

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO ANALIZADOR DE VIBRACIONES

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE LABORATORIO PARA ESTUDIAR VIBRACIONES MECÁNICAS EN SISTEMAS ROTATIVOS PARA EL LABORATORIO DE MECANISMOS Y VIBRACIONES DEL DECEM DE LA ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

Karen Nataly Angulo Acunso

José Julián Salazar Vaca

20/09/2013

INGENIERÍA MECATRÓNICA

karen_nat_7@hotmail.com

josejuliansalazar@gmail.com

1. RESUMEN

El equipo analizador de vibraciones mecánicas en sistemas rotativos es una clara explicación de un sistema mecatrónico que incluye el diseño mecánico, la adquisición y control de señales; además del análisis a través del software Labview. Siendo una herramienta de gran utilidad en el estudio de vibraciones mecánicas de forma didáctica para los estudiantes de ingeniería, preparándolos para su posterior desempeño en el campo industrial.

El proyecto presenta el diseño mecánico del banco de pruebas basándose en los conceptos básicos de mecanismos, análisis de esfuerzos y diseño de ejes, generando diferentes escenarios de fallas en máquinas rotativas como lo son la severidad de vibración, desbalanceo y fallas en engranes rectos.

El sistema de control de velocidad incluye la selección de técnicas que mejor se acoplen al funcionamiento del sistema, adquisición de datos para el procesamiento de las señales.

Se desarrolló un software para el control y acondicionamiento de las señales brindando al usuario, en este caso el estudiante, la potestad de manipular el movimiento de la máquina y obtener los datos en un entorno gráfico facilitando su análisis y comprensión.

ABSTRACT

The mechanical vibration analyzer equipment in rotating systems is a clear explication of a mechatronic system including mechanical design, data acquisition and control, plus analysis by Labview software. Being a useful tool in mechanical vibrations in a didactic for engineering students, preparing them for their subsequent performance in the industrial field.

The project presents the mechanical design test based on the basics of mechanisms, stress analysis and design of shafts, generating different failure scenarios such as rotating machinery vibration severity, imbalance and spur gear failure.

The speed control system includes selection techniques that engage the best system performance, data acquisition for the signal processing. We developed software for control and signal conditioning to provide the user, in this case the student, the power to manipulate the movement of the machine and get the data in a graphical environment facilitating their analysis and understanding.

2. PALABRAS CLAVES

Acelerómetro, control PID, transformada de Fourier, espectros de frecuencia, mantenimiento predictivo.

3. INTRODUCCIÓN

Gran parte del sistema mecánico que conforma una máquina usualmente contiene elementos que son parte o son acoplados a la misma, el uso de ejes, rodamientos, correas, levas, engranes, resortes, elementos de sujeción, puntos de soldadura, etc. Todos estos elementos pueden ser motivo de falla para el correcto funcionamiento de la máquina, en este tipo de diagnósticos las vibraciones concernientes a cada elemento proporcionan información de gran valor al momento de realizar una evaluación preventiva de la máquina teniendo como referencia curvas significativas relacionadas a la vibración de cada elemento cuando existen fallas presentes.

Objetivo General

Diseñar e implementar un Equipo de Estudio de Vibraciones para el Laboratorio de Mecanismos y Vibraciones del DECEM que esté constituido por un sistema mecánico construido para simular anomalías vibratorias de naturaleza mecánica.

Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un sistema mecánico para la simulación de fenómenos de vibración.
- Crear del entorno de fallas para las posteriores pruebas de vibración.
- Seleccionar e implementar sensores para la medición de vibración y velocidad de componentes.
- Diseñar el sistema de control para la variación de velocidad del motor a través de técnicas de control PID.
- Determinar y analizar la gravedad de los problemas de la máquina basándose en las amplitudes y la relación entre los picos de vibración.

Alcance del proyecto

El presente proyecto estará constituido por un sistema mecánico rotativo construido para realizar pruebas de severidad de vibración, desbalance y fallas en engranes rectos.

4. GENERALIDADES

El análisis de vibraciones en máquinas rotativas es un proceso que consiste en la recolección de datos de vibración para detectar espectros de frecuencia que determinaran el estado en que se encuentran los elementos que la componen, mediante el análisis de las señales en la amplitud de los espectros de frecuencia.

5. DISEÑO MECÁNICO

El Sistema Mecánico compone el pilar fundamental de la generación del fenómeno a analizar.

De acuerdo a las características que el sistema debe cumplir se selecciona el material más conveniente. Por costo, disponibilidad, rigidez, resistencia al ambiente; se utilizará el ACERO 1020.

• Eje auxiliar

El eje en el que irán montados los 2 engranes en buen y mal estado para escenario de falla

• Engranes

Para el sistema analizador de vibraciones se determina el uso de 3 engranes de la misma medida, uno para el eje principal y dos en el eje auxiliar para los escenarios en buen estado y mal estado.

• Conjunto auxiliar

El conjunto auxiliar está compuesto por un eje auxiliar y 2 engranes.

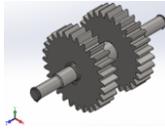


Ilustración 1 Diseño de conjunto auxiliar

Por medio de un análisis de momentos y el criterio de Goodman se obtienen los factores de seguridad para los puntos críticos que son el cuñero y el hombro para el engrane.

Cuñero del engrane $n=26,89$.

Hombro para el engrane $n=43,73$.

Estos valores de seguridad obtenidos nos demuestran que el eje auxiliar soporta las cargas sobre el mismo.

- **Disco de masas**

El disco de masas es diseñado con la finalidad de simular desbalanceo

- **Flecha Principal**

La Flecha Principal estará acoplada al motor eléctrico mediante un acople mecánico (matrimonio) consecuentemente apoyada en dos chumaceras, en el tramo intermedio irá montado un engrane principal y un disco perforado para acoplar masas.

- **Conjunto Principal**

Siguiendo la metodología anteriormente mostrada en el análisis del eje auxiliar se determinan los factores de seguridad en los puntos críticos: cuñero de disco de masas y cuñero de engrane.

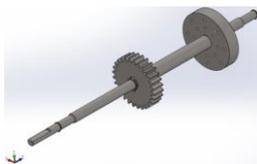


Ilustración 2 Modelo CAD eje principal

Cuñero de engrane $n_f=15,20$

Cuñero disco de masas $n_f=20,03$

Se comprueba que el eje principal también cumple con las condiciones adecuadas para el funcionamiento del sistema mecánico.

- **Consolidación del diseño**

Se utilizaron chumaceras sobre una base de hierro fundido para mejorar la estabilidad y una palanca para realizar el cambio de los engranes en buen y mal estado.

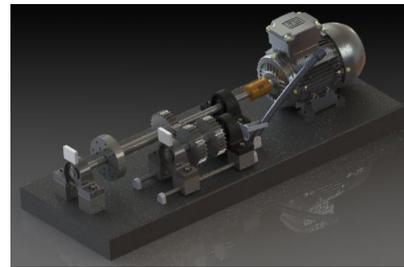


Ilustración 3 Banco de pruebas

6. ANÁLISIS MODAL

Usando como herramienta el software ANSYS se logra analizar la frecuencia máxima que soporta el sistema.

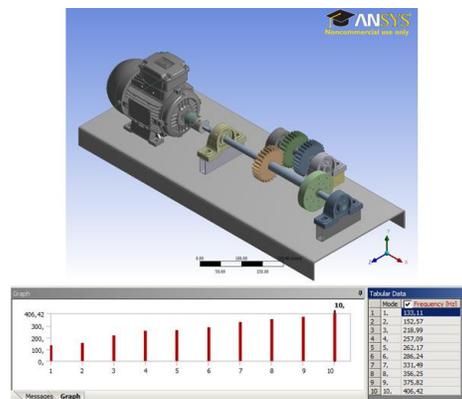


Ilustración 4 Resultado de análisis modal

La frecuencia natural obtenida del sistema mínima es de 150.91 Hz este valor equivale a 9054.6 RPM una velocidad mayor a la entregada por el motor en el banco de pruebas (1500RPM), en conclusión el

sistema mecánico no entrará en resonancia porque no supera la frecuencia natural.

7. SISTEMA ELÉCTRICO

Para proteger el sistema que tiene una alimentación de 220V se utiliza un disyuntor y guardamotor.

Un variador de frecuencia que enlace el software con el motor en la variación de velocidad.



Ilustración 5 Instalación del sistema eléctrico

8. SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control estará compuesto por sensores que establecerán la retroalimentación del sistema y permitirán obtener la información.

- **Sensores**

Los sensores escogidos para sensar la vibración en el sistema son los acelerómetros, de acuerdo al escenario de funcionamiento se seleccionó el modelo MMA7361L que tiene un rango de medición de -1.5 a 1.5g y una sensibilidad de 800Mv. Estos tienen un rango de salida de 0-5V.

Un sensor inductivo acoplado a uno de los engrane hará el papel de tacómetro digital para obtener la velocidad del sistema.

- **Adquisición de datos**

Los datos obtenidos de los sensores serán transferidos al computador mediante un tarjeta NI6009 de National Instruments la

cual cuenta con puertos digitales y analógicos para recibir y enviar datos.

- **Control de velocidad**

Se selecciona un controlador PI que mejor se acopla al modelamiento de la planta con las constantes:

$$T_i = 0.0146$$

$$k_p = 5.4027e^{-5}$$

9. ESPECTROS DE FRECUENCIA

La señal adquirida de los acelerómetros es procesada calibrando a la ecuación característica del mismo. Los acelerómetros son montados en las chumaceras del eje principal y del eje auxiliar para los 3 tipos de escenarios de fallas. Desbalanceo, engrane en buen estado y engrane en mal estado.

Con la señal de los acelerómetros convertida en aceleración se realiza la transformada de Fourier con ayuda del software graficando los espectros de frecuencia.

- **Representación gráfica**

La aceleración adquirida de los acelerómetros es transformada a espectros de frecuencia para graficarse, de igual manera la señal es integrada para obtener la velocidad RMS máxima del sistema.

- **HMI**

El interfaz hombre máquina está compuesto por 5 ventanas para cada escenario de falla a realizar. Las ventanas son:

Introducción.- Es la pantalla principal en la que se indican las instrucciones para el funcionamiento del HMI.

Correcto funcionamiento.- Con la máquina en estado normal con variación de velocidad de 200-1200RPM.

Desbalanceo.- Se obtienen las gráficas aumentando las masas en el disco. Variación de velocidad de 300-600RPM y 4 masas de 25g.

Engrane en buen estado.- Análisis realizado con los engranes en buen estado en contacto y velocidad de rotación de 300RPM.

Engrane en mal estado.- Análisis realizado con el engrane principal y engrane en mal estado en contacto y velocidad de rotación de 300RPM.

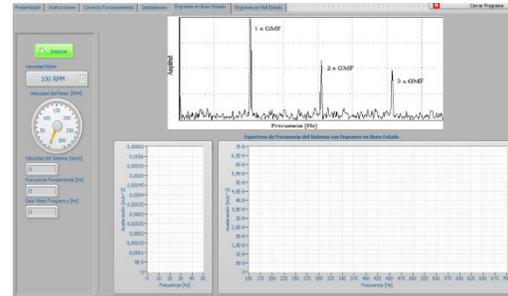


Ilustración 9 Ventana Engrane en buen estado

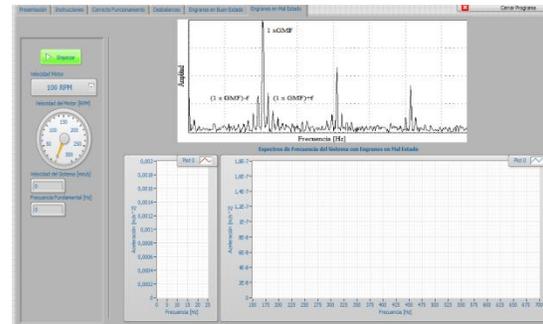


Ilustración 10 Ventana Engrane en mal estado



Ilustración 6 Presentación HMI

10. PRUEBAS Y RESULTADOS

- Análisis de correcto funcionamiento.

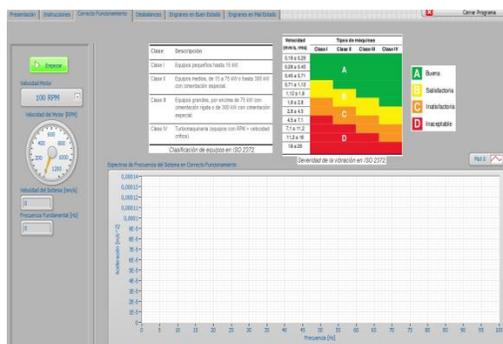


Ilustración 7 Ventana Correcto Funcionamiento

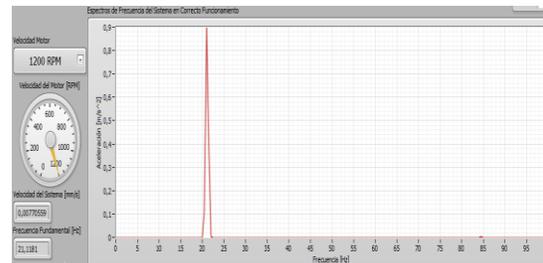


Ilustración 11 Resultado Correcto funcionamiento 1200RPM

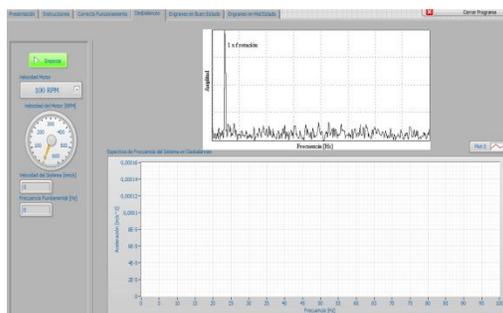


Ilustración 8 Ventana Desbalance

Los resultados obtenidos en el análisis del equipo en buen estado a diferentes velocidades, evidencian en los espectros de frecuencia un pico correspondiente a la frecuencia fundamental a la que está girando el sistema.

Se puede comprobar que el sistema a su máxima velocidad (1200RPM) se encuentra dentro del rango de severidad de vibración con un valor máximo de 0.007mm/s comparado con la tabla de

severidad de la norma ISO 2372 donde el máximo valor admisible para máquinas de este tipo es de 0,71mm/s.

- **Análisis de desbalanceo**

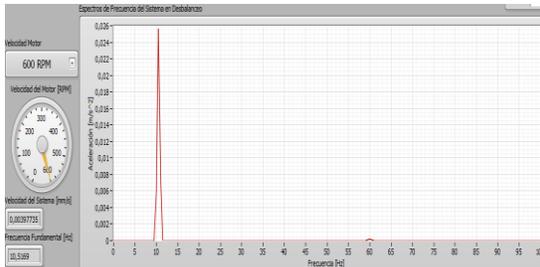


Ilustración 12 Resultado desbalanceo con 25 g a 600RPM

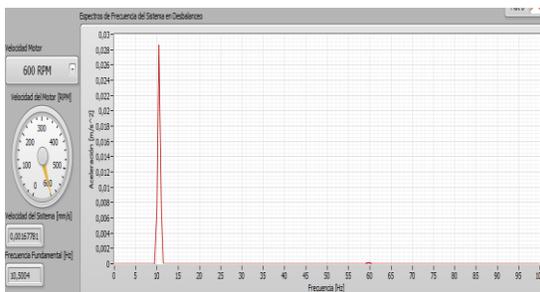


Ilustración 13 Resultado desbalanceo con 100g a 600RPM. Fuente propia

Con el aumento del rango de masas se obtiene variación en la amplitud en los espectros de 0.026 y 0.03, logrando concluir que a medida que se aumenta las masas de desbalanceo existe un aumento en la amplitud del pico a la frecuencia fundamental del sistema.

- **Análisis engrane en buen estado**

Un engrane muestra sus armónicos en la frecuencia de vibración del diente (GMF), esta frecuencia proviene de la fórmula expresada en la ecuación:

$$GMF = f_{rotación} * \#dientes$$

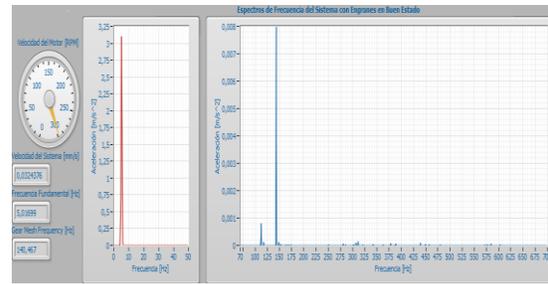


Ilustración 14 Resultado engrane en buen estado a 300RPM

Además de presentar un pico en la frecuencia fundamental también se observa uno en GMF (143,7) con una gráfica limpia sin ruido indicando que el engrane está en buen estado.

- **Análisis engrane en mal estado**

Un engrane con fallas como el desgaste de sus dientes presenta armónicos en GMF y sus múltiplos, conjuntamente con bandas laterales.

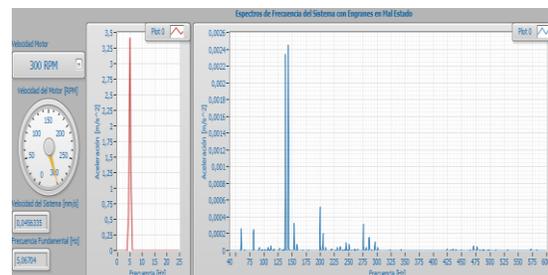


Ilustración 15 Resultado engrane en mal estado a 300RPM

En los resultados se obtiene un pico en el valor GMF (143,7) además de presentar bandas laterales debido al desgaste de dientes existentes en el sistema.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

11.1 Conclusiones

- Se diseñó y construyó un Equipo de Estudio de Vibraciones Mecánicas orientado al Análisis en

Máquinas Rotativas para los escenarios de severidad de vibración, desbalance máximo con masas de hasta 100g, y engranes tanto en buen estado como con fallas (desgaste en diente), en general alcanzando una velocidad máxima de rotación de 1200RPM, siendo controlado mediante el uso de una interfaz gráfica.

- Se seleccionó acelerómetros de tecnología MEMS para la medición del fenómeno de vibración; además de implementarse un sensor inductivo para la medición de velocidad acoplado a los dientes del engrane principal, debido a su disponibilidad, facilidad de uso y bajo costo.
- Para un control automatizado del motor eléctrico trifásico fue fundamental el uso de un variador de frecuencia que permita ser operado mediante una señal análoga de voltaje.
- En el acondicionamiento del sensor de velocidad se diseñó e implementó un circuito que permita trabajar con un menor rango de voltaje para poder enviar e interpretar la señal por medio de la tarjeta de adquisición de datos.
- Para el control de velocidad de rotación del sistema, se utilizó técnicas de control PID, siendo el controlador proporcional integral (PI) el que mejor se adaptó al modelo de la planta obtenido, dando una buena respuesta y sin interferir con el correcto funcionamiento del variador de frecuencia.
- La adquisición de señales eléctricas es una parte importante en el procesamiento de datos, sin embargo se tiene el riesgo que las señales parásitas se filtren en las

señales de interés, por ende se eliminó el ruido apantallando y aterrando los cables para que la adquisición sea lo más “limpia” posible.

- El concepto matemático en el tratamiento de señales es fundamental para el análisis de la información obtenida, dado que ésta fue adquirida en dominio del tiempo, para el interés del proyecto las señales debían ser interpretadas en dominio de la frecuencia, para lo cual se aplicó el criterio de la transformada rápida de Fourier (FFT) en la programación.
- El uso de una interfaz hombre máquina (HMI) permite al usuario un manejo eficiente bajo un ambiente interactivo de toda la información obtenida en los diversos escenarios de análisis, además de ser un vehículo útil en la operación de equipos que presentan un nivel considerable de automatización en el monitoreo de procesos.
- A través de los resultados obtenidos en los escenarios de análisis y de la experiencia recopilada a lo largo del desarrollo del presente proyecto queda justificada la capacitación sobre mantenimiento predictivo sea para estudiantes de ingeniería como para personas que se desenvuelvan en cualquier campo industrial que conlleve la operación de sistemas rotativos.
- La implementación de sistemas de monitoreo y mantenimiento predictivo devenga a largo plazo cualquier acción correctiva que se suscite en una máquina y que genere gastos considerablemente altos en comparación al costo de inversión para un análisis de este

tipo y peor aún paros de planta frecuentes.

-

11.2 RECOMENDACIONES

- Es necesario aislar el equipo lo máximo posible de cualquier tipo de interferencia electromagnética dado que las interferencias se pueden colar dentro de las señales de interés y producir una visualización no tan precisa de los espectros.
- La obtención de las señales de vibración fueron obtenidas con acelerómetros que emplean tecnología MEMS, una obtención más adecuada de estas señales puede ser mediante acelerómetros especializados como lo son los de tipo ICP (piezoeléctricos), pero es importante considerar también el factor presupuesto.
- La instalación del sistema debe ser realizado en una superficie que otorgue un nivel de planitud y rigidez considerable para que la máquina no se encuentre expuesta a vibraciones externas.
- Para mediciones estables es necesario que las mismas se realicen bajo un ambiente con temperatura constante evitando así cualquier descompensación en el funcionamiento de los acelerómetros.

12 BIBLIOGRAFÍA

Acosta, D., & Molina, J. (2011). *Adquisición de vibraciones mecánicas de un motor en funcionamiento usando Labview*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Azima. (2012). *Vibration analysis reference*.
Obtenido de <http://azimadli.com/training-resources/vibration-reference/>

Budynas, R., & Nisbett, J. (2008). *Diseño en Ingeniería mecánica de shigley*. Mexico: McGraw-Hill.

Daza, G. (2007). *Vibraciones Mecánicas*. Concepción: Universidad Técnica Federico Santa María.

Kuo, B. (1996). *Sistemas de control automático*. Mexico: Prentice Hall Hispanoamérica S.A.