aisladores recomendadas por el fabricante.

A continuación se procede al análisis gráfico de los resultados obtenidos en la medición que anteriormente se ha considerado más característica.

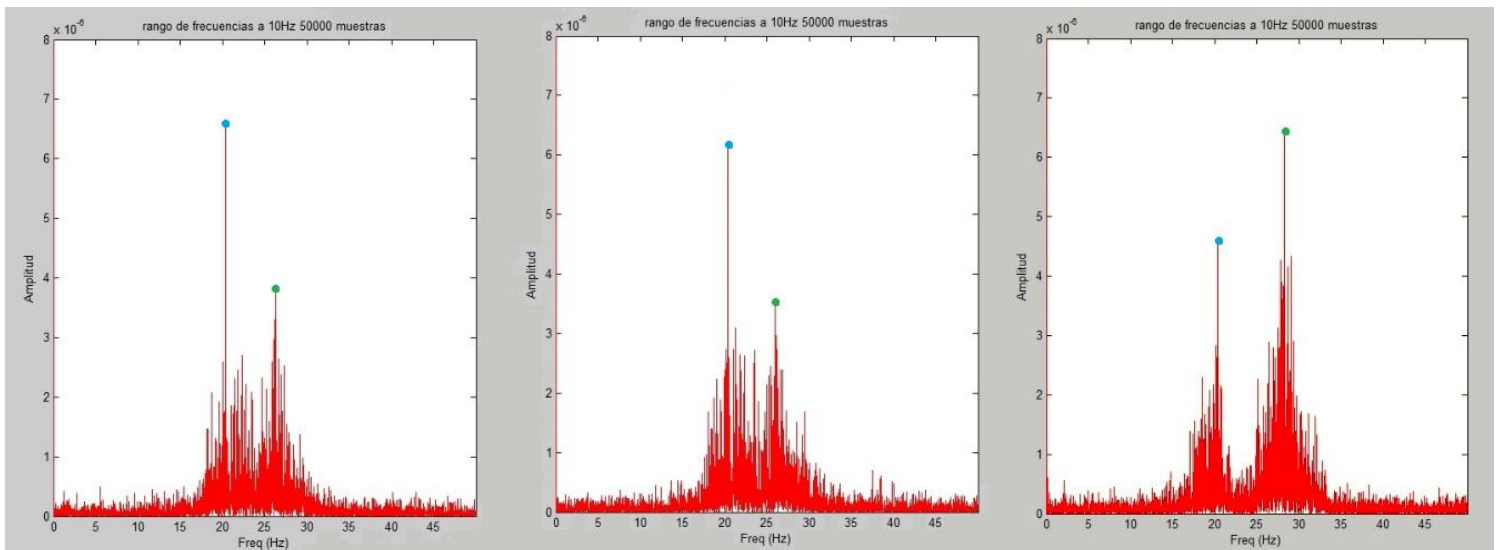


Ilustración 40 Representación más característica equipo apagado, eje Y

En esta secuencia, se aprecian dos rangos de concentración de vibración, uno comprendido entre los 18 y 23 Hz (puntos en azul) y el otro comprendido entre los 24 y 32Hz (puntos en verde). En el primer rango de frecuencias, se observa la disminución de la amplitud de vibración, mientras que en el segundo se observa que en la segunda etapa se produce un aumento de la amplitud, lo cual puede deberse a resonancia existente en la máquina.

Refrigeración encendida

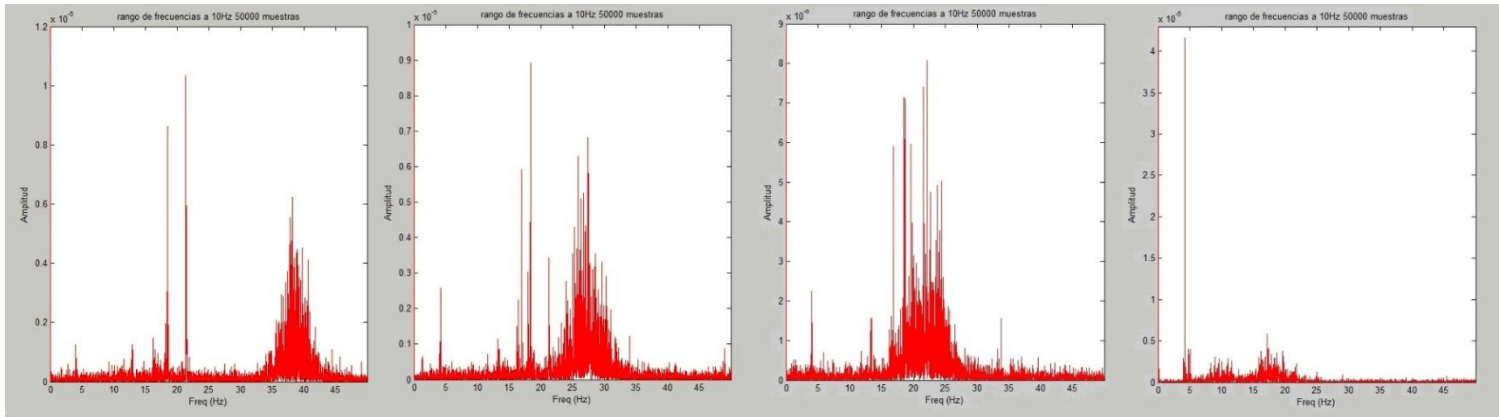


Ilustración 41 Comparación vibraciones refrigeración encendida mesa eje Y

En la figura anterior se aprecian tres rangos de frecuencia comunes en los estudios realizados. Al igual que ocurre con la vibración apagada, se produce un aumento de la amplitud de vibración en la aguja y por tanto este punto debe ser en el cual se realicen los estudios.

Los valores obtenidos son muy parecidos a los obtenidos en el eje X en el caso de refrigeración encendida, estando comprendidos entre 2 y 5Hz, una segunda en torno a 16 y 18Hz y por último, un rango de mayor amplitud correspondiente a una frecuencia entre los 23 y los 28Hz.

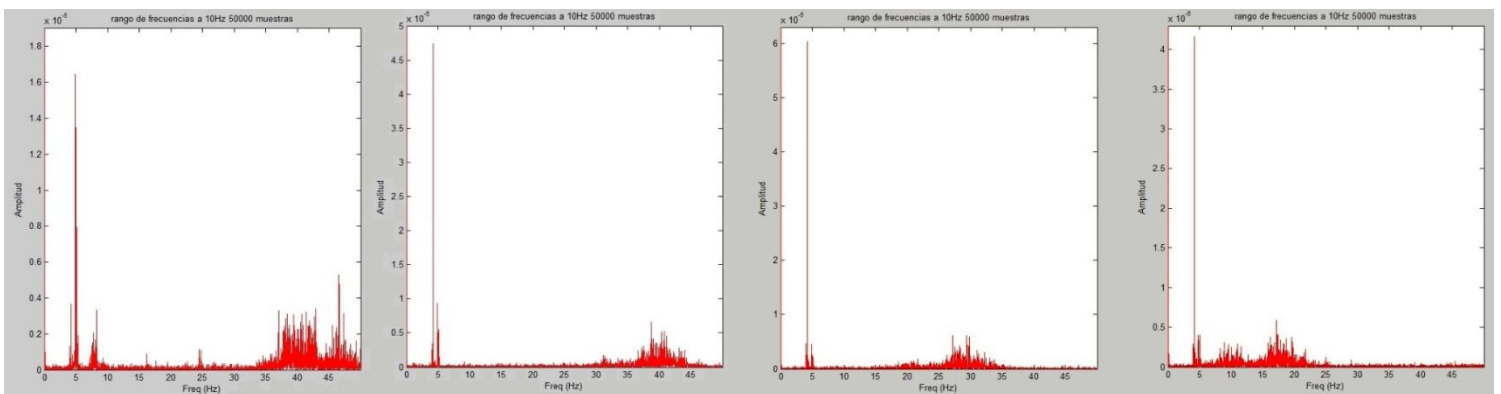


Ilustración 42 Representación vibraciones eje Y en Aguja

3.2.5 Representación más característica eje Z

Refrigeración apagada

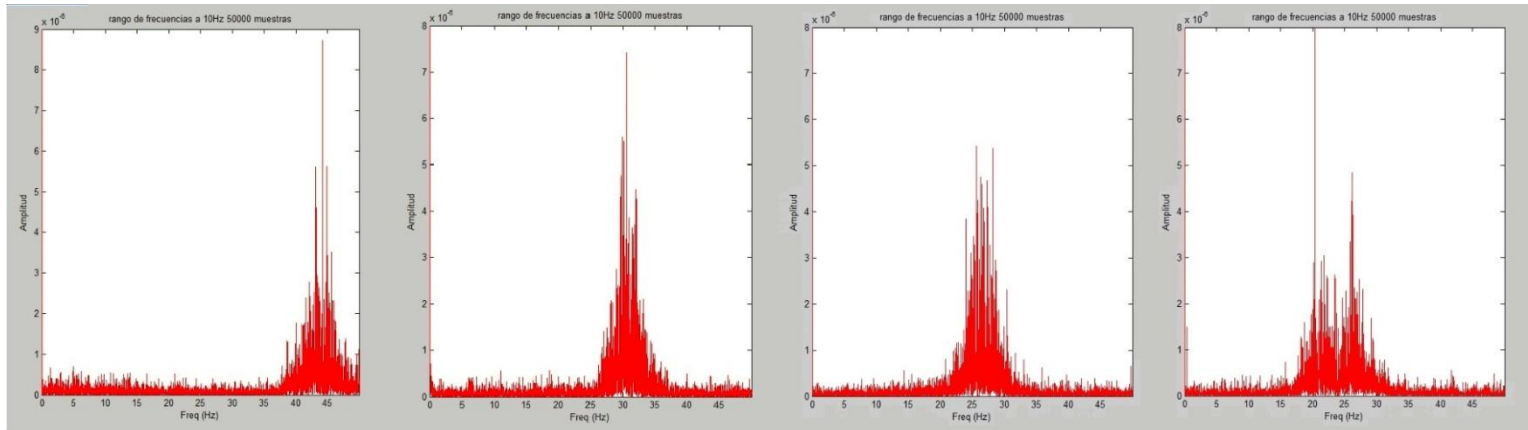


Ilustración 43 Comparación vibraciones apagado mesa eje Z

De la comparativa mostrada en la figura, se obtienen dos rangos de vibración en los cuales deberá analizarse el comportamiento a lo largo de las diferentes etapas de la máquina. Los valores en los cuales se obtiene una concentración de vibraciones, se encuentra entre los 21 y los 28Hz, observándose en la medición efectuada a las 10.00 horas del día 19 de julio de 2013 un pico de frecuencia cercano a los 44Hz. Al contar con una medición con dos picos claramente diferenciados en torno a 20Hz y otro entorno a los 27Hz, y del mismo modo que ocurre en las mediciones con el equipo de refrigeración apagado en los ejes X e Y, se analizará esta última por tratarse de la señal que podría aportar más información acerca del desarrollo de las vibraciones la máquina estudiada.

De la anterior comparativa, también se puede observar que la amplitud de la señal se encuentra en torno a los $8.5 \cdot 10^{-4} \text{N}$ de máximo.

Dadas las características aportadas por el fabricante para los aisladores de vibraciones montados en el equipo, cabría esperar una reducción de la amplitud de vibración obtenida en un rango de frecuencias comprendido entre los 20 y los 22Hz.

A continuación se procede al análisis gráfico de los resultados obtenidos en la medición que anteriormente se ha considerado más característica.

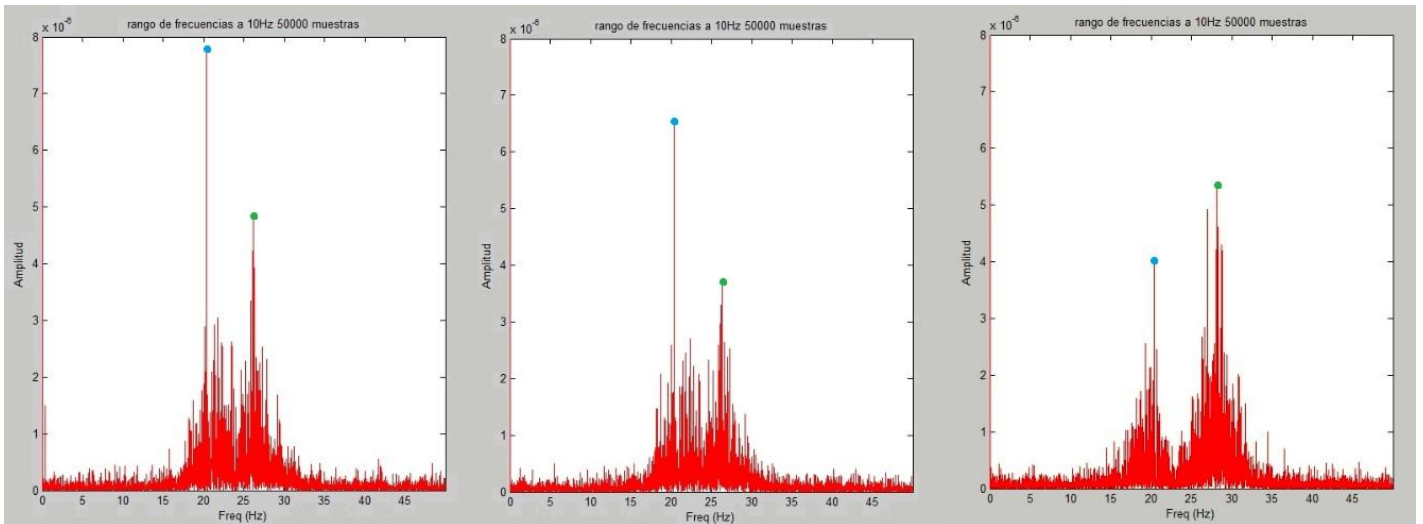


Ilustración 44 Representación más característica equipo apagado, eje Z

En esta secuencia, se aprecian dos rangos de concentración de vibración, uno comprendido entre los 18 y 24 Hz (puntos en azul) y el otro comprendido entre los 24 y 28Hz (puntos en verde). En el primer rango de frecuencias, se observa la disminución de la amplitud de vibración, mientras que en el segundo se observa que en la segunda etapa se produce un aumento de la amplitud, lo cual puede deberse a resonancia existente en la máquina.

Refrigeración encendida

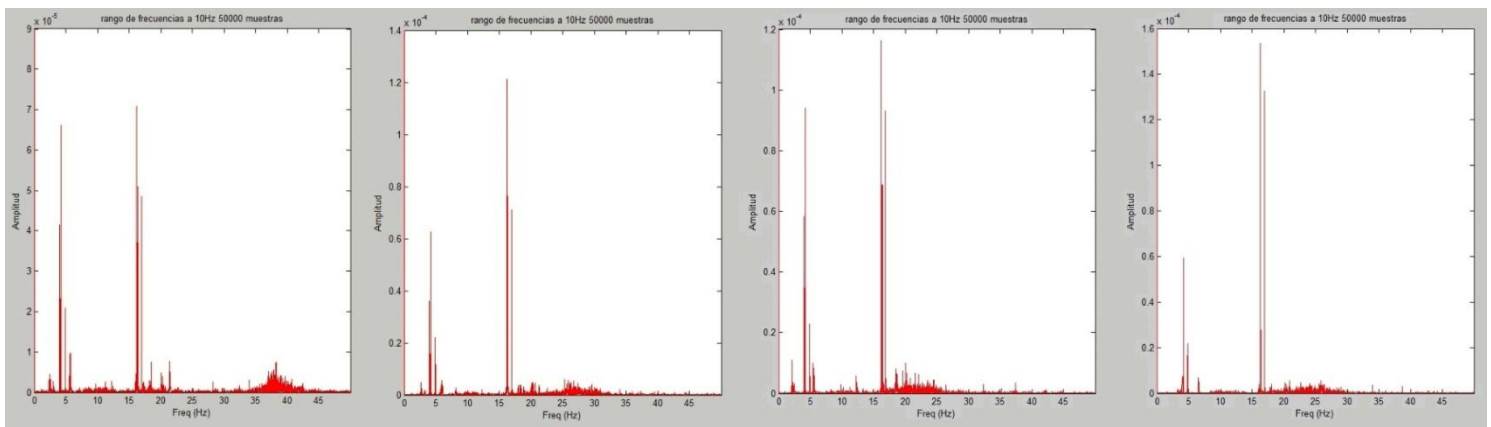


Ilustración 45 Comparación vibraciones refrigeración encendida mesa eje Z

En esta secuencia se observan tres rangos de frecuencias de vibración en las cuales hay una elevada ampliación de frecuencia. De este modo, distinguimos una elevada

amplitud en 4-5Hz, otra en 14-16Hz y finalmente un pico de menor amplitud en torno a 20-24Hz.

En este caso, a diferencia de lo que ocurrió en el eje X e Y, las mayores vibraciones se encuentran en la mesa. Por tanto a continuación se analizará el comportamiento de las vibraciones en cada uno de los puntos llevados a estudio.

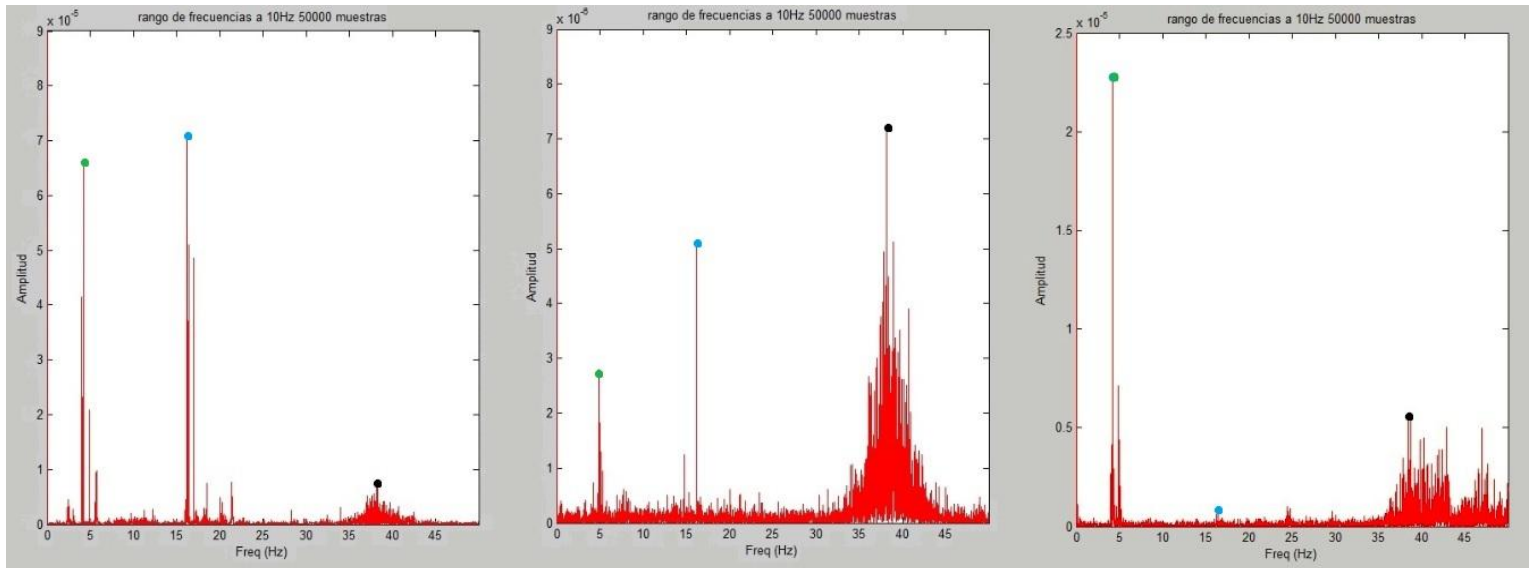


Ilustración 46 Representación más característica eje Z encendido

En la gráfica anterior, se puede observar una disminución de la amplitud en los elementos llevados a estudio. En el caso de la cámara (gráfica central), se debe tener en cuenta la variación de la escala de amplitud. De esta manera, se observa claramente la disminución de la amplitud inicial tanto en el primer rango como en el segundo. Por otro lado, en el caso de la aguja (gráfica de la derecha) se observa que la frecuencia que inicialmente se encontraba cercana a los 15Hz prácticamente ha desaparecido, lo cual indica un buen aislamiento de las vibraciones a esa frecuencia. Pese a ello, se sigue observando una amplitud de vibración muy elevada en el primer rango de frecuencias obtenido. Para el tercer rango de vibración correspondiente a 20-24Hz, se observa una disminución tanto en la cámara como en la aguja.

4 CONCLUSIONES

- Las vibraciones en todos los elementos estudiados, se comportan de la misma manera en los tres ejes.
- Se observa un aumento de la amplitud en torno a los 26-28Hz en los valores obtenidos en la aguja. Esto puede deberse al acoplamiento de la frecuencia natural de la bancada.
- En el estudio 1 (realizado a las 10.00 horas con el equipo de refrigeración apagado) se detecta una frecuencia de vibración cercana a los 45Hz presente en los tres ejes. Tras comprobarse en el resto de los estudios en el mismo modo de refrigeración picos de frecuencias entre 20-30Hz, se determina que estos valores obtenidos pueden deberse a condiciones externas como por ejemplo, el paso de un tren o a la mayor actividad en el laboratorio en el cual se realizaron las mediciones.
- Las vibraciones en la cámara disminuyen en todos los estudios, por tanto se puede afirmar que los aisladores colocados funcionan adecuadamente para este fin.

EJE	REFRIGERACIÓN APAGADA	REFRIGERACIÓN ENCENDIDA
X	21-22Hz	4-5Hz
Y	20-21 Hz	4-5Hz
Z	21-22 Hz	4-5Hz

Tabla 5 Resultados obtenidos de las mediciones

- Se deberían modificar los silentblocks montados inicialmente por otros capaces de aislar vibraciones comprendidas entre los 20-22Hz.
- Del mismo modo, en el caso de contar con la refrigeración activa, se debería aislar la fuente de vibraciones tratando de eliminar las frecuencias observadas en 4-5Hz.

5 TRABAJOS FUTUROS.

Como futuros trabajos a desarrollar a partir de este trabajo de fin de carrera, se plantean los siguientes: Completar el análisis de señales efectuado con el fin de reducir las vibraciones existentes mediante construcción de otro sistema de amortiguación.

Proponer un sistema de aislamiento activo con diferentes respuestas en función del tipo de vibración.

Estudiar otros tipos de señales procedentes de diferentes fuentes de vibraciones con el fin de estudiar su comportamiento ante distintas vibraciones.

6.- BIBLIOGRAFÍA.

[1] Contenido de los estudios de vibraciones. Aplicaciones a la edificación y las infraestructuras. <http://www.allpe.com>

[2] N. Roy, P. Purkait and K. Bhattacharya, *Application of Wavelet and Fourier Transforms for Vibration Analysis of Motor*, IEEE Indicon 2005 Conference, Chennai, India, 11-13, 2005.

[3] Lutfiye Durak, *Shift-invariance of short-time Fourier transform in fractional Fourier domains*, Journal of the Franklin Institute, 346, p136-146, 2009.

[4] Kahane, J. P., Lemarié, P.G., *Fourier series and wavelets*, Australia, Gordon and Breach Publishers, Studies in development of modern mathematics, 1995.

[5] Oberst, Ulrich, *The Fast Fourier Transform*, SIAM Journal on Control & Optimization, 2007, Vol. 46 Issue 2, p1-45, 45p.

[6] Casasola Paredes, G. A., *Multianálisis frecuencial y estadístico de la vibración emitida por un elemento mecánico con fallo bajo diferentes estados de carga*, Proyecto Fin de Carrera de la Escuela Politécnica Superior, Universidad CarlosIII de Madrid, Madrid, 2002.

[7] Moya Ignacio, Begoña, *Análisis tiempo-frecuencia de la señal de vibración de un cambiador de tomas en carga*. Proyecto Fin de Carrera de la Escuela Politécnica Superior, universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2009.

[8] Francisco Jurado, José R. Saenz, *Comparison between discrete STFT and wavelets for the analysis of power quality events*, Electric Power Systems Research, 62, pp. 183-190, 2002.

[9] Rivas, E., Burgos, J. C. and García-Prada, J. C., *Condition assessment of power OLTC by vibration analysis using wavelet transform*, Power Delivery, IEEE Transactions on 24 (2), pp. 687,694, 2009.

[10] Proceso de muestreo de señales, <http://www.ingelec.uns.edu.ar/>

- [11] Introducción al procesado digital de señales, <http://www.uv.es/>
- [12] Principios en adquisición de señales, <http://www.oocities.org>
- [13] Tipos de acelerómetros http://www.sensing.es/Acelerometros_Cm.htm
- [14] Los principios más comunes para sensores de presión.
<http://www.bloginstrumentacion.com/blog/tag/sensor-piezoresistivo/>
- [15] D. S. G. Pollock, *A handbook of time-series analysis, signal processing and dynamics*, Academic Press, Cambridge, 1999.
- [16] Hewlett Packard, *The fundamentals of signal analysis*, Application Note 243.
- [17] Oppenheim, A. L., Schafer, R. W. and Buck, J. R., *Tratamiento de señales en tiempo discreto*, Prentice Hall, Segunda edición, 1999.
- [18] Ambadar, A., *Procesamiento de señales analógicas y digitales*, Thomson Editores, Méjico, 2002.
- [19] M.A. Álvarez Valenzuela, *Análisis de la sensibilidad a las vibraciones del método de medición de tensión superficial mediante gota suspendida*. Revista mexicana de física 56 (4) 334-338, Agosto 2010
- [20] Arana López-Abad, M^a Soledad, *Interfaz gráfica para el cálculo de la dinámica longitudinal y prestaciones de un vehículo mediante la herramienta guide de Matlab*, Proyecto Fin de Carrera de la Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2004.
- [21] Braun, S. G., Ewins, D. J. y RAO, S. S., *Encyclopedia of Vibration*, London, Academic Press Inc., 2001.
- [22] Programación con GUIDE de Matlab, <http://www.matpic.com/MATLAB>
- [23] M. P. Norton, *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*, Cambridge, University Press, 1989.

[24] Smith, Scott T., *Matlab advanced gui development*, Indianapolis, Dog Ear Publishing, 2006.

[25] Programación de GUIs con Matlab, <http://www.lawebdelprogramador.com/news>

[26] The Mathworks, <http://www.mathworks.com>

[27] D. E. Newland., *Vibraciones aleatorias y análisis espectral*, Madrid, EditorialAC, 1983.

[28] Analysis, Encyclopedia Britannica. 2009. Encyclopedia Britannica Online. 17 Sept. 2009, <http://www.search.eb.com/eb/article-247690>

[29] LJubisa Stankovic, Tatiana Alieva, Martin J. Bastiaans, *Time-frequency signal analysis based on the windowed fractional Fourier transform*, Signal Processing, 83, p2459-2468, 2003.

[30] Lutfiye Durak, *Short-Time Fourier Transform: Two Fundamental Properties and an Optimal Implementation*, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol.51, Nº 5, Mayo 2003.

[31] Steven W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, cap. 3, 1997-2006.

[32] Pengju Kang and David Birtwhistle, *Condition assessment of power transformer On-Load Tap Changers using wavelet analysis and self-organizing map: field evaluation*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, Nº 1, pp. 78-84, 2003.

[33] A.A. Silva y M.A. Irmao, *Comparación de Representaciones Tiempo-Frecuencia Aplicadas en la Simulación y Análisis de Fallas en Sistemas Engranados*, Información Tecnológica, Vol. 15, Nº 5, pp. 17-22, 2004.

[34] A. Danisor, K. O. Izet-Unsalan, D. Unsalan, *A new approach for the detection and processing of seismic signals*, Recent Advances in Space Technologies, 2007. RAST'07. 3rd International Conference on, pp. 698-703.

[35] Moreno Sánchez R., Pintado Sanjuán, P., Alonso Sánchez, F. J., ChicharroHiguera, J. M., Morales Robredo, A. L., Nieto Quijorna, A. J., *Evaluación y comparación de modelos de diagnóstico de fallos en engranajes utilizando las señales de vibraciones mecánicas*, 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cuzco, 23-25 de Octubre de 2007.

[36] Miguel F. M. Lima, J. A. Tenreiro Machado and Manuel Crisóstomo, *Robotic Manipulators with Vibrations: Short Time Fourier Transform of Fractional Spectra*, Intelligent Engineering Systems and Computational Cybernetics, I, Springer Netherlands, 2008.

[37] Cooley, J. and Tukey, J., *An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series*, Mathematics of Computation, 1965, Vol. 19, pp. 297-301.

[38] Cizek, V., *Methods of computation of discrete Fourier transform in anonymous discrete Fourier transform and their applications*, Bristol Adam Hilger Ltd. 1985, pp. 98-120.

[39] Francois, A., and Patrick, F., *Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method*, IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, Vol. 43, pp. 1068-1089.

[40] Graps, A., *An introduction to Wavelets*, IEEE Computational Science, 1995, Vol. 2, Nº 2.

7 ANEXOS

Aislador de vibraciones tipo C

Especificaciones

<input checked="" type="checkbox"/>	Altura del Pie	22mm
<input checked="" type="checkbox"/>	Altura Global	40mm
<input checked="" type="checkbox"/>	Diámetro	30 mm
<input checked="" type="checkbox"/>	Forma del Pie	Cilíndrico
<input checked="" type="checkbox"/>	Material	Silicona
<input checked="" type="checkbox"/>	Metálico	Hierro Cromado, SUC304
<input checked="" type="checkbox"/>	Tamaño de la Rosca	M6
<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura de Funcionamiento Máxima	+200°C
<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura de Funcionamiento Mínima	-40°C
<input checked="" type="checkbox"/>	Tipo	Pata Niveladora Macho

Ilustración 47 Especificaciones aislador de vibraciones tipo SF-2

Especificaciones

<input checked="" type="checkbox"/>	Altura Global	58mm
<input checked="" type="checkbox"/>	Diámetro	20 (superior), 25 (inferior) mm
<input checked="" type="checkbox"/>	Material	Silicona
<input checked="" type="checkbox"/>	Metálico	Hierro Chapado en Cromo
<input checked="" type="checkbox"/>	Tamaño de la Rosca	M6
<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura de Funcionamiento Máxima	+200°C
<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura de Funcionamiento Mínima	-40°C
<input checked="" type="checkbox"/>	Tipo	Macho a Macho

Ilustración 48 Especificaciones aislador de vibraciones tipo C