

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**DISEÑO E IMPLANTACIÓN DE LA ELECTRÓNICA DE UN SISTEMA DE
SENSADO DE LAS VIBRACIONES DE UNA ESTRUCTURA METÁLICA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Marco Alexis Ycaza Lengua

ASESOR: Mg. Willy Eduardo Carrera Soria

Lima, abril del 2019



*A mis padres, quienes me apoyan
en todo momento.*

AGRADECIMIENTOS

A Richard Rivera y Jorge Moreno, docentes en el laboratorio de Acústica de la sección de Física de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por el apoyo con las pruebas de calibración de la presente tesis. A la diseñadora gráfica e industrial Consuelo Cano por el apoyo en el diseño y modelado gráfico lo largo del desarrollo de la misma.



RESUMEN

Las vibraciones son efectos mecánicos presentes en diversas estructuras y mecanismos de soporte. Dichas vibraciones pueden presentar beneficios o perjuicios para los sistemas mecánicos. Para evitar las consecuencias perjudiciales de las vibraciones, se estudian y se evalúan formas de aislar o disipar sus efectos.

Bajo este enfoque de estudio, en la especialidad de Ingeniería Mecánica se desarrolló un módulo estructural que tiene como objetivo mostrar los efectos de las vibraciones a través de patrones de vibración que ocurren al perturbar dicha estructura con una fuerza excitatriz proveniente de un actuador (se referirá al mismo como “**trabajo previo**”). En la presente tesis se desarrolla un sistema electrónico y una interfaz digital que, en su conjunto, expanden el potencial de dicho módulo educativo, permitiendo al estudiante apreciar de manera interactiva las señales de vibraciones en los dominios de tiempo y frecuencia para un mejor análisis visual.

Para el sensado de vibraciones, se utilizó un sensor de efecto Hall y una interfaz programada en LabView. La precisión de dicho sensor fue comparada con un acelerómetro de alta prestación (Bruel&Jaer) en un escenario de trabajo desarrollado en el laboratorio de Acústica de la Pontificia Universidad Católica del Perú. En los resultados se concluye que se puede detectar y mostrar las señales en tiempo real con una frecuencia cuyos picos presentan un error máximo de 0.79 % con respecto al elemento patrón (acelerómetro). Por otro lado, se realizó la calibración del generador de vibraciones (actuador) de la estructura metálica y se halló que la frecuencia medida por el sensor de velocidad (codificador) presenta un máximo error del 6% con respecto a un elemento patrón (tacómetro).

Por último, se registró los datos de una zona específica de la estructura ante un impacto de un martillo de goma para poder registrar las vibraciones en un archivo de texto, el cual posteriormente se procesó con una hoja de cálculo en Excel. Con dichos resultados, las frecuencias de resonancia halladas en la presente tesis son diferentes a las frecuencias experimentales halladas en el trabajo previo por 39.59 %. Así mismo se obtiene 36.19 % de error al comparar los resultados del trabajo previo con los resultados analíticos. Sin embargo, este error se reduce a 17 % cuando se compara los resultados de la presente tesis con los resultados analíticos.

DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : DISEÑO E IMPLANTACIÓN DE LA ELECTRÓNICA DE UN SISTEMA DE SENSADO DE LAS VIBRACIONES DE UNA ESTRUCTURA METÁLICA

Área : Circuitos y Sistemas Electrónicos # 1336

Asesor : Mg. Willy Eduardo Carrera Soria

Alumno : Marco Alexis Ycaza Lengua

Código : 20112471

Fecha : 14-10-2016



Descripción y Objetivos

En la especialidad de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú, se cuenta con un módulo estructural que es un sistema de enseñanza cualitativo. Esta alternativa es buena ya que es el único módulo del Laboratorio de Mecánica Aplicada que muestra los efectos de las vibraciones en estructuras metálicas, sin embargo dicho módulo está limitado dado que carece de un sistema electrónico de sensado de vibraciones, impidiendo que se pueda aprovechar al máximo, ya que solo se cuenta con la percepción visual para discernir el fenómeno mecánico. La presente tesis entonces plantea diseñar e implementar un sistema electrónico de sensado de vibraciones y acoplarlo al módulo estructural para que se muestre a través de una interfaz computacional parámetros mecánicos como frecuencia, amplitud y fase de los estados de resonancia de la estructura. La tesis desarrollará los siguientes objetivos:

- Diseñar e implementar todo el hardware que involucra los sensores de posición que detecten los modos de vibración: sensor, actuador, excitador, controlador, fuente de alimentación, etc.
- Programar el controlador para que integre las señales de los sensores de posición, sensor de velocidad del motor y envíe como respuesta dichas señales direccionadas al computador y al actuador de la estructura. También programar la interfaz virtual para mostrar las gráficas en el tiempo y frecuencia de la respuesta del sistema para poder determinar los estados de vibración y resonancia.
- Evaluar los datos obtenidos para ver qué tan eficiente es el sistema al comparar los datos obtenidos del módulo con los datos obtenidos en la tesis de Ed Arzapalo.

MÁXIMO 50 PÁGINAS

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

M. Sc. Ing. MIGUEL ÁNGEL CATÁÑO SÁNCHEZ
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Ing. WILLY CARRERA SORIA
PROFESOR ASOCIADO

DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : DISEÑO E IMPLANTACIÓN DE LA ELECTRÓNICA DE UN SISTEMA DE
SENSADO DE LAS VIBRACIONES DE UNA ESTRUCTURA METÁLICA

Índice

Introducción

1. Problemática de la enseñanza del análisis vibracional
2. Componentes de un sistema de análisis vibracional
3. Diseño e implementación del sistema de sensado de vibraciones
4. Ensayos y pruebas finales

Conclusiones

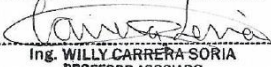
Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

M. Sc. Ing. MIGUEL ÁNGEL CATANO SÁNCHEZ
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
SECCIÓN ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Ing. WILLY CARRERA SORIA
PROFESOR ASOCIADO



MÁXIMO 50 PÁGINAS

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.....	2
1.1. Definición de vibración en el ámbito de ingeniería.....	2
1.2 Importancia de la ingeniería de vibraciones en estructuras mecánicas	2
1.3 Modulo Estructural	3
1.4 Necesidad de módulo educativo.....	4
1.5 Declaración del marco problemático.....	4
CAPÍTULO 2.....	6
2.1 Sensor de Efecto Hall.....	6
2.2 Antecedentes de investigaciones para el sensado de vibraciones	7
2.2.1 Diseño de un sistema de sensado sin contacto para el monitoreo de la fabricación de bolsas plásticas.....	7
2.2.2 Análisis de vibración basada en la técnica de Balanceo de Campo Magnético	8
2.3 Diagrama de bloques	8
CAPÍTULO 3.....	10
3.1 Objetivo general	10
3.2 Objetivos específicos	10
3.3 Diseño de los componentes del diagrama de bloque	10
3.4 Hardware.....	11
3.4.1 Planta Mecánica.....	11
3.4.2 Sensores.....	11
3.4.2.1 Sensor de vibración.....	11
3.4.2.2 Sensor de velocidad.....	15
3.4.3 Acondicionador de señal	18
3.4.4 Actuador.....	21
3.4.5 Excitador	21
3.4.6 Circuito del controlador.....	26
3.4.7 Transmisor	28
3.4.8 Fuente de alimentación	28
3.5 Software.....	29
3.5.1 Programa del controlador.....	29
3.5.1.1 Funciones requeridas	29
3.5.1.2 Diagrama de flujo	29
3.5.2 Interfaz de usuario.....	31
CAPÍTULO 4.....	32
4.1 Pruebas de las etapas independientes.....	32

4.1.1.	Prueba de calibración del sensor de velocidad.....	32
4.1.2.	Prueba de calibración de sensores de vibración.....	34
4.1.3.	Prueba del acondicionador de señal.....	37
4.1.4.	Sensor de velocidad del actuador.....	39
4.1.5.	Prueba del circuito excitador.....	40
4.2	Pruebas del sistema completo.....	41
4.2.1	Pruebas del sensado en los tres niveles de la estructura metálica	41
4.2.2	Prueba de impacto “Bump Test” para el cálculo de las frecuencias de resonancia.....	42
CONCLUSIONES.....		46
FUENTES.....		47
ANEXOS		49



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Módulo estructural	3
Figura 2 Patrones de desplazamiento del módulo estructural (Arzapalo 2015:47) ..	3
Figura 3 Escenario actual	5
Figura 4 Escenario Propuesto.....	5
Figura 5 Principio Hall.....	6
Figura 6 Diagrama del sistema	7
Figura 7 Diagrama del sistema	8
Figura 8 Diagrama de bloques.....	8
Figura 9 Planta del sistema: módulo estructural.....	11
Figura 10 Relación Voltaje de salida del sensor versus intensidad de campo magnético	13
Figura 11 Escenario para el registro de campo magnético usando sensor de efecto Hall.	14
Figura 12 Voltaje de salida del sensor cuando se aleja el polo norte del imán desde 0 mm hasta 45 mm.	14
Figura 13 Señal de salida del sensor registrada entre 5 y 15 mm.....	15
Figura 14 Codificador magnético versus codificador óptico	16
Figura 15 Disco del codificador (izquierda) Señal obtenida en osciloscopio (derecha).	17
Figura 16 Circuito para acondicionar la señal	19
Figura 17 Esquema del circuito excitador	22
Figura 18 Diseño del circuito excitador	23
Figura 19 Diseño de la tarjeta principal que contiene el controlador.	27
Figura 20 Diagrama de flujo del proceso principal	30
Figura 21 Escenario de trabajo para obtener las velocidades con el instrumento estándar	33
Figura 22 Descripción del escenario de trabajo.	34
Figura 23 Realización de la prueba de comparación de la señal obtenida por sensor Hall versus señal del generador y acelerómetro.	34
Figura 24 Colección de resultados de la prueba	36
Figura 25 Prueba de funcionamiento del circuito acondicionador	37
Figura 26 Respuesta del sensor ante los desplazamientos del imán	38
Figura 27 Comparativa de respuestas del sensor sin acondicionamiento (amarillo) y con acondicionamiento (celeste).....	38
Figura 28 Esquema de trabajo.....	39

Figura 29 Respuestas del tren de pulsos del terminal de señal del codificador.....	39
Figura 30 Señal PWM proveniente del controlador	40
Figura 31 PWM amplificada a través del circuito excitador medida en los terminales del actuador.....	40
Figura 32 Escenario de trabajo con el sistema completo para la captura de desplazamientos del módulo.	41
Figura 33 15 Programa en funcionamiento, se aprecia las señales en tiempo real de cada nivel de la estructura	42
Figura 34 16 Escenario de trabajo: "Bump Test".....	43
Figura 35 Captura de la interfaz mientras se encuentra grabando datos en un archivo de texto.	43
Figura 36 Espectro de magnitud y fase calculados con una hoja de datos en Excel, a partir de la data grabada por la interfaz	44



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Recopilación de los resultados del trabajo previo en relación a las frecuencias naturales de la estructura.	4
Tabla 2 Requerimientos del sensor	12
Tabla 3 Comparación de características	12
Tabla 4 Comparación de codificador óptico versus codificador magnético.	16
Tabla 5 Características del actuador.....	21
Tabla 6 Alternativas para el circuito excitador.....	22
Tabla 7 Requerimientos del controlador	26
Tabla 8 Requerimiento de corriente y voltaje teóricos.....	28
Tabla 9 Contrastación de los valores obtenidos por el tacómetro versus los medidos por el sensor de velocidad.	33
Tabla 10 Comparativa de resultados	37
Tabla 11 Resultados de la prueba del Bump Test.....	43
Tabla 12 Comparativa de los resultados experimentales versus teóricos del trabajo previo.....	45
Tabla 13 Comparativa de los resultados experimentales de la presente tesis versus los teóricos.	45
Tabla 14 Comparativa de los resultados experimentales de la presente tesis versus los del trabajo previo.....	45

INTRODUCCIÓN

Las vibraciones son respuestas repetitivas en un sistema mecánico sometido a fuerzas oscilatorias; el ritmo de esta respuesta se conoce como frecuencia. El efecto de vibración tiene efectos tanto positivos como negativos. Estos últimos efectos significan desventajas indeseables como el desgaste de las estructuras de soporte, edificios, puentes, etc.

Debido a la trascendencia de ambos efectos arriba mencionados, el fenómeno de vibración se ha vuelto un objeto necesario de estudio durante años. Actualmente, en el ámbito de la ingeniería mecánica, las clases teóricas en toda universidad son acompañadas con laboratorios que explican de manera experimental e interactiva los fenómenos de vibración en estructuras. El objetivo de la presente tesis radica en desarrollar e implementar un sistema de sensado electrónico capaz de mostrar las señales de vibración en el dominio del tiempo y frecuencia en una interfaz digital. De esta manera, el estudiante de la especialidad de mecánica podrá apreciar cualitativamente los efectos de las vibraciones en una estructura mecánica a escala, lo cual le permitirá interiorizar los conceptos teóricos de resonancia óptimamente.

El presente trabajo está conformado por cuatro capítulos. En el primero se describe la problemática de la enseñanza del análisis vibracional. El segundo capítulo describe el estado del arte, el modelo teórico del sistema de sensado y la interacción de los componentes que lo conforman. El tercer capítulo delinea el objetivo principal de la tesis, así como los objetivos específicos; luego especifica la metodología de evaluación de requerimientos, alternativas, diseño o elección de cada bloque descrito en el modelo teórico. Finalmente, el capítulo cuatro detalla los ensayos del sistema de sensado según las etapas más importantes, mostrando de esta manera el sistema completo. Asimismo, describe la prueba de impacto "Bump Test" para hallar las frecuencias naturales con una comparativa de los resultados hallado

CAPÍTULO 1

PROBLEMÁTICA DE LA ENSEÑANZA DE VIBRACIONES MECÁNICAS

En el presente capítulo se desarrollarán algunos conceptos importantes relacionados a las vibraciones mecánicas. Luego, se describirá el actual módulo educativo para la enseñanza de vibraciones mecánicas. Por último, se desarrollará la problemática que plantea la necesidad de mejorar el estudio de las vibraciones mecánicas.

1.1. Definición de vibración en el ámbito de ingeniería

Las vibraciones son “oscilaciones en sistemas mecánicos dinámicos” (Adams 2010: 2) siendo la frecuencia el ritmo de dichas oscilaciones. El efecto de vibración tiene ventajas positivas como la producción de música por instrumentos de cuerdas y la disipación de las fuerzas de tracción en vehículos (De Silva 1999: 8). Sin embargo, también presenta desventajas indeseables por ejemplo “cuando el ala de un avión vibra excesivamente, los pasajeros comienzan a sentirse incómodos, más aún cuando dicha frecuencia corresponde a la frecuencia de resonancia de los órganos internos del cuerpo humano [...] Se sabe que la frecuencia de resonancia del tracto digestivo humano, que está entre 4 Hz a 8 Hz aproximadamente debe ser evitada a toda costa cuando se diseña aeronaves de alto desempeño” (Adams 2010: 2).

1.2 Importancia de la ingeniería de vibraciones en estructuras mecánicas

Con respecto a la aplicación de la ingeniería de vibraciones tenemos: “La eliminación o supresión de vibraciones no deseadas en las que se incluyen [...] interacciones dinámicas entre vehículos y puentes, ruido generado por equipos de construcción; vibraciones de máquinas y herramientas transmitidas a sus estructuras de soporte [...] y fallas debido a cargas dinámicas” (De Silva 1999: 7). Para lograr evitar dichos perjuicios se hace uso de un análisis el cual debe usar herramientas matemáticas para modelar y predecir los potenciales problemas de vibración y sus soluciones, que no son obvios en los diseños de ingeniería preliminares (Adams 2010: 3).

1.3 Modulo Estructural

En el año 2015, como resultado de una búsqueda para la mejora del entendimiento de los efectos de los fenómenos de vibraciones, se diseñó e implementó como asunto de tesis (de ahora en adelante **“trabajo previo”**) un módulo educativo en la especialidad de Ingeniería Mecánica, el cual consiste en una estructura metálica que muestra los patrones de vibración al alcanzar niveles establecidos de resonancia al ser afectada por una fuerza excitatriz (Arzapalo 2015: 41). En la figura 1 se muestra el módulo con un actuador (un motor con una carga desbalanceada la cual induce vibraciones).



Figura 1 Módulo estructural

La figura 2 muestra los modos de resonancia de la estructura metálica, en los cuales la estructura vibra de manera progresivamente violenta.

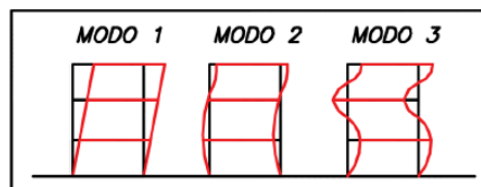


Figura 2 Patrones de desplazamiento del módulo estructural (Arzapalo 2015:47)

La estructura metálica presenta cuatro configuraciones de armado. Sin embargo, durante la presente tesis se desarrollará toda la experimentación en base a la primera configuración, la cual es de unión empotrada y nodos empotrados.

En el **trabajo previo** se halló de manera analítica y experimental las frecuencias naturales de la estructura metálica. Para su análisis se utilizó el método de elementos finitos, y para la prueba experimental se recurrió al uso de un acelerómetro de carga y un software especial del laboratorio de Física de la PUCP. En la tabla 1 se presenta los resultados analíticos y de experimentación de las frecuencias naturales de la estructura metálica cuando ésta tiene una configuración de unión empotrada y nodos empotrados.

Tabla 1 Recopilación de los resultados del trabajo previo en relación a las frecuencias naturales de la estructura.

Modos de resonancia	Frecuencias Naturales-Método Experimental en Hertz	Frecuencias Naturales - Método Analítico en Hertz
1	2.49	3.04
2	5.43	8.51
3	8.12	12.30

Elaboración propia

1.4 Necesidad de módulo educativo

El Laboratorio de Diseño de la especialidad de Ingeniería Mecánica cuenta con diversos módulos educativos. Sin embargo, existe la necesidad de un módulo electrónico de fácil uso, instalación y transporte, el cual brinde al estudiante una forma interactiva de entender el fenómeno de vibraciones en estructuras.

1.5 Declaración del marco problemático

En el ámbito actual de la educación en ingeniería mecánica, las universidades cuentan con laboratorios que explican de manera experimental e interactiva los fenómenos de vibración en estructuras industriales. Estos laboratorios exigen que el estudiante interactúe con módulos educativos con estructuras a escala para que pueda interiorizar mejor los fundamentos explicados.

La figura 3 muestra el escenario final del **trabajo previo**, en la cual el estudiante puede observar los modos de vibración y posteriormente complementar el aprendizaje con la lectura del informe. Dichos objetivos presentan un margen de potencial, el cual se puede aprovechar para construir un sistema electrónico (ver figura 4) que permita al estudiante tener una interfaz gráfica donde pueda apreciar en tiempo real las señales producidas en dominios del tiempo y frecuencia.

De esta forma, resulta conveniente el diseño e implementación de un módulo educativo completo que capacite de mejor manera al estudiante con respecto al comportamiento de las señales involucradas en las oscilaciones de una estructura metálica cuando se somete a estados de resonancia.

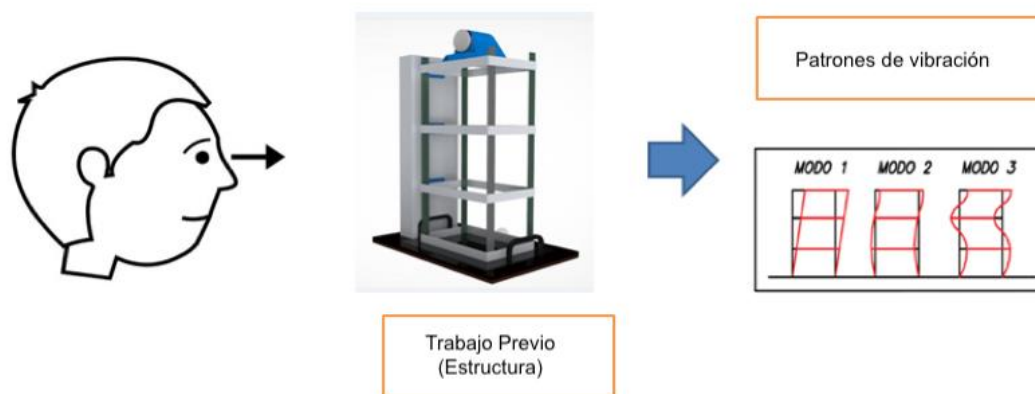


Figura 3 Escenario actual



Figura 4 Escenario Propuesto

CAPÍTULO 2

COMPONENTES DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS VIBRACIONAL

La presente tesis tiene como objeto de estudio el sensado de vibraciones de una estructura metálica mediante un sensor de efecto Hall. El siguiente punto presenta brevemente el principio de funcionamiento del sensor de efecto Hall. Luego se presentará un par de antecedentes de investigación concernientes al empleo de sensores de efecto Hall. Con ambas investigaciones se busca extrapolar los componentes del diagrama de bloques del módulo de sensado.

2.1 Sensor de Efecto Hall

El sensor de efecto Hall (denominado así por Edwin Herbert Hall) principalmente es un dispositivo que en función de la proximidad de un campo magnético puede variar una tensión de salida. Su funcionamiento sigue el principio de efecto Hall (ver figura 5) en la cual el voltaje Hall V_H es proporcional al producto vectorial entre la corriente y el campo magnético (Honeywell 2016: 4).

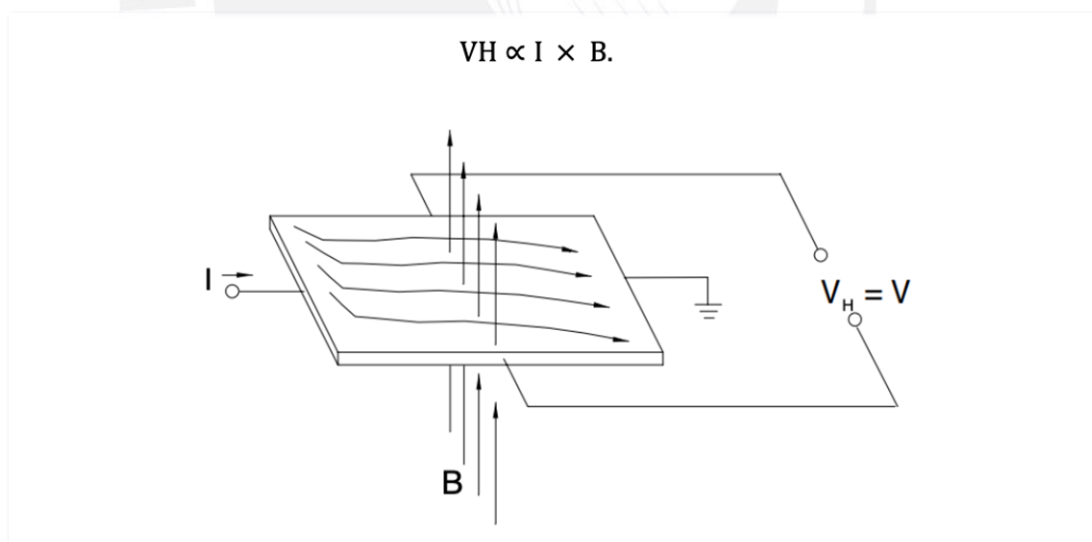


Figura 5 Principio Hall, campo magnético presente (Honeywell 2016: 4).

2.2 Antecedentes de investigaciones para el sensado de vibraciones

A continuación, se presenta dos casos de investigaciones relacionados a sistemas de sensado por efecto Hall. En la primera investigación se resalta el proceso de medición usando sensores magnéticos para fines industriales. En la segunda se investiga un módulo para medir el sensado de las vibraciones de un motor. Ambas investigaciones nos dan un patrón similar de componentes que tiene un sistema de sensado magnético. Por último, con dicho patrón se plantea el diagrama de bloques para el módulo de la presente tesis.

2.2.1 Diseño de un sistema de sensado sin contacto para el monitoreo de la fabricación de bolsas plásticas

Esta investigación (Supattatham 2010: 93-91) trata sobre el sensado de revoluciones del motor de una máquina de fabricación de bolsas, en la cual se mide el parámetro de flujo magnético cada vez que el magneto pasa al lado del sensor de efecto Hall. Con este voltaje, sensado en el tiempo, se puede determinar la velocidad angular del motor y la frecuencia del mismo. En la siguiente figura se pueden apreciar los principales componentes del sistema, entre ellos sensores, microcontroladores y un servidor para procesar la información.

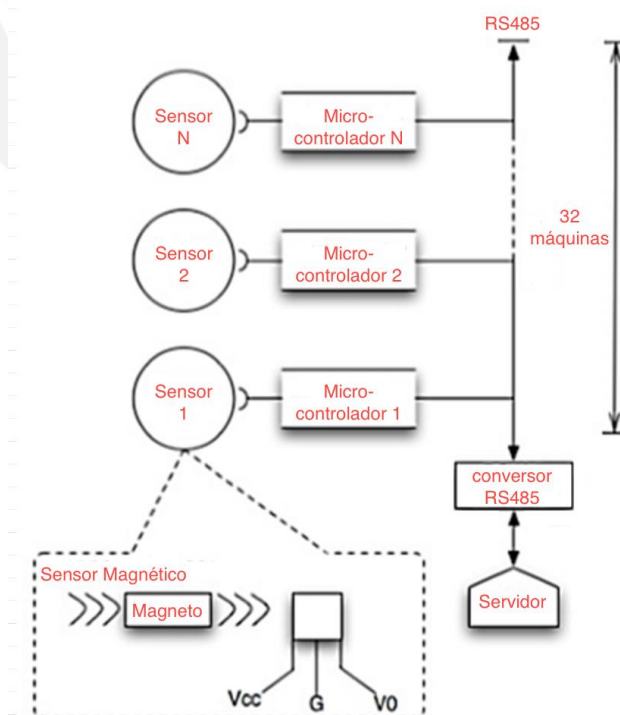


Figura 6 Diagrama del sistema

(Supattatham 2010: 93-91)

2.2.2 Análisis de vibración basada en la técnica de Balanceo de Campo Magnético

En esta investigación (Sriratana 2018: 1-4) se presenta el diseño de un sistema de medición de vibraciones de acuerdo al estándar ISO 10816-1. La vibración analizada es la vibración de un motor con una carga en cuatro posiciones de balance. Para la implementación de dicho sistema se utilizó unos imanes de neodimio debido a que posee una alta calidad magnética ya que causaba un grande cambio en la salida de voltaje del sensor. Esto mismo se tomó en consideración en la presente tesis. El diagrama de bloques presentado incluye el sensor de vibración, un módulo de sensado, un acondicionamiento de señal, un microcontrolador, una interfaz (una computadora) tal cual se muestra en la figura 7.

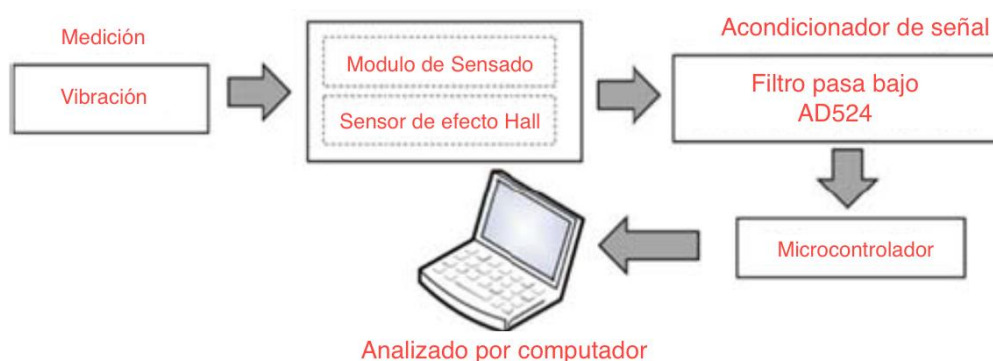


Figura 7 Diagrama del sistema (Sriratana 2018: 1-4).

2.3 Diagrama de bloques

Comparando ambos modelos presentados en dichas investigaciones en la figura 6 y la figura 7 en base al objetivo de la presente tesis se plantea el siguiente diagrama de bloques (ver figura 8).

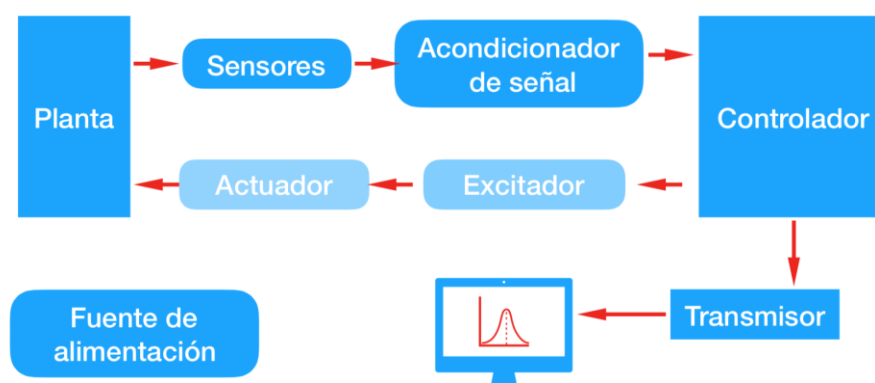
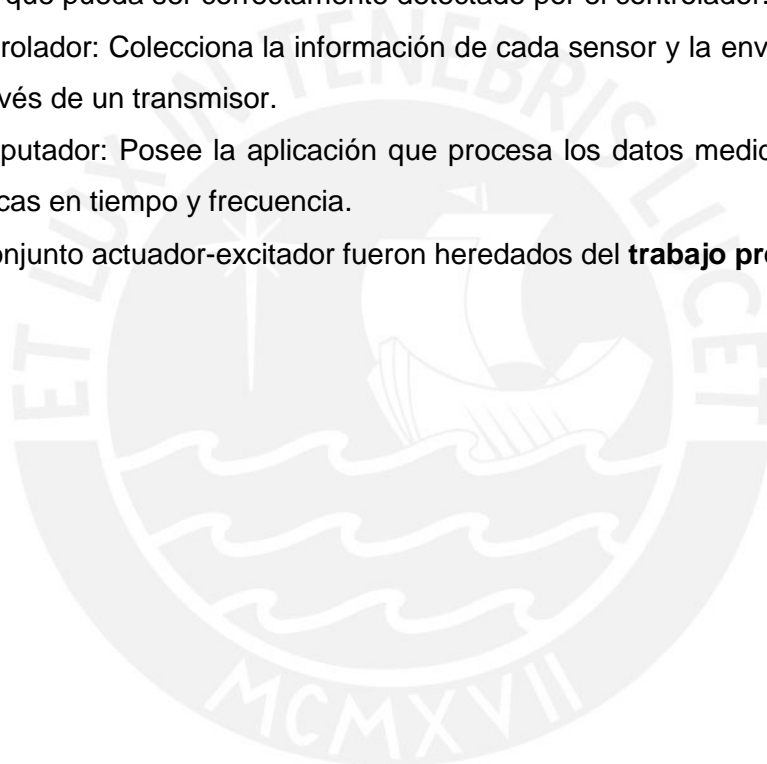


Figura 8 Diagrama de bloques (Elaboración propia)

Para el diagrama de bloques previo se tiene la descripción de su funcionalidad como se muestra a continuación.

- Planta: La estructura metálica (**trabajo previo**) cuyas vibraciones serán detectadas por los sensores
- Sensores: Registran la variación de campo magnético de los imanes instalados en la estructura (planta) producto de la vibración de la misma y envían la información al conversor analógico-digital del controlador.
- Acondicionador de señal: amplifica la salida de tensión del terminal de un sensor para que pueda ser correctamente detectado por el controlador.
- Controlador: Colecciona la información de cada sensor y la envía de forma serial a través de un transmisor.
- Computador: Posee la aplicación que procesa los datos medidos y muestra las gráficas en tiempo y frecuencia.
- El conjunto actuador-excitador fueron heredados del **trabajo previo**.



CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE SENSADO DE VIBRACIONES

3.1 Objetivo general

La presente tesis plantea diseñar e implementar un sistema electrónico de sensado de vibraciones y acoplarlo al módulo estructural, con el fin de mostrar parámetros mecánicos (como frecuencia o amplitud en tiempo real de los estados de resonancia de la estructura) a través de una interfaz computacional.

3.2 Objetivos específicos

- Diseñar e implementar todo el hardware que involucra el sensor, actuador, excitador, controlador, fuente de alimentación y demás elementos presentados posteriormente en el diagrama de bloques.
- Programar el controlador para integrar las señales de los sensores de posición y las del sensor de velocidad del motor, y que luego envíe como respuesta dichas señales direccionadas al computador y al actuador de la estructura.
- Programar la interfaz virtual para mostrar las gráficas en el tiempo y frecuencia de la respuesta del sistema, y así determinar los estados de vibración y resonancia de la estructura.
- Evaluar los datos obtenidos para ver qué tan eficiente es el sistema al comparar los datos obtenidos del módulo con los datos obtenidos en el **trabajo previo**.

3.3 Diseño de los componentes del diagrama de bloque

A continuación, se expondrá el hardware y software que comprende el sistema de sensado. En el hardware se verá los requerimientos, alternativas, criterio de selección y criterio en algunos componentes elementales del diagrama de bloques. Debido a que algunos elementos se heredan del **trabajo previo**, en algunos componentes se presentará la descripción. También se verá para la parte que involucra el software, el diagrama de flujo que presentan los algoritmos del programa del controlador y la interfaz. Por último, se describirá la ingeniería de diseño utilizada para el diseño de la estructura de soporte que contendrá los circuitos del sistema.

3.4 Hardware

3.4.1 Planta Mecánica

La planta mecánica es la estructura metálica sobre la cual se ejerce una fuerza excitatriz que proviene del actuador, y esta fuerza se incrementa gradualmente para alcanzar frecuencias de resonancia e inducir la estructura a vibrar en patrones determinados. La estructura cuenta con tres niveles a medir se muestra en la figura 9.

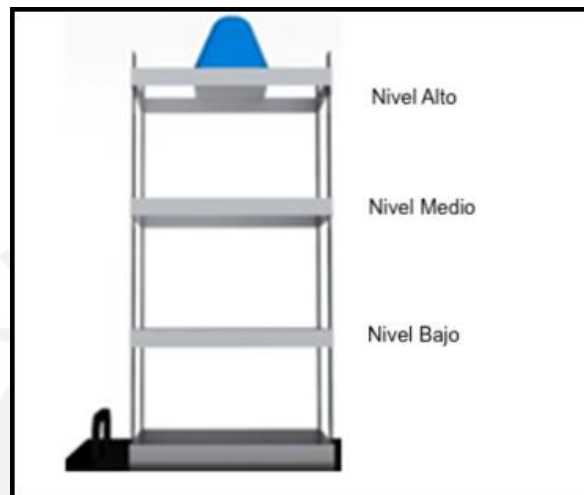


Figura 9 Planta del sistema: módulo estructural
(Diseño en Anexo B)

Para determinar las amplitudes de los desplazamientos laterales, se realizó una inspección utilizando una hoja milimetrada y se experimentó aumentando la fuerza excitatriz que ejerce el actuador de manera gradual. Se halló que los niveles se desplazaban lateralmente con una amplitud total mínima de 2 mm y máxima de 10 mm.

3.4.2 Sensores

3.4.2.1 Sensor de vibración

Estos dispositivos detectan variables físicas como aceleración, proximidad, campo magnético y las convierten en señales eléctricas. Con dichos dispositivos se plantea medir las vibraciones de los tres niveles de la estructura metálica en términos de frecuencia (Hz). A continuación, se explicará los requerimientos de los sensores, las alternativas de sensores como mejores candidatos para cubrir los requerimientos y, por último, el criterio de selección del sensor con un análisis posterior de la característica de respuesta del mismo.

Requerimientos:

Según los valores obtenidos experimentalmente por parte del autor, y con las consideraciones del trabajo previo, se plantean a continuación los siguientes requerimientos que debe cumplir el sensor a escoger.

Tabla 2 Requerimientos del sensor

REQUERIMIENTOS
Registrar un rango de amplitudes de desplazamiento mínimo de 2 mm y máximo 10 mm.
Entregar un voltaje analógico entre 0 a 5 V.
Medir frecuencias bajas: 1 Hz a 25 Hz.

Elaboración Propia

Tal como describe la tabla 2, la amplitud que se requiere registrar es de 2 mm, lo cual significa que la estructura se mueve lateralmente como mínimo 1 mm a la izquierda o derecha. Cuando entra en resonancia, lo máximo que puede desplazarse es 10 mm en total. Esta variación se da a una frecuencia en el orden de los Hertz, precisamente de 1 Hz a 25 Hz (Arzapalo 2015:42), lo cual implica que el sensor debe medir frecuencias bajas.

Alternativas:

Se presenta tres alternativas a modo de resumen en la tabla 3.

Tabla 3 Comparación de características

Características	SS49E	Acelerómetro de carga 4383	HC-SR04
Voltaje salida	Analógico	Analógico	Digital
Voltaje entrada	2.7 V a 6.5 V	No	5 V
Acondicionamiento	Requiere	No requiere	No requiere
Frecuencia de trabajo	Hasta 333 KHz	0.1 – 8400 Hz	Hasta 40Khz
Costo	S/. 20	\$ 400	S/. 30
Sensibilidad o error	1.8 mv/G	31pC/g	±3mm
Contacto con objetivo a medir	No	Si	No

Elaboración Propia

Criterios de selección:

De acuerdo a los requerimientos presentados, es necesario trabajar con frecuencias bajas. En este sentido, los tres sensores cumplen con el rango de frecuencias solicitado. No obstante, en lo que respecta al rango de amplitudes a registrar, el sensor de ultrasonido HC-SR04 tiene una precisión de $\pm 3\text{mm}$ lo cual descarta su uso, puesto que no podría detectar los mínimos desplazamientos de la estructura. Con respecto a la sensibilidad, el sensor de carga 4383 y el sensor de efecto Hall SS49E presentan una sensibilidad que está relacionada con parámetros físicos distintos al desplazamiento. Por tanto, de elegirse uno u otro es fundamental hacer un análisis posterior para determinar cómo se ha de relacionar el parámetro físico de desplazamiento con los propios parámetros físicos que los sensores detectan. Por otro lado, el acelerómetro de carga 4383 presenta un precio elevado y requiere, además, de un elemento de carga para su adquisición. En contraste, el sensor de efecto Hall presenta un menor precio y no requiere contacto directo con el objetivo a medir, dado que los únicos elementos que tendrían contacto serían los imanes. Por los motivos antes expuestos, se ha elegido este último para su uso en la presente tesis. A continuación, se analizará la respuesta del sensor y se demostrará cómo medir de manera indirecta los desplazamientos de la estructura a través del imán.

Características de respuesta del sensor:

Según la hoja de datos del sensor de efecto Hall (Honeywell 2015: 2-3), se obtiene que la respuesta ante una variación de intensidad de campo magnético es lineal con respecto al voltaje que entrega (ver figura 10).

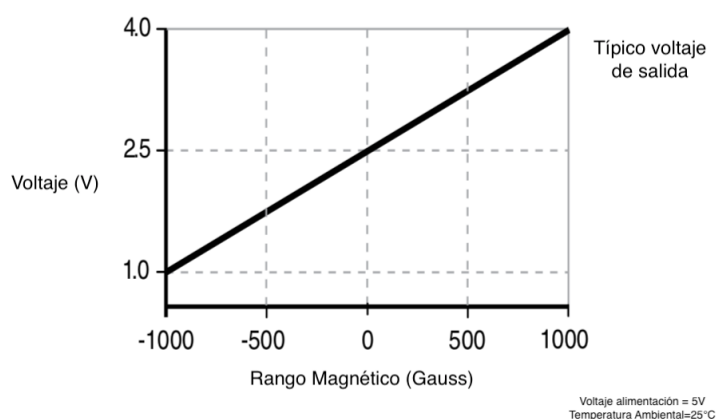


Figura 10 Relación Voltaje de salida del sensor versus intensidad de campo magnético (Honeywell 2015: 3)

Dejando establecida la relación lineal, el siguiente paso es revisar la relación entre el desplazamiento del sensor (el cual simulará la estructura cuando se aproxima o aleja del sensor durante la vibración) y la respuesta de voltaje del sensor. En el escenario a continuación (ver figura 11) se aproxima un imán de neodimio al sensor para medir el campo magnético; sin embargo, dicho escenario se aprovecha para registrar experimentalmente la respuesta de voltaje ante variaciones de desplazamientos.

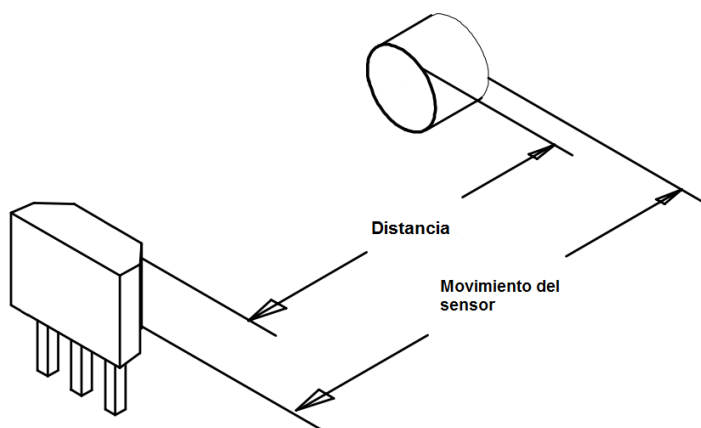


Figura 11 Escenario para el registro de campo magnético usando sensor de efecto Hall.

(Honeywell 2016: 16)

Para obtener la relación de los parámetros de desplazamiento del imán y voltaje de salida del sensor, se halló de manera experimental el voltaje de respuesta versus el alejamiento del polo norte del imán del sensor (figura 12).

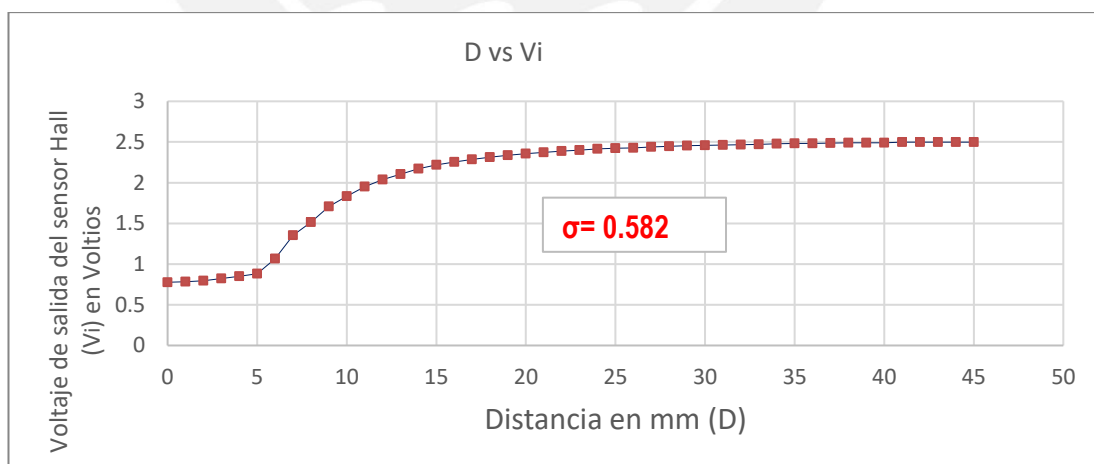


Figura 12 Voltaje de salida del sensor cuando se aleja el polo norte del imán desde 0 mm hasta 45 mm.

El resultado de la gráfica presenta una desviación estándar de 0.582 para una muestra de 45 valores, lo cual presenta determinados puntos de inflexión (antes de 5mm y después de 15mm). Para ello tomamos un segmento reducido de los datos (15 valores) de modo tal que la excursión en distancia del imán contra el sensor se mantenga en ± 5 mm. La Figura 3.7 muestra un extracto de datos de 5 mm a 15 mm con un punto de reposo en $D=10$ mm.

Esta nueva gráfica presenta una desviación estándar menor a la anterior en 21%.

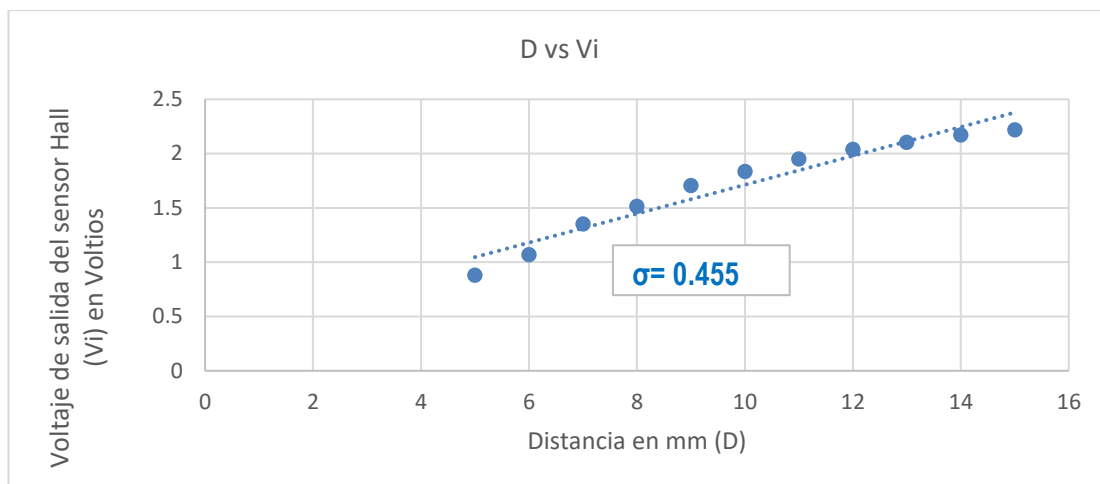


Figura 13 Señal de salida del sensor registrada entre 5 y 15 mm

Usando esta nueva gráfica, tomamos como límite inferior $V_m = 0.88$ V, límite superior $V_M = 2.21$ V, y un voltaje V_{rep} para una posición de reposo del sensor a 10 mm de 1.83 V.

3.4.2.2 Sensor de velocidad

Requerimientos:

Se requiere que pueda medir velocidades del rotor de hasta 4400 RPM (o su equivalente a 73.3 Hz). Este valor es la máxima velocidad de rotación del motor o también traducido como su mayor frecuencia de trabajo.

Alternativas:

Para satisfacer este requerimiento se presentan dos opciones: el sensor de velocidad óptico (codificador heredado) y el codificador implementado por un sensor de efecto Hall digital con un elemento ferromagnético adherido al eje. Ver figura 14.

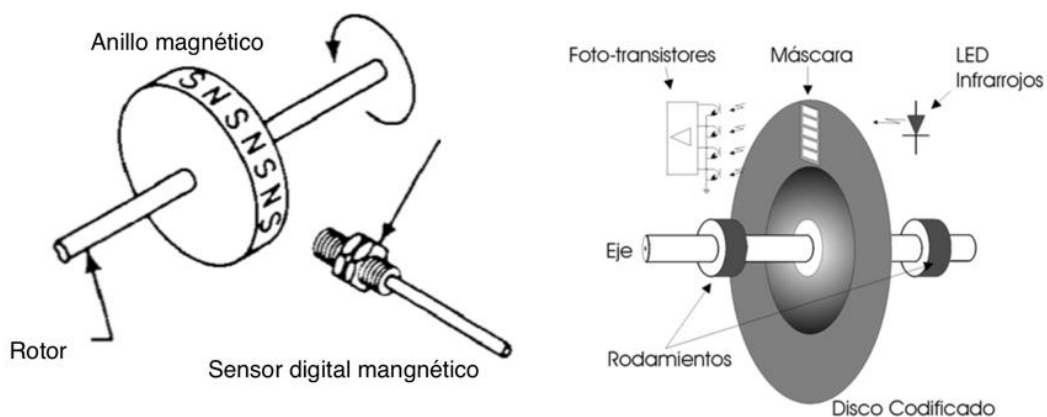


Figura 14 Codificador magnético versus codificador óptico
(Honeywell 2016:63) - (Contaval 2017) .

La tabla 4 muestra las características de los sensores para evaluar el criterio de selección.

Tabla 4 Comparación de codificador óptico versus codificador magnético.

Características	Codificador Óptico	Codificador magnético
¿Elemento adicional?	No	Si (Imán)
Voltaje de alimentación	5 V	5 V
Velocidad angular	Hasta 73.3 Hz	Hasta 337 KHz
Precio	S/. 0 (heredado)	10 soles (módulo e imán)

Elaboración propia.

Criterios de selección:

Se prefiere el codificador óptico porque este viene incluido en la parte posterior del motor y no necesita adicionarse algún recurso externo, como es el caso del sensor de efecto hall (que requiere un elemento ferromagnético como fuente de intensidad de campo magnético).

Características del sensor óptico:

El sensor de velocidad (codificador) envía señales de pulsos que resultan de la interrupción del flujo lumínico del fotodiodo (ver figura 14 – derecha) por un disco con orificios circundantes adherido en el centro al eje del rotor. El ritmo de los pulsos es proporcional a la frecuencia de giro del rotor.

Para el sistema de sensado es primordial tener en cuenta que la frecuencia de excitación transmitida a la estructura será la frecuencia del motor por revolución. Por otro lado, para calcular la frecuencia del motor es indispensable conocer la cantidad de orificios del codificador. Revisando la estructura interna, se observa que cuenta con 100 orificios (figura 15). Esto nos permite establecer la siguiente fórmula:

$$F_m = \frac{F_p}{n} = 0.01F_p$$

Donde:

F_m: Frecuencia del motor

F_p: Frecuencia del tren de pulsos

n: Cantidad de pulsos por revolución (Cantidad de orificios del disco).

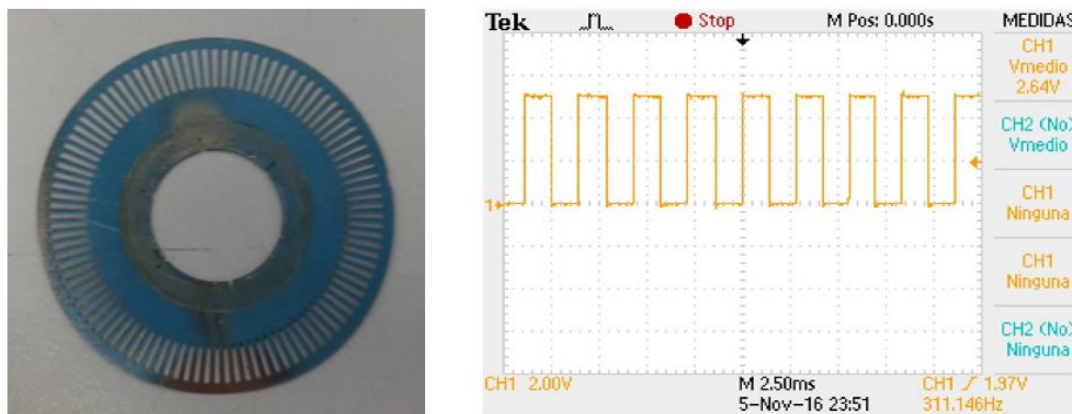


Figura 15 Disco del codificador (izquierda) Señal obtenida en osciloscopio (derecha).

El codificador muestra pulsos cuyo voltaje pico-pico es de 5 V tal como se muestra en la figura 15 - derecha. También podemos apreciar que la frecuencia que muestra el osciloscopio es de 311.146 Hz. Entonces mediante la relación establecida previamente se aprecia que la frecuencia del motor es de 3.1 Hz.

3.4.3 Acondicionador de señal

Requerimiento:

Es necesario amplificar la excursión de la señal analógica de entrada y centrarla de forma simétrica a fin de que se pueda visualizar mejor en la interfaz digital del usuario. Esto se logrará través de un circuito de amplificadores y elementos resistivos. Además, se tendrá en consideración que la fuente de alimentación de estos últimos es de 5 V. Por tanto, los cálculos para la ganancia tienen que evitar que los amplificadores entren en saturación.

Diseño y esquemático:

Se considera la señal a amplificar como el voltaje analógico de salida del sensor de efecto hall, sea este notado como $V_i(d)$, donde d es la distancia de alejamiento del imán al sensor. El valor máximo (cuando el imán está lejos), de reposo (el imán no se mueve) y mínimo (el imán está cerca del sensor) se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\Delta V_i = V_i(d) = \begin{cases} 2.21 \text{ V}, & d = 15 \text{ mm} \\ 1.83 \text{ V}, & d = 10 \text{ mm} \\ 0.88 \text{ V}, & d = 5 \text{ mm} \end{cases}$$

Para lograr centrar esta función en los márgenes de los límites de la fuente de alimentación, esto es 5 V, se presenta el siguiente diseño (ver figura 16). La primera es un divisor de voltaje que genera un valor constante. La segunda etapa está conformada por una configuración Amplificador-Restador del Opamp LM358. Esta etapa se encargará de restarle un valor DC a nuestra señal actual del sensor y luego dicha diferencia sea amplificada. De este modo se pretende centrar la señal en 2.5 V y amplificar su excursión.

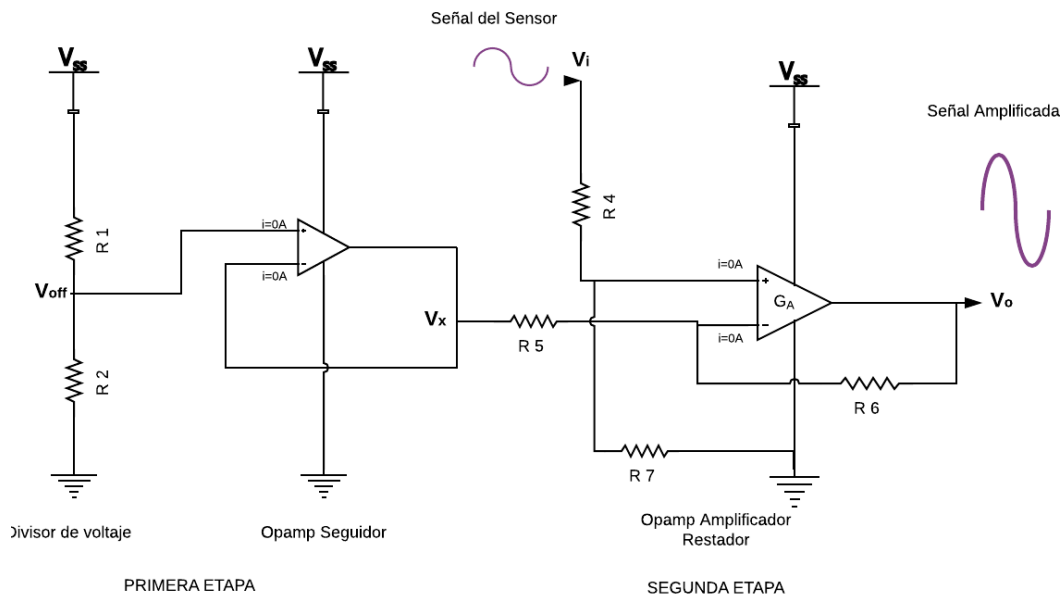


Figura 16 Circuito para acondicionar la señal

Donde:

- V_i : Voltaje entregado por el sensor de efecto Hall
- V_o : Voltaje de salida del acondicionador
- V_{off} : Voltaje Offset
- G_A : Ganancia del Opamp del circuito "Amplificador Restador"
- V_x : Voltaje de salida del Opamp "seguidor"
- V_{ss} : Voltaje de alimentación (5 V)
- $R_4=R_5$ y $R_6=R_7$

Para hallar los valores de las resistencias a emplear es fundamental conocer las ecuaciones que describen el funcionamiento de cada etapa. Para la etapa de amplificación y diferencia la ecuación que describe la salida con respecto a la entrada es:

$$(V_i - V_{off}) \times G_A = V_o \quad (1)$$

$$G_A = \frac{R_6}{R_5} \quad (2)$$

Para la etapa del divisor de voltaje se cumple lo siguiente:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{ss} = V_{off} \quad (3)$$

Se puede hallar que las excursiones parciales sobre el punto de reposo cumplen:

$$\Delta V_i \text{ sup} = 2.21 \text{ V} - 1.83 \text{ V} = 0.38 \text{ V}$$

$$\Delta V_i \text{ inf} = 1.83 \text{ V} - 0.88 \text{ V} = 0.95 \text{ V}$$

Reemplazando dichos valores en la ecuación 1 se halla las posibles ganancias:

$$\Delta V_i \text{ sup} \times G_{A1} \leq 2.5 \text{ V}$$

$$G_{A1} \leq 6.57$$

$$\Delta V_i \text{ inf} \times G_{A2} \leq 2.5 \text{ V}$$

$$G_{A2} \leq 2.63$$

Donde el valor que satisface ambas condiciones es cualquier menor o igual a 2.63 V, entonces se escoge el menor entero para efectos prácticos del cálculo de las resistencias.

$$G_A = 2$$

Como consecuencia, las resistencias a emplear en dicho caso serían $R_6=2\text{K } \Omega$ y $R_5=1\text{K } \Omega$ para así cumplir con la relación (2).

De modo que $V(d)=1.83 \text{ V}$, que es el actual punto de reposo para $d=10 \text{ mm}$, debe de llevarse a 2.5V de tal forma que la señal sea centrada entre 0 V y 5 V , entonces reemplazamos los valores hallados para R_6 y R_5 en la ecuación 1.

$$(1.83 \text{ V} - V_{\text{off}}) \times 2 = 2.5 \text{ V}$$

Además de la ecuación 1 y 3:

$$1.83\text{V} - \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 5 \right) = \frac{2.5}{2} \text{ V}$$

Las resistencias que cumplirían esta condición serían $R_1=4.5\text{K } \Omega$ y $R_2=600 \Omega$.

3.4.4 Actuador

El actuador es el motor que se heredó del trabajo previo. Este presenta las características mostradas en la tabla 5 donde podemos ver que el máximo valor de alimentación es de 24 V. Experimentalmente se halló que basta alimentar el motor hasta 12 V para inducir los estados de vibración, por tanto, no se considerará 24 V sino 12 V como alimentación máxima del motor que es nuestro rango útil para las experimentaciones.

Tabla 5 Características del actuador

Características	
Modelo	DSE38BE27-001
Voltaje	24 V DC
Velocidad	4400 rpm
Peso	0.5 kg
Corriente de consumo sin carga	0.2 A
Precio	30 – 45 soles (usado)

Elaboración propia.

3.4.5 Excitador

Es el circuito de alimentación que proporcionará voltaje gradual adecuado al actuador (motor) para que este pueda ejercer la fuerza excitatriz sobre la estructura metálica.

Alternativas:

A continuación, dos formas posibles: la primera, implementando un circuito que amplifique una señal PWM de un controlador, y la segunda es la utilización de una fuente de voltaje continuo regulable que nos entregue voltaje de 0 V a 12 V. Veremos las características de las alternativas a continuación en la tabla 6.

Tabla 6 Alternativas para el circuito excitador

Características	Amplificador discreto de PWM.	Fuente voltaica regulable
Espacio utilizado	5cm x 5 cm	10 cm x 15 cm
Consideraciones de frecuencia.	Presenta señales armónicas que generan ruido en el funcionamiento del motor.	No genera ruido porque el cambio de voltaje es constante y gradual.
Costo	S/.5	S/.30

Elaboración propia.

Criterio de selección:

Analizando las dos opciones, podemos apreciar que la primera requiere una entrada que es una señal PWM, la cual se puede generar fácilmente desde el controlador y requiere una menor cantidad de componentes. Además, el costo requerido es mucho menor que utilizar una fuente de voltaje regulable. Es por estas razones que se escogió la primera opción.

Diseño y esquemático:

El esquema de la figura 17 presenta el funcionamiento del bloque excitador, el cual recibe una señal PWM proveniente del controlador y la amplifica para obtener una amplitud pico de 12 V, cuyo ciclo de trabajo genera un voltaje medio regulable para el actuador.

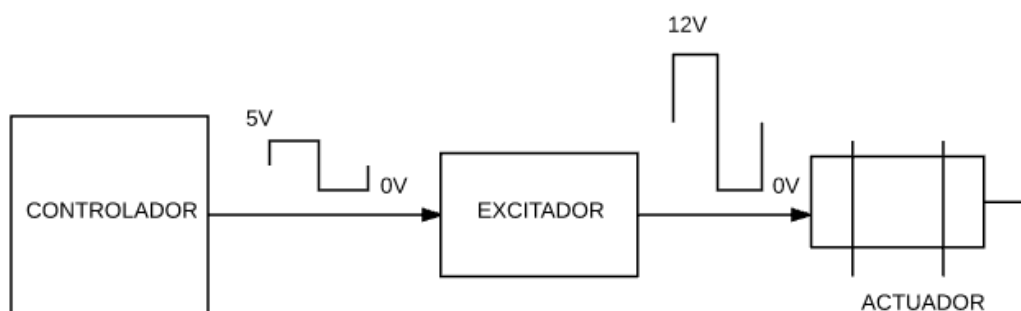


Figura 17 Esquema del circuito excitador

En la figura 18 se aprecia el esquema del circuito del excitador (Sedra 2006: 271-272).

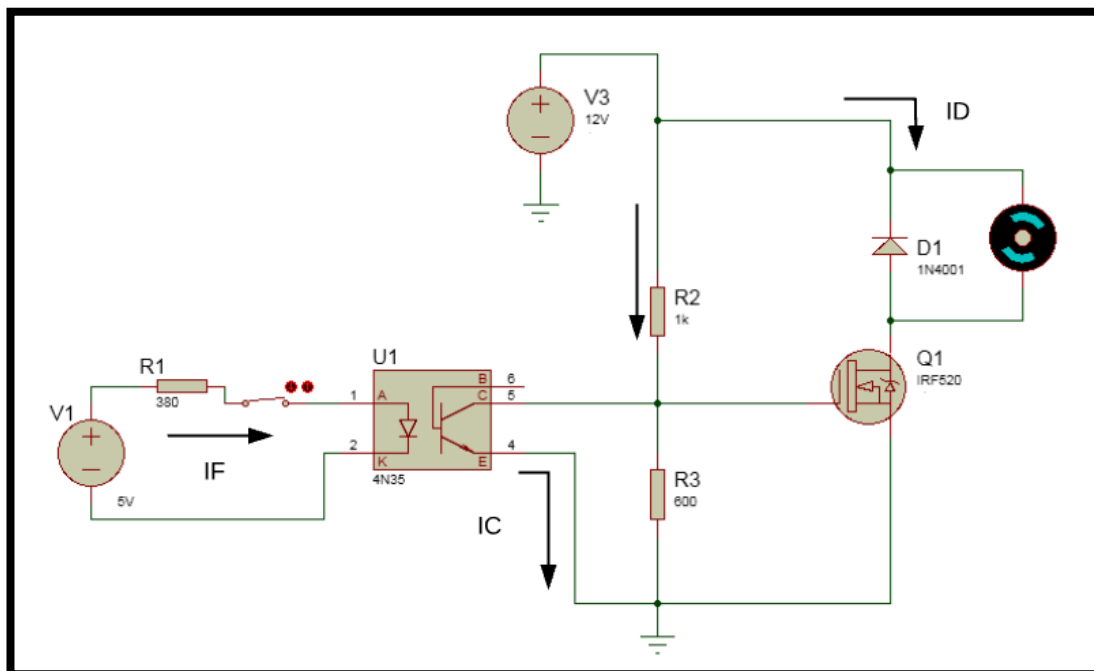


Figura 18 Diseño del circuito excitador.

Donde:

- IF: Voltaje entregado por el sensor de efecto Hall
- IC: Voltaje de salida del acondicionador
- G-S: Terminales gate (compuerta) y source (fuente) del transistor
- VCE: Voltaje entre los terminales 'colector' y 'emisor' del optoacoplador 4N35
- VGS: Voltaje entre los terminales G y S del transistor IRF520
- VTH(GS): Voltaje umbral entre los terminales G y S antes de que el transistor IRF520 entre en saturación
- VDS: Voltaje entre los terminales D (Drenador) y S (Fuente) del transistor IRF520

El circuito básicamente conmuta, a través de una señal PWM, el optoacoplador para que este a su vez cambie el estado de funcionamiento del mosfet IRF520. Los estados de funcionamiento de dicho mosfet son región óhmica y corte. En la región óhmica existe una tensión en los terminales G-S del mosfet IRF520 y el motor se encuentra en funcionamiento.

Cuando el mosfet se encuentra en corte, no hay tensión entre los terminales del motor. Variando el ciclo de trabajo de la tensión de los terminales del motor se puede

regular el voltaje medio de entrada, ergo también se regula la velocidad angular del motor.

Para la selección del transistor mosfet IRF520 se tomó en consideración la corriente de drenador (valor máximo de 9.2 A). Sin embargo, para una tensión entre los terminales G-S se puede obtener sin problemas una corriente de 0.2 A, que es lo que exige el motor.

Situación 1: Cuando el optoacoplador está en saturación (motor no recibe tensión)

Para que se dé este caso, la corriente **IF** que pasa por el diodo se establece a 10 mA. El voltaje en directa del diodo del optoacoplador es de 1.14 V (según valores típicos de las hojas de datos). Luego:

$$\text{Tensión en R1: } V = I \times R$$

$$5 \text{ V} - 1.14 \text{ V} = 10 \text{ mA} \times R1$$

$$R1 = 386 \Omega, \text{ Sea valor comercial } R1 = 380 \Omega$$

$$\text{Potencia} = V \times I = 3.86 \text{ mW} < 1/4 \text{ W}$$

Entonces con $R=380 \Omega$, **IF** se establece a 10.15 mA.

Según las curvas **IF** vs **IC** del optoacoplador 4N35, **IC** = 10.15 mA (CTR=1). También según las curvas **IC** vs **VCE** (voltaje colector-emisor), cuando **IC** = 10 mA, **VCE** = 0.6 V. Este valor debe ser menor que el valor umbral del mosfet se mantenga en corte. A partir de la tensión entre los terminales de R2 y la corriente conocida **ICE** = 10.15 mA, calculamos el valor de la resistencia.

$$\mathbf{VCE = 0.6 \text{ V}, VCE < VTH(GS)_{\text{mín}} = 2 \text{ V}}$$

$$V_{cc} - 0.6 \text{ V} = 10.15 \text{ mA} \times R2$$

$$12 \text{ V} - 0.6 \text{ V} = 10.15 \text{ mA} \times R2$$

$$R2 = 1.12 \text{ K}\Omega, R2 = 1\text{K}\Omega \text{ (valor comercial)}$$

$$\text{Potencia} = V \times I = 11.4 \text{ mW} < 1/4\text{W}$$

Situación 2: Cuando el optoacoplador está en corte (motor recibe tensión):

Cuando el transistor interno del optoacoplador 4N35 se encuentra en corte, el circuito resultante es un mosfet saturado debido a un voltaje "G-S" mayor al $V_{TH}(GS)$ máx = 4V.

$$\mathbf{VGS} > \mathbf{V_{TH}(GS)máx} = 4 \text{ V}$$

Para cumplir el requerimiento $\mathbf{VGS} > 4\text{V}$, establecemos $\mathbf{VGS} = 4.5\text{V}$, el cual según la hoja de datos (Curva \mathbf{ID} vs \mathbf{VDS} @ $\mathbf{VGS} = 4.5$) limita la corriente \mathbf{ID} a menos de 1 A. Entonces, cuando se exige en $\mathbf{ID} = 0.2 \text{ A}$, la tensión \mathbf{VDS} se limita a menos de 0.2 V, lo cual asegura la mayor caída de voltaje sobre los terminales del motor.

Con $R3=600 \Omega$ se logra tener $\mathbf{VGS} = 4.5 \text{ V}$.

$$12\text{V} \times \frac{R3}{R3 + R2} = 12 \times \frac{600\Omega}{600\Omega + 1\text{k}\Omega} = 4.5 \text{ V}$$

$$\text{Potencia} = \frac{V^2}{R} = \frac{(4.5\text{V})^2}{600\Omega} = 33.75 \text{ mW} < \frac{1}{4} \text{ W}$$

También se comprueba una potencia menor a $\frac{1}{4} \text{ W}$.

Por último, se adiciona un diodo 1N4001 en modo libre carrera para descargar la corriente que pasa por la inductancia (motor) cuando el motor no esté alimentado.

3.4.6 Circuito del controlador

El circuito del controlador se encarga de digitalizar la señal analógica de los sensores, de enviar una señal PWM al excitador, de leer los pulsos enviados por el codificador y, finalmente, de enviar dicha información a través de un módulo de transmisión serial.

Requerimientos:

Se obtiene en total un cálculo de la cantidad de pines estimadas que requerirá el controlador, así como la frecuencia de trabajo, los módulos que deberá poseer y la memoria mínima que debe de tener para ejecutar el código (ver tabla 7).

Tabla 7 Requerimientos del controlador

Necesidad	Descripción	# Pines
ADC	4 canales	4
Sensor Velocidad	señal de entrada	1
Generador PWM	señal de salida	1
Transmisor	señales Tx/Rx	2
Alimentación	Del controlador + GND	2
Reset	Para reinicio lógico	1
Frecuencia de trabajo	1 Mhz	--
Memoria Flash mínima	3 Kb	--
Módulo de transmisión serial	Para el transmisor	--
	Total	11

Elaboración propia.

Diseño y esquemático:

El circuito que involucra el controlador y la integración de los demás componentes como sensores, señal del codificador y señal del potenciómetro, presenta el siguiente esquemático que se muestra a continuación en la figura 19.

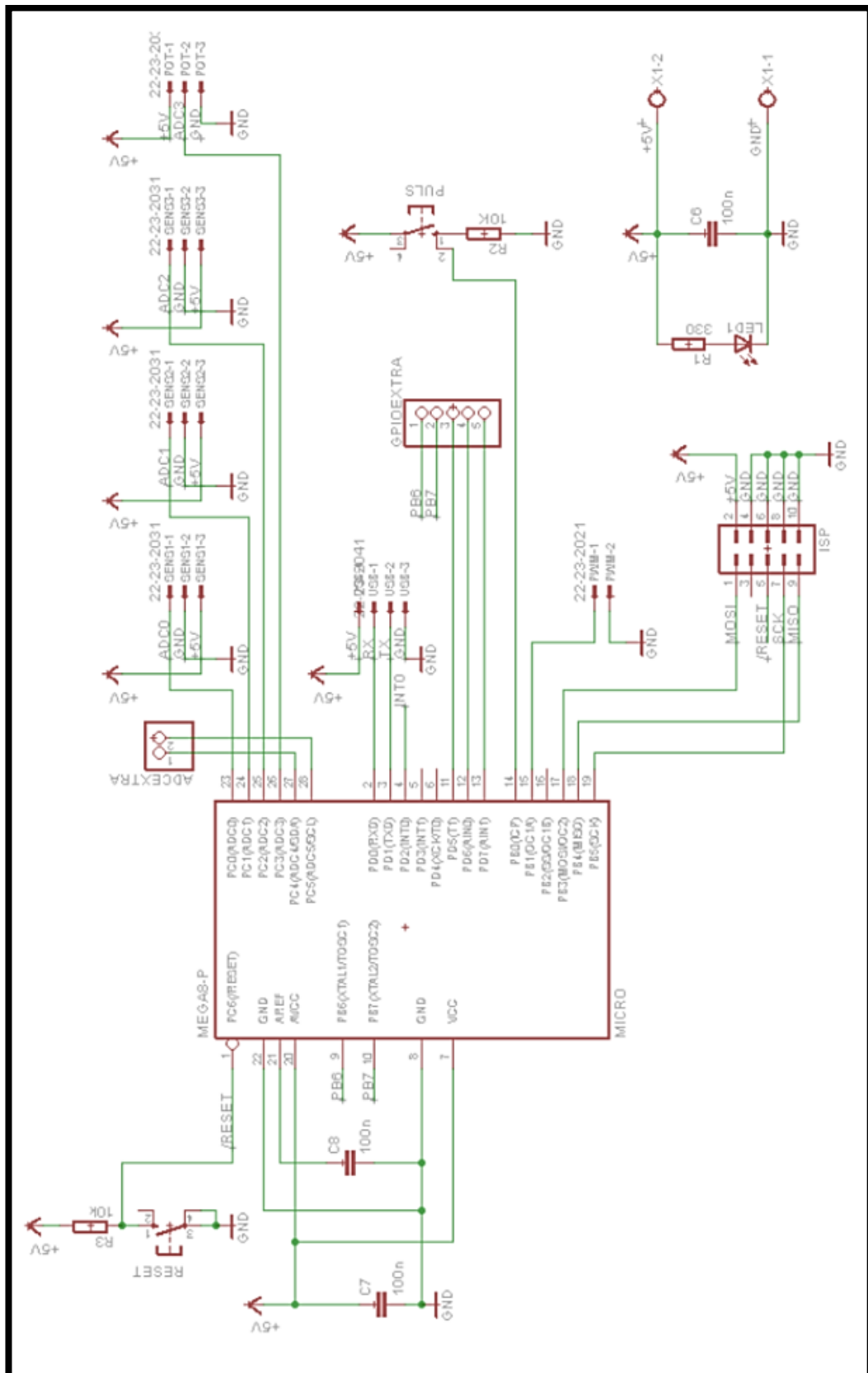


Figura 19 Diseño de la tarjeta principal que contiene el controlador.

3.4.7 Transmisor

Se usará el módulo de SparkFun debido a que las computadoras tienen más puertos USB que RS232. Este último protocolo no tiene mucho uso actualmente, además ya se cuenta con módulo mencionado al inicio, lo cual generó un ahorro en costo.

3.4.8 Fuente de alimentación

Requerimientos:

Se requiere brindar un voltaje de 12V al circuito excitador y 5V al circuito principal del controlador. Calculando de manera teórica los requerimientos de corriente y voltaje, se tiene la siguiente Tabla 8.

Tabla 8 Requerimiento de corriente y voltaje teóricos.

Elemento	Requerimiento
Controlador	5 V @ 11 mA
Sensores y circuito de acondicionamiento (3 unidades)	5 V @ 5 mA x (3)
Codificador	5 V @ 20 mA
Actuador	12 V @ 0.2 A

Valores teóricos:

Para la tarjeta principal (que incluye tarjeta de sensores sensores)

$$V = 5 \text{ V} \quad I = 46 \text{ mA}$$

Para el circuito excitador (alimentación del actuador)

$$V = 12 \text{ V} \quad I = 200 \text{ mA}$$

Luego de la implementación de las tarjetas, estas se alimentaron con fuentes independientes para medir cuánta corriente exigían; estas mediciones son:

Para la tarjeta principal (que incluye tarjeta de sensores sensores)

$$V = 5 \text{ V} \quad I = 76.2 \text{ mA}$$

Para el circuito excitador (alimentación del actuador)

$$V = 12 \text{ V} \quad I = 150 \text{ mA}$$

Sea nuestro requerimiento los mismos valores más un margen de prevención del doble:

$$5 \text{ V @ } 160 \text{ mA}, 12 \text{ V @ } 300 \text{ mA}$$

Con dichos requerimientos se construyó la fuente usando como guía el manual de la compañía "On Semiconductor" el cual hace empleo de las curvas de Schade con sus respectivas fórmulas y criterios de diseño de la etapa de rectificación y filtro de la fuente (2002: 63 -68) , ver Anexo A.

3.5 Software

3.5.1 Programa del controlador

3.5.1.1 Funciones requeridas

El controlador tiene que capturar a través del módulo ADC los valores de voltaje de los sensores y del potenciómetro. También debe leer los pulsos enviados por el tacómetro y calcular la frecuencia del actuador. Con el valor de voltaje del potenciómetro se envía una señal PWM que servirá para controlar la velocidad de rotación del actuador. Por último, el controlador debe unir la data de los sensores del ADC con el valor de frecuencia del actuador, y enviarlo como cadena de texto a través del puerto serial del Atmega8.

3.5.1.2 Diagrama de flujo

El circuito controlador debe cumplir la lógica de trabajo que se explica en el siguiente diagrama de flujo principal (ver figura 20). Dicha lógica general se resume al obtener la data de los sensores y la data del tacómetro, juntar dicha información en un formato determinado y enviarlo por el transmisor. Para ello separamos la lógica en un proceso principal que utiliza los recursos de tres subprocesos.

En el proceso principal tenemos la configuración de los módulos del controlador que comprende el módulo ADC (para tener la señal analógica en términos digitales), los módulos temporizadores (los cuales enviarán la data que reciban a través de interrupciones periódicas) y el módulo USART (que envía la cadena de información final hacia el módulo interfaz serial-USB).

Nótese que antes de empezar a activar los módulos, físicamente se ha de implementar un pulsador que permite, después de su presión, la activación de los módulos y la obtención de datos.

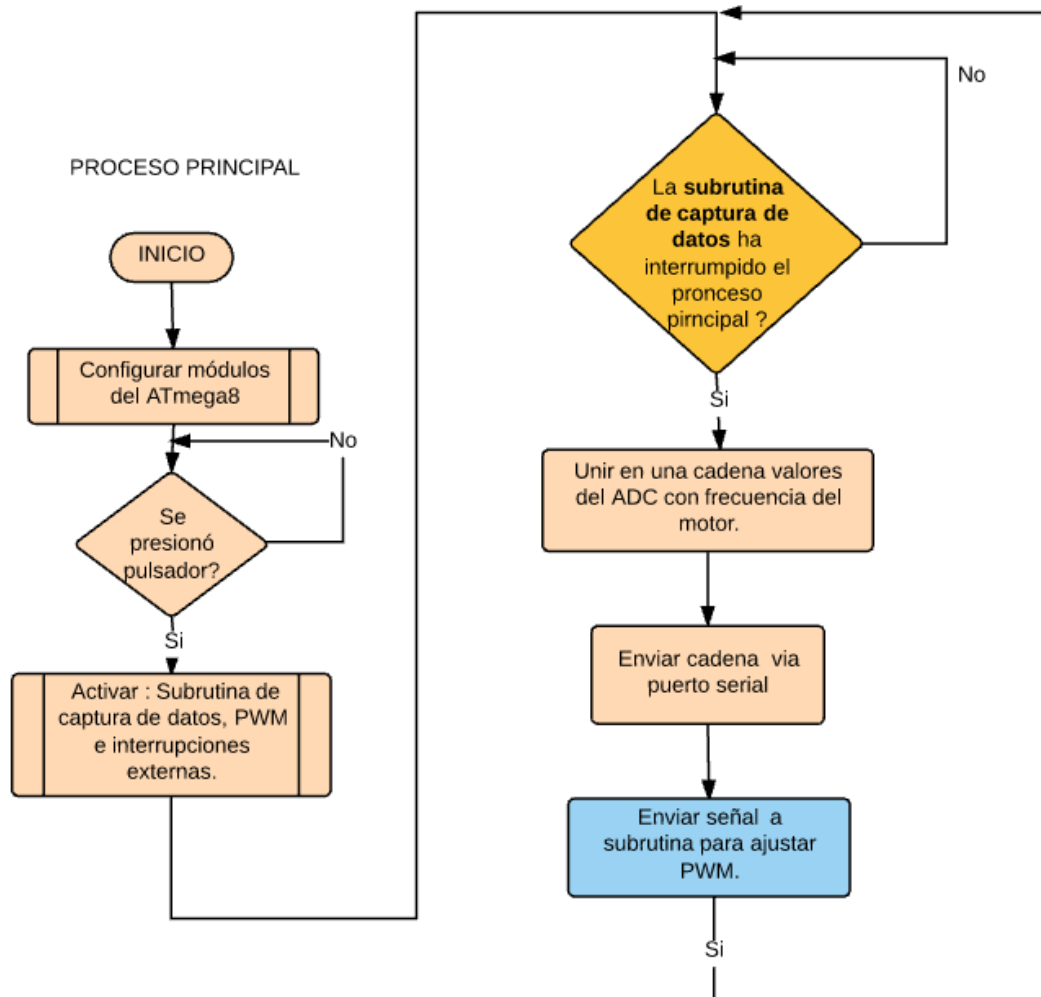


Figura 20 Diagrama de flujo del proceso principal

Como la señal que se recibe no supera los 25 Hz, la frecuencia de muestreo debe ser superior al doble de la frecuencia de la función a muestrear, bajo el criterio de Nyquist. Entonces, con 100 Hz como frecuencia de muestreo aseguramos la correcta reconstrucción posterior de las señales.

Esto, en el diagrama de flujo, se traduce en que por cada 10 ms se recibirá las señales del ADC y se calculará la frecuencia del motor del actuador. Luego, estos datos se unirán en una sola secuencia de datos que se envían por medio del puerto serial. Por último, antes de reiniciar el lazo, se lee la señal del potenciómetro, dado

que al variar cambia la señal PWM de salida que sirve para aumentar o disminuir la velocidad de rotación del motor del actuador , de esta forma controlar la vibración ejercida a la estructura.

3.5.2 Interfaz de usuario

La presente interfaz está compuesta por la programación de dos hojas de código ejecutables (de ahora en adelante '**Script**') en LabView. El primero sirve para visualizar las señales de los tres niveles de la estructura en tiempo real. El segundo 'script' solo adquiere las señales adquiridas del nivel medio y las registra en un archivo de texto para luego, mediante una hoja de cálculos, procesar los datos. Ver la programación de los Scripts en el Anexo B.



CAPÍTULO 4

ENSAYOS Y PRUEBAS FINALES

A lo largo de este capítulo se expondrá los resultados experimentales que comprueban el funcionamiento del sistema. Para ello se describirán los resultados por etapas del diagrama de bloques, luego se describirán los experimentos usando el sistema completo en lo que respecta a mostrar las señales sensadas en tiempo real y mostrar sus respectivas gráficas de espectro de potencia. Por último, para finalizar el capítulo se evaluará cómo el sistema, a través de una prueba de impacto (de ahora en adelante **“Bump Test”**), puede registrar las frecuencias naturales del módulo estructural.

Las pruebas independientes a realizar son:

- Prueba de calibración de sensores de vibración.
- Prueba del acondicionador de señal.
- Sensor de velocidad del actuador.
- Prueba del circuito excitador.

Las pruebas del sistema completo:

- Prueba de la interfaz en LabView para el sensado en tiempo real de los tres niveles.
- Prueba de impacto **“Bump Test”** para el cálculo de las frecuencias de resonancia.

4.1 Pruebas de las etapas independientes

4.1.1. Prueba de calibración del sensor de velocidad.

Para esta prueba se usó el tacómetro modelo DT-207B de la marca Shimpo Japón Industrial como medida patrón.

El escenario de pruebas (ver figura 21) consiste en medir la frecuencia del actuador a través del instrumento calibrado y comparar este valor con la frecuencia obtenida a través del programa del controlador. Con dichas muestras obtenidas se calcula el error promedio en base a esta contrastación, véase tabla 9.

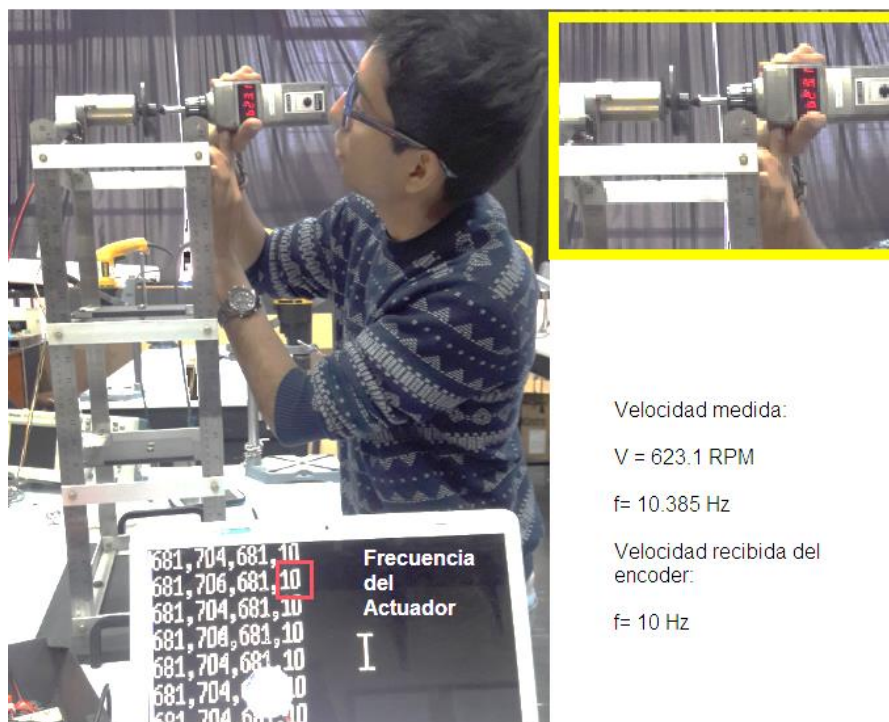


Figura 21 Escenario de trabajo para obtener las velocidades con el instrumento estándar

Tabla 9 Contraste de los valores obtenidos por el tacómetro versus los medidos por el sensor de velocidad.

Frecuencia medida con tacómetro 1 (en rpm)	Frecuencia medida con tacómetro 1 (en Hz)	Frecuencia medida con tacómetro 2 (Hz)	Frecuencia medida con tacómetro 3 (Hz)	Frecuencia Promedio (Hz) Patrón	Frecuencia medida en encoder (Hz)	Porcentaje de error (%)
62.4 rpm	1.04	1.03	1.03	1.03	1	3%
189.8 rpm	3.16	3.14	3.09	3.13	3	4%
291.9 rpm	4.87	5.16	4.84	4.96	5	1%
434.4 rpm	7.24	7.23	6.87	7.11	7	2%
524.5 rpm	8.74	8.78	8.55	8.69	9	4%
665.2 rpm	11.09	10.42	10.95	10.82	11	2%
738.4 rpm	12.31	12.4	12.16	12.29	13	6%
916.9 rpm	15.28	15.7	15.74	15.57	15	4%
1025 rpm	17.08	17.1	17.12	17.10	17	1%
1144 rpm	19.07	18.53	18.92	18.84	19	1%
1297 rpm	21.62	21.52	20.82	21.32	21	2%

Elaboración propia.

Podemos apreciar que el máximo error calculado según es la experimentación es de 6%. Esto quiere decir que el valor de frecuencia, de los picos del espectro de magnitud en la interfaz, tiene un máximo margen de error de $\pm 6\%$ contra el valor promedio medido por el tacómetro.

4.1.2. Prueba de calibración de sensores de vibración

En el siguiente escenario de prueba realizado en el laboratorio de acústica de la especialidad de Física de la PUCP (ver figura 22), se procede a excitar con un generador de señales (Type 3160 Bruel&Jaer) el "Mini Shaker" (Type 4810 Bruel&Jaer) para producir una vibración de 5Hz y 10 Hz, que está en el rango de trabajo (1 Hz – 25 Hz). Luego, se compara en la interfaz PULSE (software de Bruel&Jaer) la señal del acelerómetro (Type 4383 Bruel&Jaer) instalado en el "Mini Shaker" a la señal del sensor Hall y la señal del generador. En la figura 23 se aprecia el escenario real de trabajo.

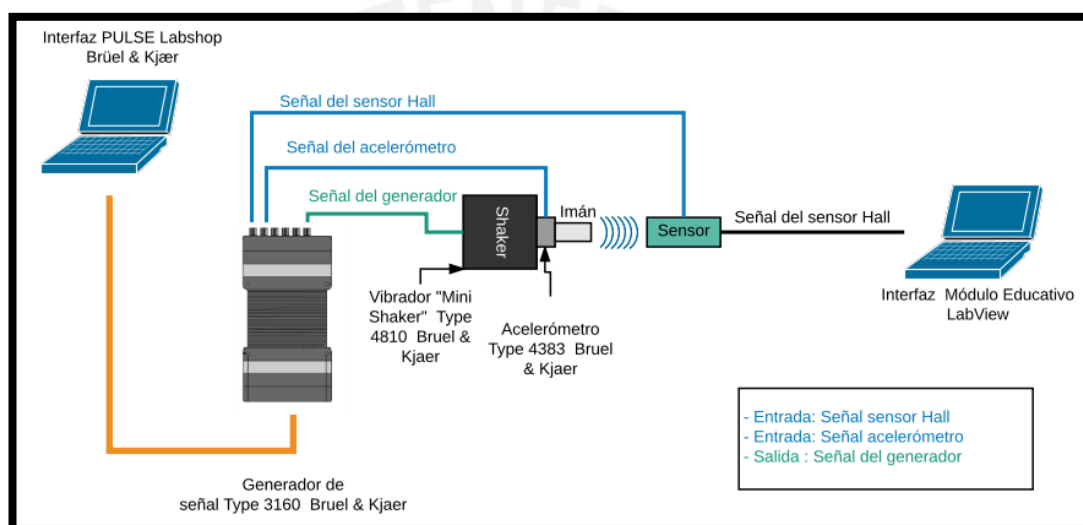
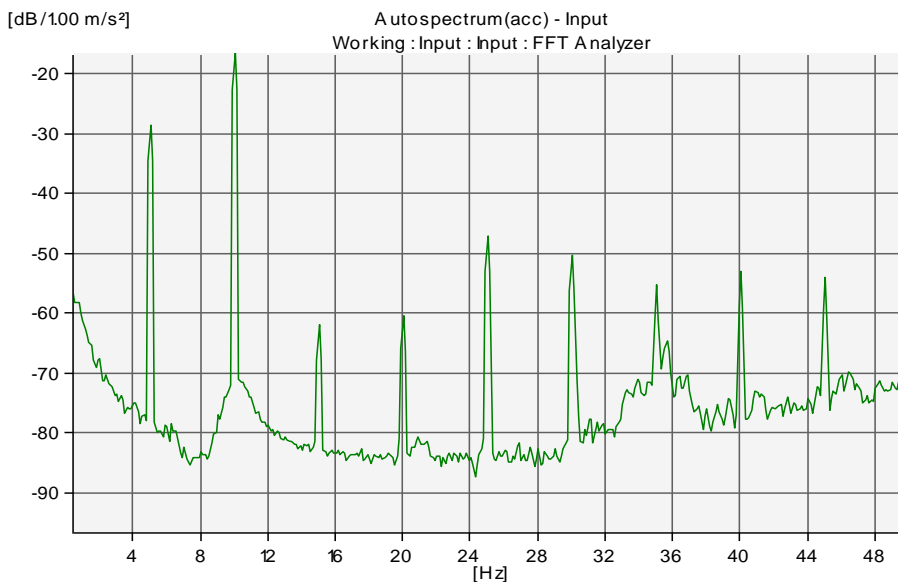


Figura 22 Descripción del escenario de trabajo.

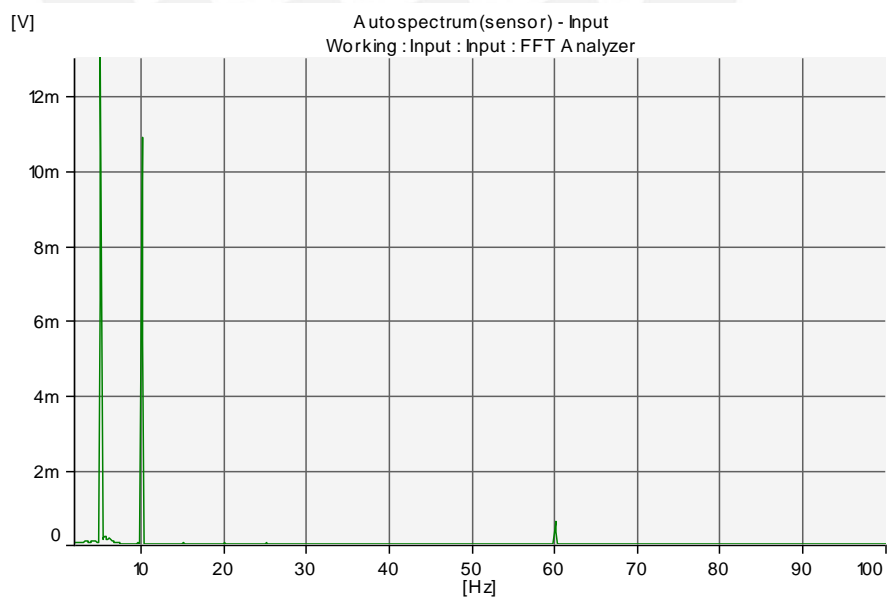


Figura 23 Realización de la prueba de comparación de la señal obtenida por sensor Hall versus señal del generador y acelerómetro.

En la figura 24 observamos cuando la señal del generador es mixta con dos componentes de 5 Hz y 10 Hz.



(a) Espectro del acelerómetro a 5Hz y 10 Hz sensados en el vibrador



(b) Espectro del sensor de efecto Hall

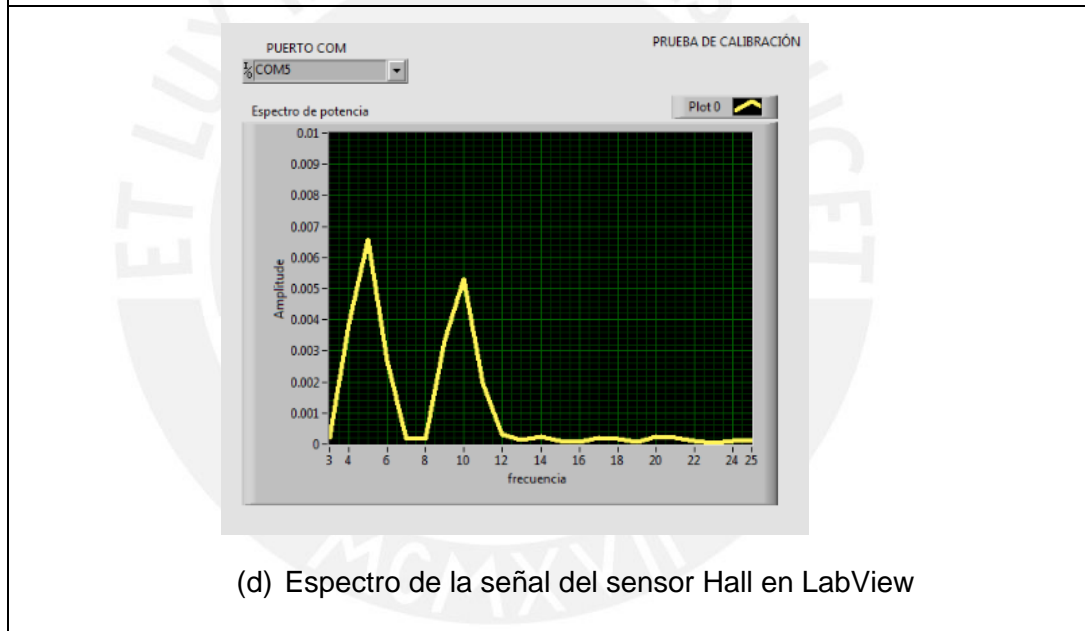
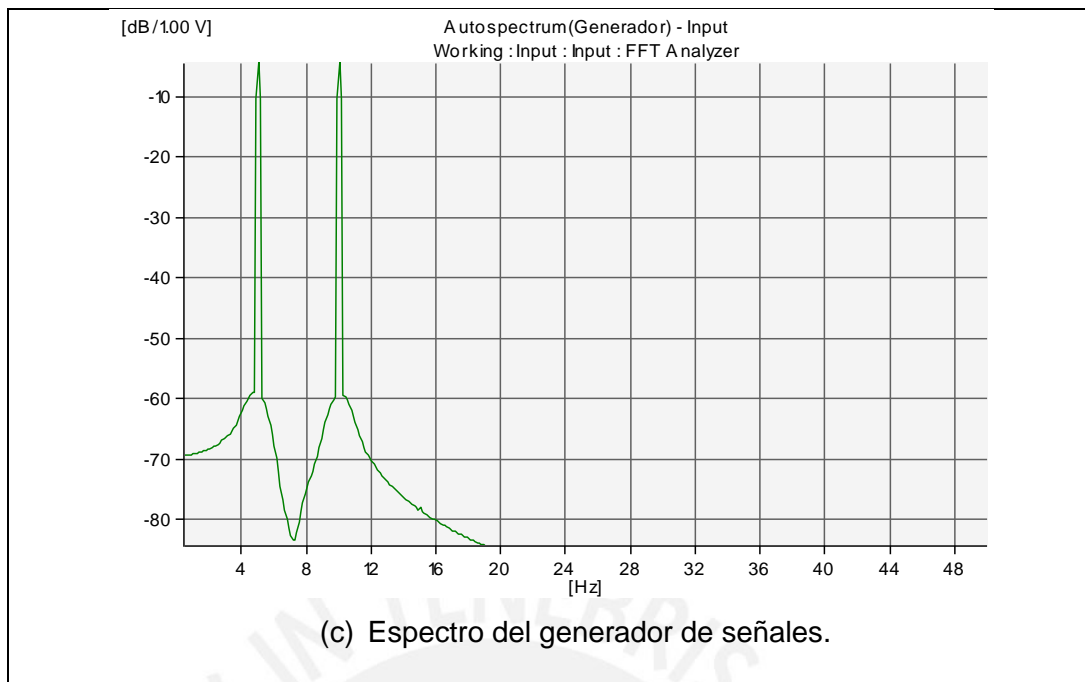


Figura 24 Colección de resultados de la prueba

En la figura 24-b se aprecia que los picos del espectro de frecuencia del sensor son efectivamente 5Hz y 10 Hz, tal cual el generador (ver figura 24-c) y el acelerómetro (ver Figura 4.5 a). Por último, esto mismo se refleja en la interfaz implementada en LabView. Esto muestra que está sensando las frecuencias de las vibraciones mecánicas del vibrador (Mini Shaker Type 4810) a través del sensor de efecto Hall, lo cual se refleja en la interfaz de LabView (ver figura 24-d).

Se hizo una prueba adicional con una señal de 20 Hz la cual se encuentra en el Anexo C.

Así mismo, se realizó la comparativa (ver tabla 10) de las mediciones del sensor Hall mostradas en LabView para tres frecuencias (5 Hz, 10 Hz y 20 Hz) versus las mediciones del acelerómetro de carga y se halló un error máximo de 0.79 % contra el patrón, lo cual es un claro indicador de que las lecturas del sensor Hall son buenas en sentido cualitativo y cuantitativo.

Tabla 10 Comparativa de resultados

Frecuencia medida (Hz)	Mediciones de equipos de precisión Bruel&Jaer (frecuencias en Hertz)			Medición por el sensor visto en LabView (frecuencia en Hertz)	Porcentaje de error entre Sensor Hall versus Acelerómetro (medida patrón)
	generador	sensor	acelerador(patrón)	sensor Hall	
5Hz	5.06	5.00	5.04	5.00	0.79%
10Hz	10.00	10.00	10.08	10.00	0.79%
20Hz	20.08	20.00	20.05	20.00	0.25%

Elaboración propia.

4.1.3. Prueba del acondicionador de señal.

El escenario de trabajo se muestra en la figura 25, en el cual se conectan las puntas de osciloscopio a la salida del sensor, así como también a la salida del circuito de amplificación. Para la alimentación de la tarjeta de amplificación se hace uso de un módulo Arduino Uno. Dicho módulo provee la tensión necesaria para el funcionamiento de la tarjeta

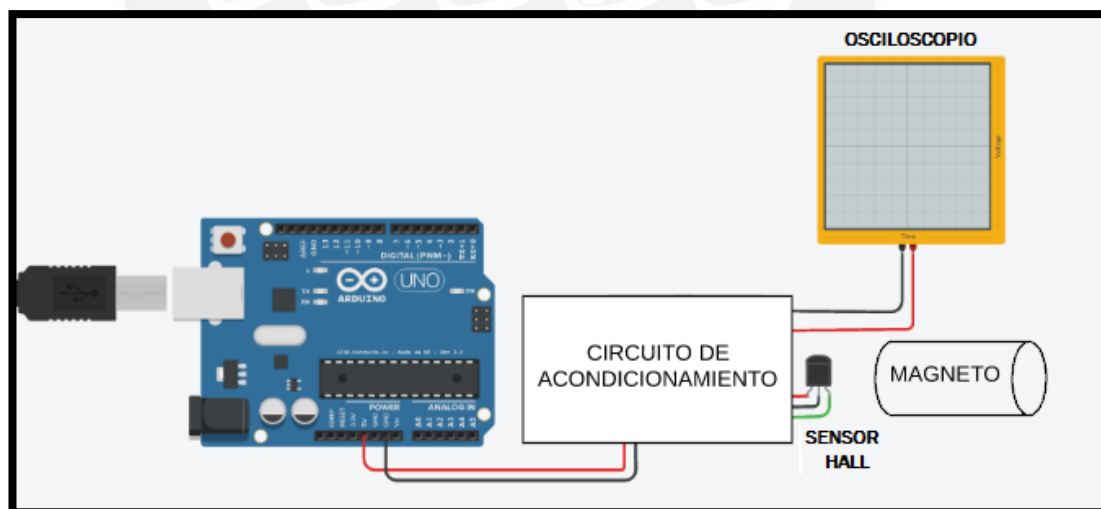


Figura 25 Prueba de funcionamiento del circuito acondicionador

A continuación, en la figura 26 vemos la señal de respuesta de un sensor provocado por un leve golpe en la estructura (imán adherido a ella).

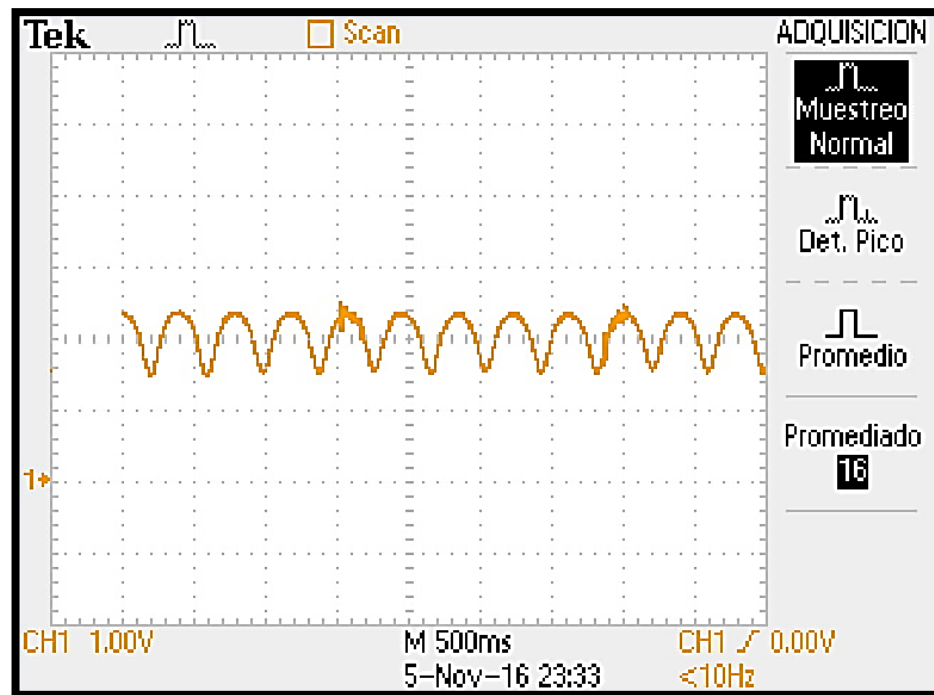


Figura 26 Respuesta del sensor ante los desplazamientos del imán

Podemos ver en la figura 27 la señal del sensor (en amarillo) y la misma señal luego del acondicionamiento (en azul).

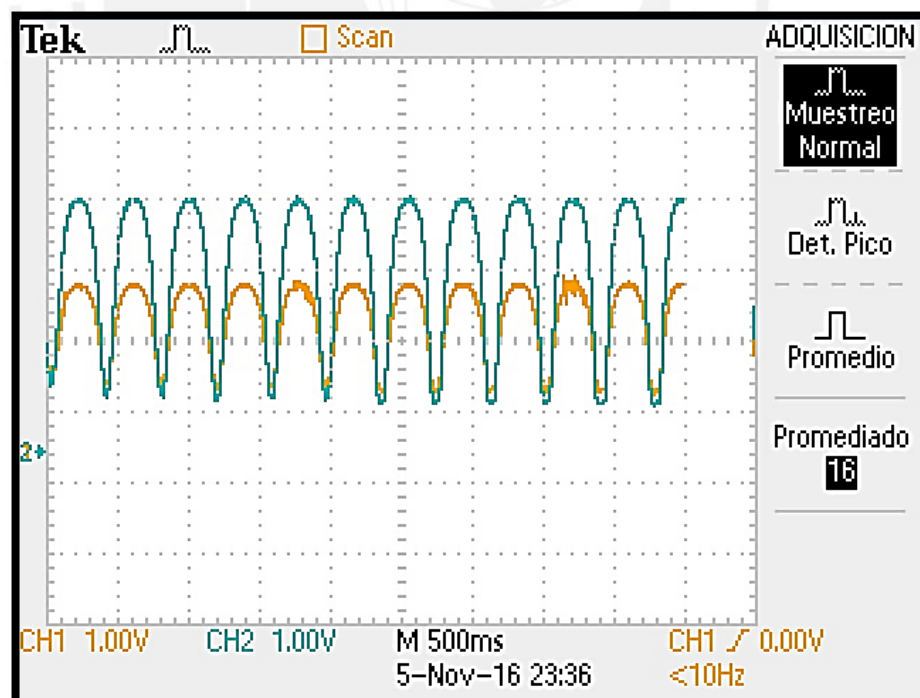


Figura 27 Comparativa de respuestas del sensor sin acondicionamiento (amarillo) y con acondicionamiento (celestes)

4.1.4. Sensor de velocidad del actuador

Para evaluar el funcionamiento del codificador se hizo la conexión del mismo al Arduino Uno para proveer alimentación de 5 V (ver figura 28). El resultado de uno de los trenes de pulsos se aprecia en la figura 29. A pesar que la frecuencia de dicho tren es 311.14 Hz, ésta en realidad se debe traducir en 3.11 Hz, dado que el sensor óptico interno entrega 100 pulsos por ciclo.

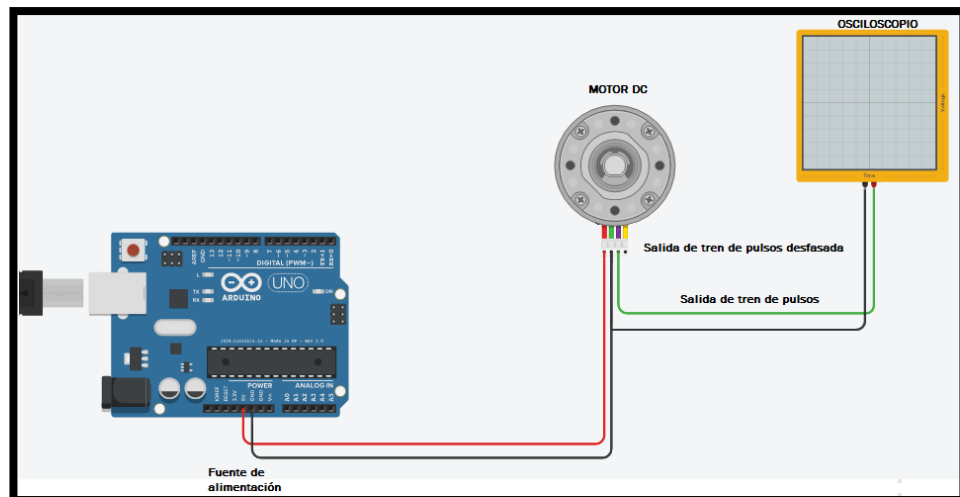


Figura 28 Esquema de trabajo

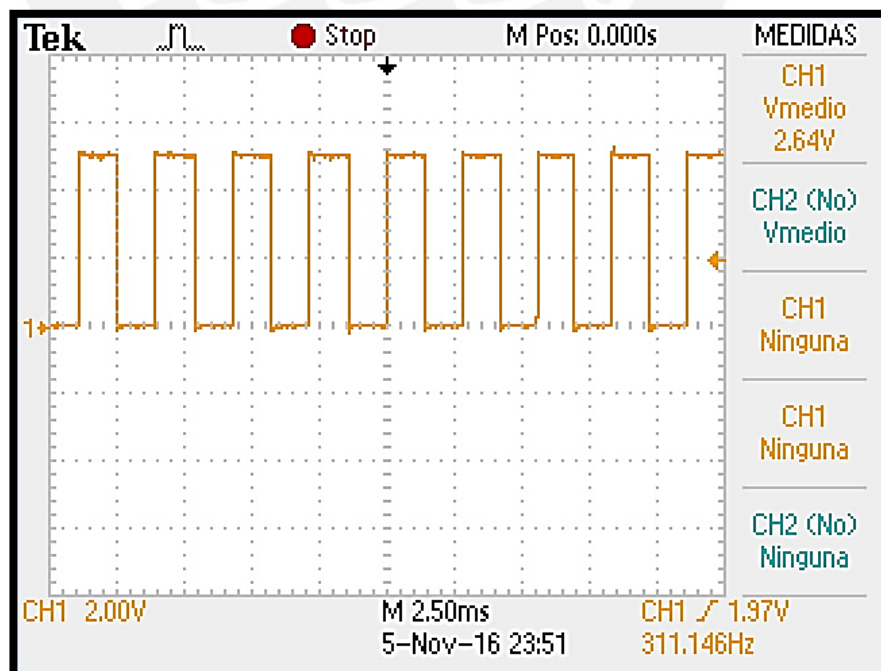


Figura 29 Respuestas del tren de pulsos del terminal de señal del codificador

4.1.5. Prueba del circuito excitador

Para esta prueba, primero obtendremos la señal PWM de salida del controlador (ver figura 30), la cual es de 8 KHz. Esta señal es la que se dirige al circuito excitador para ser amplificada y así poder controlar el actuador.

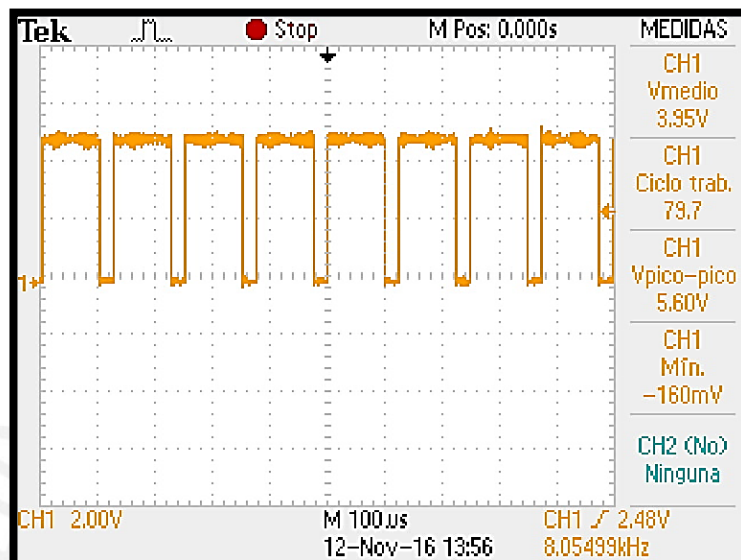


Figura 30 Señal PWM proveniente del controlador

Luego de esa experimentación, se procedió a medir la señal en los mismos terminales de alimentación del motor cuando este se encontraba en funcionamiento (figura 31).

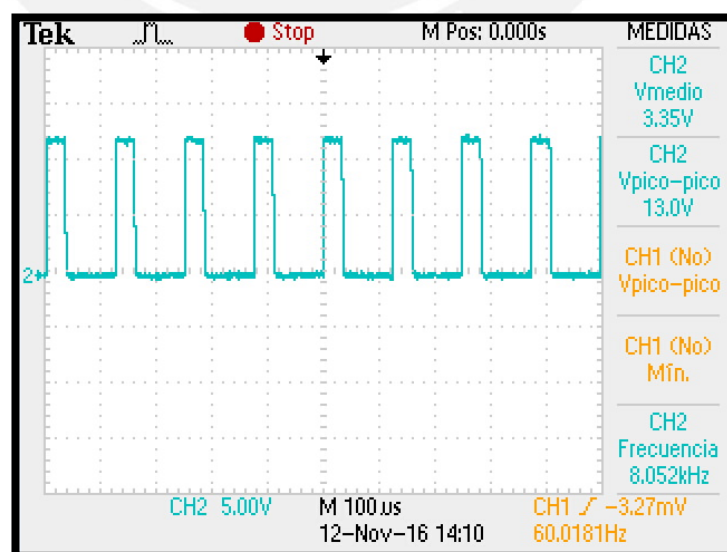


Figura 31 PWM amplificada a través del circuito excitador medida en los terminales del actuador.

4.2 Pruebas del sistema completo

4.2.1 Pruebas del sensado en los tres niveles de la estructura metálica

Para iniciar esta prueba, todos los componentes del hardware se instalaron en la estructura base y las interfaces fueron correctamente configuradas. Para iniciar el funcionamiento se tiene que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Colocar el sistema de sensado tal cual se muestra en la figura 32. Verificar que los tres sensores se encuentren a 10 mm de los imanes instalados en la estructura.
2. Conectar el cable de alimentación del módulo a una toma de 220VAC (60 Hz).
3. Conectar el cable de sensado de velocidad al codificador.
4. Conectar el cable de alimentación del motor al actuador
5. Asegurar que la perilla del potenciómetro este en su valor mínimo “-”.
6. Presionar el interruptor para energizar el sistema de sensado.
7. Presionar y soltar el pulsador una sola vez.
8. Conectar el cable de salida de datos a la computadora.
9. Ejecutar la interfaz.

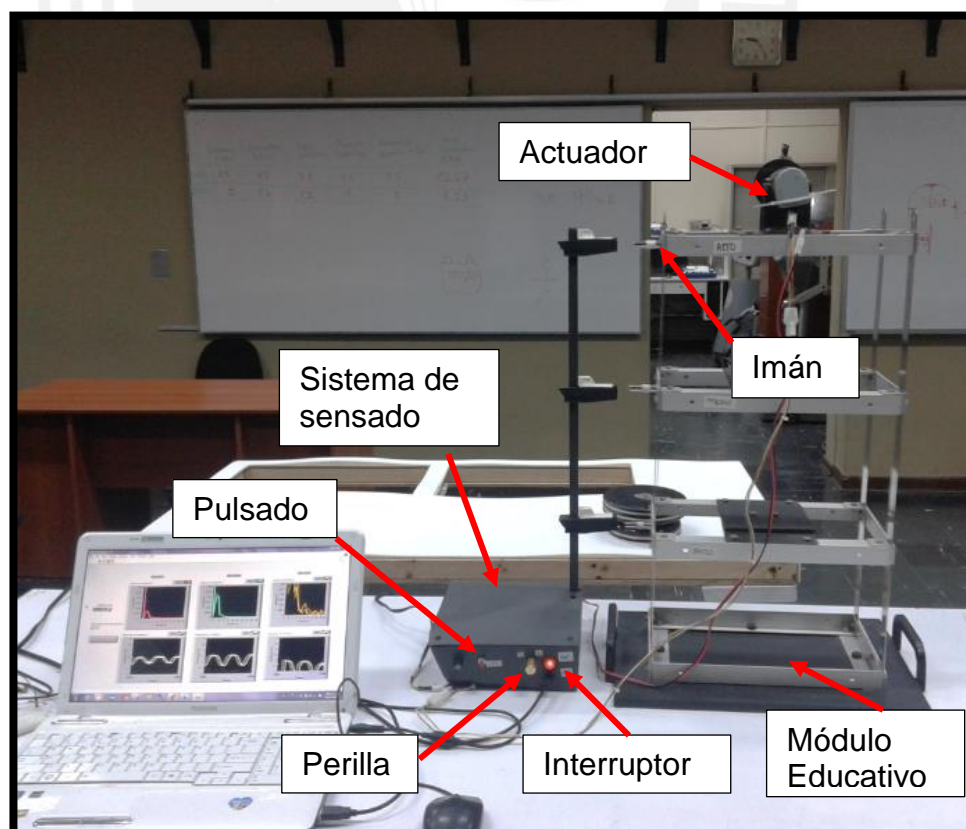


Figura 32 Escenario de trabajo con el sistema completo para la captura de desplazamientos del módulo.

En la Figura 33, se aprecia las señales recibidas en tiempo real de los niveles bajo, medio y alto (respectivamente) y sus respectivos espectros de potencia. Dichas señales están en voltios (el rango de los ejes es configurable por el usuario). La respuesta en el tiempo va de 0V a 5V, y el espectro de frecuencia muestra la transformada de Fourier de las señales en el tiempo en unidades V_{rms}^2 .

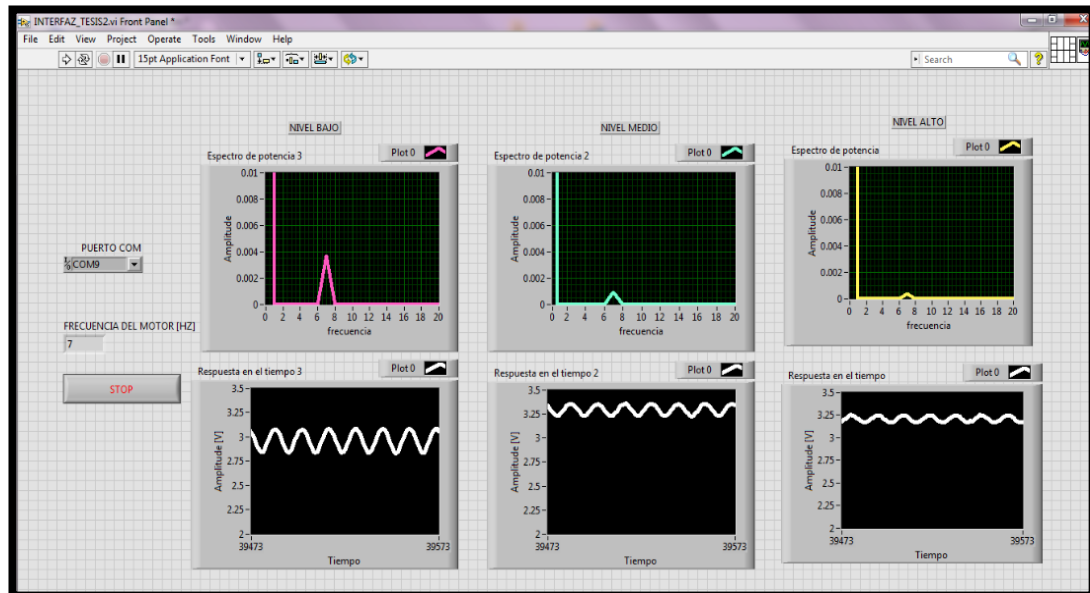


Figura 33 Programa en funcionamiento, se aprecia las señales en tiempo real de cada nivel de la estructura .

4.2.2 Prueba de impacto “Bump Test” para el cálculo de las frecuencias de resonancia

Para esta prueba se presenta a continuación un ensayo conocido como “Bump Test” o prueba de impacto, que permite hallar las frecuencias de resonancia de una estructura al impactar la misma con un golpe repentino. Dicho golpe se traduce en un impulso que contiene todas las frecuencias (Zencovibration 2016). En la Figura 34 se muestra el escenario de este ensayo, en el cual se impacta con un martillo de goma la estructura en tres repeticiones.

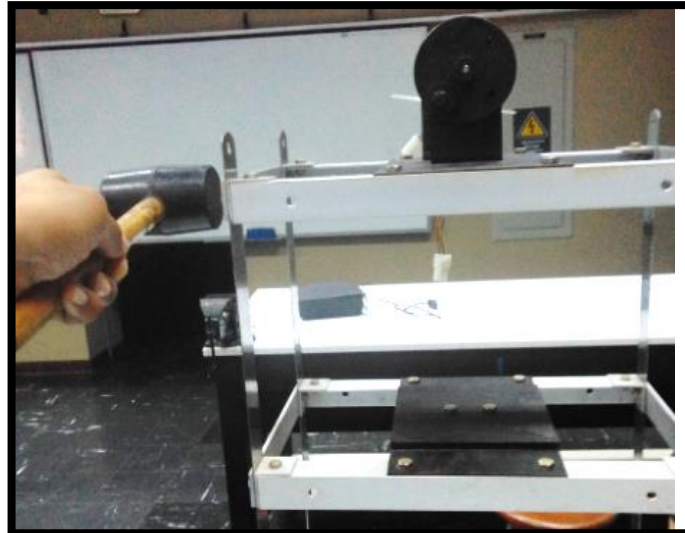


Figura 34 16 Escenario de trabajo: "Bump Test"

Luego, a través de un 'script' programado en la interfaz (ver figura 35) se graba los datos (ver Anexo B) en un archivo de texto. En la tabla 11 se aprecia los resultados de medidas en la prueba de impacto durante tres intentos consecutivos.

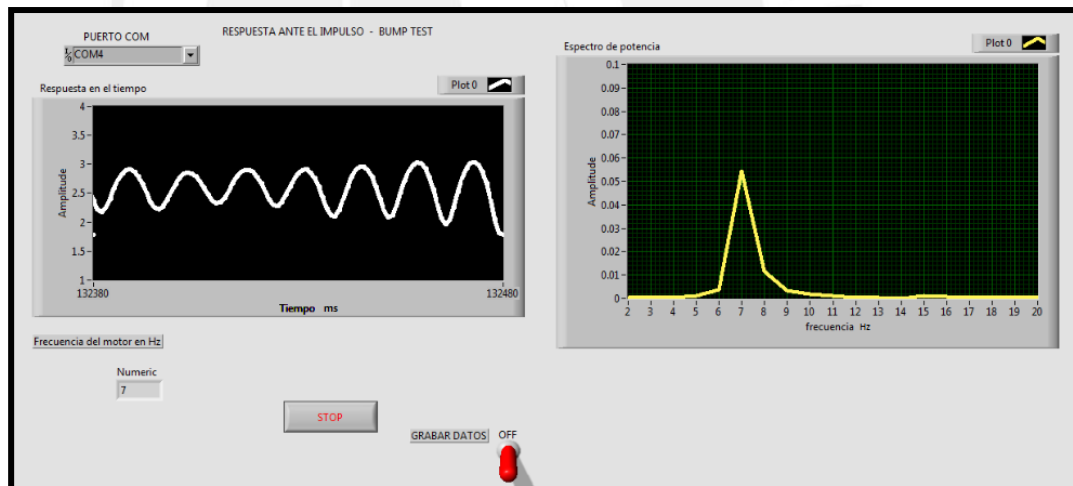


Figura 35 Captura de la interfaz mientras se encuentra grabando datos en un archivo de texto.

Tabla 11 Resultados de la prueba del Bump Test

Prueba 'Bump Test'			
Resultados N1	Resultados N2	Resultados N3	Promedio
2.52 Hz	2.53 Hz	2.52 Hz	2.52 Hz
7.58 Hz	7.59 Hz	7.57 Hz	7.58 Hz
10.95 Hz	10.97 Hz	11 Hz	10.97 Hz

Elaboración propia.

A continuación, se procesa la data registrada con una hoja de cálculos realizada en Excel (Klingenberg 2005: 1-5) para obtener el espectro de magnitud y fase como respuesta del sistema ante el impulso. En la figura 36 se observa que los picos del espectro de magnitud se refieren a las frecuencias naturales captadas por el sistema; esto es validado por el espectro de fase, el cual muestra cambios bruscos de ángulo justo en los picos de resonancia (Arzapalo 2015: 69).

La hoja de cálculo en Excel para hallar las frecuencias de resonancia y las capturas de las frecuencias naturales se encuentran en Anexo C.

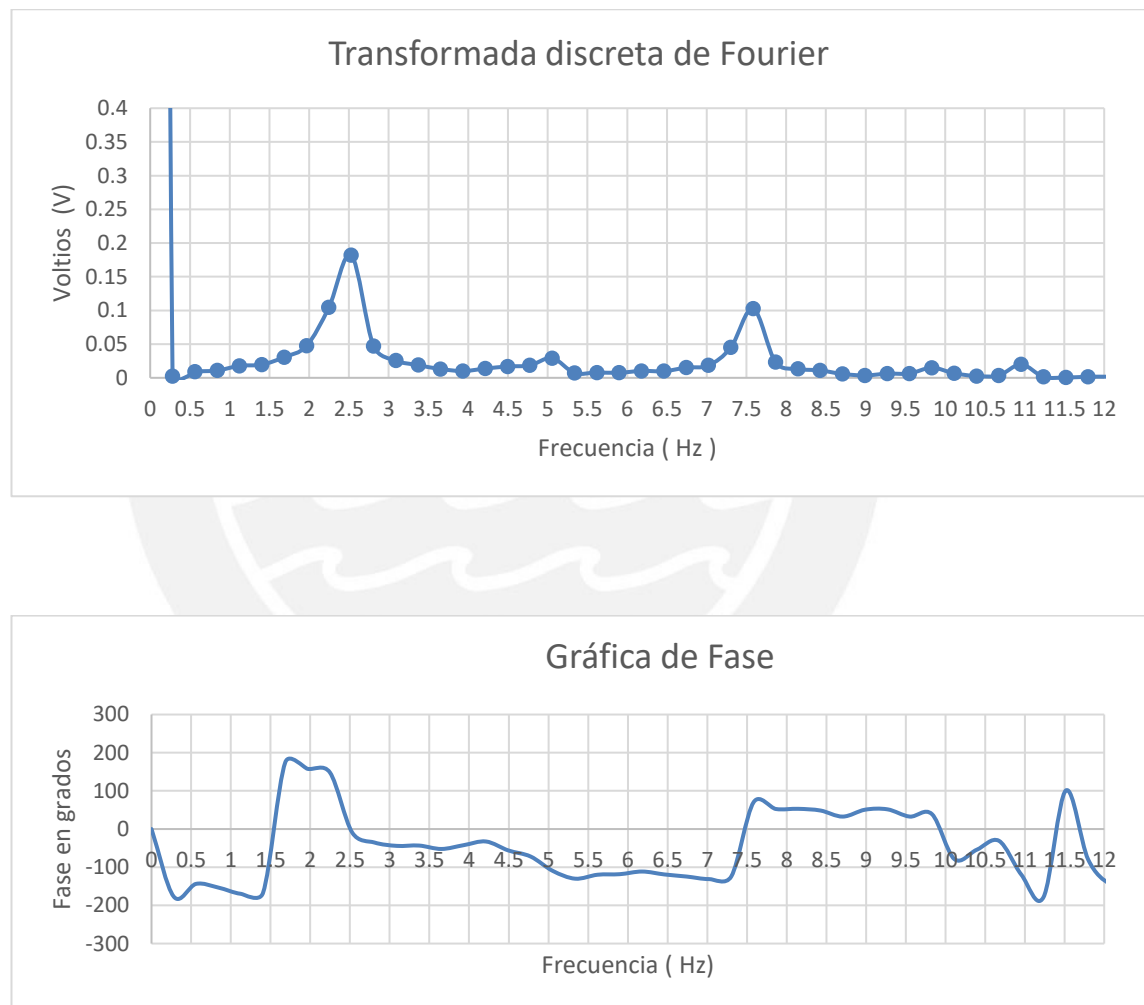


Figura 36 Espectro de magnitud y fase calculados con una hoja de datos en Excel, a partir de la data grabada por la interfaz

Con los resultados obtenidos se procede a realizar las comparativas. En la tabla 12 se puede ver que el máximo error entre los resultados del **trabajo previo** y los resultados analíticos del mismo es de 36.19%.

Tabla 12 Comparativa de los resultados experimentales versus teóricos del trabajo previo

Resultados experimentales del trabajo previo (1)	Resultados analíticos del trabajo previo (2)	Comparación (1) vs (2)
2.49 Hz	3.04 Hz	1.34%
5.43 Hz	8.51 Hz	36.19%
8.12 Hz	12.3 Hz	33.98%

Elaboración propia.

En segundo lugar, la tabla 13 muestra que el máximo error entre los resultados de la presente tesis durante la prueba de impacto (Bump Test) y los resultados analíticos del mismo es de 17.00%.

Tabla 13 Comparativa de los resultados experimentales de la presente tesis versus los teóricos.

Resultados experimentales 'Bump Test' (1)	Resultados analíticos del trabajo previo (2)	Comparación (1) vs (2)
2.52 Hz	3.04 Hz	17.00%
7.58 Hz	8.51 Hz	10.93%
10.97 Hz	12.3 Hz	10.79%

Elaboración propia.

Por último, la tabla 14 muestra que el máximo error entre los resultados de la presente tesis y del **trabajo previo** es de 39.59%.

Tabla 14 Comparativa de los resultados experimentales de la presente tesis versus los del trabajo previo

Resultados experimentales 'Bump Test' (1)	Resultados experimentales del trabajo previo (2)	Comparación (1) vs (2)
2.52 Hz	2.49 Hz	1.20%
7.58 Hz	5.43 Hz	39.59%
10.97 Hz	8.12 Hz	35.10%

Elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. El sensado del desplazamiento de los niveles de la estructura a través del sensor de efecto Hall SS49E se logra sin ejercer contacto alguno sobre la misma. Dicho sensor puede trabajar sin problemas en la detección de las frecuencias en el orden de 1 Hz a 25 Hz.
2. Se logró apreciar las vibraciones de los niveles como señales en el tiempo y frecuencia en la interfaz. La frecuencia sensada por el sensor Hall presenta un error máximo de 0.79 % contra la frecuencia medida por un acelerómetro de carga el cual fue utilizado como medida patrón. Sin embargo, la frecuencia de resonancia capturada por el codificador presenta un error máximo de 6% contra el valor promedio registrado por un tacómetro utilizado como medida patrón.
3. Las frecuencias de resonancia halladas en la última parte del cuarto capítulo son diferentes a las frecuencias calculadas en el trabajo previo por 39.59 %. Así mismo se obtiene 36.19 % de error al comparar los resultados del trabajo previo con los resultados analíticos. Sin embargo, este error se reduce a 17 % cuando se compara los resultados de la presente tesis con los analíticos.

FUENTES

ADAMS, Douglas

2008 "Mechanical Vibrations". Material del curso ME 563 Mechanical Vibrations. Estados Unidos: Purdue University. Consulta: 13 de octubre de 2018.

https://engineering.purdue.edu/~deadams/ME563/notes_10.pdf

ARZAPALO, Ed

2015 Implementación de un módulo de laboratorio para el estudio dinámico en estructuras metálicas de equipos mecánicos. Tesis para optar por el título en Ingeniería Mecánica. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Consulta: 8 de junio del 2016.

<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/6504>

CONTAVAL

Teoría encoders rotativos (vol#2). Consulta: 13 de octubre de 2018.

<http://www.contaval.es/teoria-encoders-rotativos-vol2/>

DE SILVA, Clarence

1999 "Vibration Engineering". Vibration: Fundamentals and Practice. London: Taylor & Francis, pp.1-8. Consulta: 13 de octubre de 2018.

https://books.google.com.pe/books?id=wzfNBQAAQBAJ&pg=PA19&hl=es&source=gbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=false

HONEYWELL

s/f Linear Hall-effect Sensor ICs [brief]. Consulta: 06 de junio de 2016.

https://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=50359

s/f Hall Effect Sensing and Application [manual]. Illinois. Consulta: 06 de junio de 2016.

<http://sensing.honeywell.com/hallbook.pdf>

KLINGENBERG, Larry

2005 "Frequency Domain Using Excel". Estados Unidos: San Francisco State University School of Engineering, pp. 1-5. Consulta: 8 de junio del 2016.

http://www.stem2.org/je/Excel_FFT_Instructions.pdf

ON SEMICONDUCTOR,

2002 Linear & Switching Voltage Regulator Handbook [manual]. Estados Unidos. Consulta: 06 de junio de 2016.

<http://educyclopedia.karadimov.info/library/HB206-D.PDF>

SEDRA, Adel

2006 "Circuitos Microelectrónicos". Quinta Edición México: McGraw-Hill Interamericana, pp.271-272. Consulta: 25 de junio del 2016.

SUPATTATHAM, Montri

2010 "Design of a Contactless Sensor System for Woven-Bag Manufacture Monitoring". Quality Electronic Design (ASQED), 2nd Asia Symposium on, pp. 93-97. Consulta: 25 de junio del 2016.

<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5548220&isnumber=5548154>

SRIRATANA, Witsarut

2018 "Vibration Analysis Based on Magnetic Field Balancing Technique," 2018 *International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST)*, Phuket, pp. 1-4. Consulta: 10 febrero del 2019.

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8434496&isnumber=8434393>

ZENCOVIBRATION

s/f Tip: Performing a bump test. Consulta: 13 de setiembre de 2016.

<http://www.zencovibrations.com/tip-performing-a-bump-test/>

ANEXOS

Anexo A

- Hojas de datos de los componentes usados en la implementación.
- Diseño de la fuente.

Anexo B

- Códigos para la programación del controlador y la interfaz.
- Comparativa/Calibración de sensor de vibración, velocidad y “Bump Test”.
- Planos del diseño industrial.
- Presupuesto utilizado.

Anexo C

- Hoja de datos Excel para el cálculo de las frecuencias de resonancia.
- Capturas de las frecuencias naturales en los tres niveles.

