

**LABORATORIO VIRTUAL DE VIBRACIONES MECÁNICAS PARA LA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL
DE SANTANDER**

BRAYAN STHEFEN GÓMEZ SALAMANCA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2016

**LABORATORIO VIRTUAL DE VIBRACIONES MECÁNICAS PARA LA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL
DE SANTANDER**

BRAYAN STHEFEN GÓMEZ SALAMANCA

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

**HELLER GUILLERMO SANCHEZ ACEVEDO
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

*A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.
Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.*

A mis hermanos, que día a día me enseñaron con sus acciones el saber entender, comprender y aceptar nuestras cualidades y defectos. Por su apoyo incondicional, y por ser ese par de piernas para caminar, que en momentos de debilidad no tuve.

A mi novia, Ana Milena Forero, por su paciencia y perseverancia en esta relación. Por su tolerancia y comprensión, y sobre todo por su apoyo incondicional, sin ella llegar hasta acá habría sido mucho más difícil.

BRAYAN S. GOMEZ S.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos por su incondicional apoyo moral y económico durante toda mi formación.

A mis amigos, por siempre estar ahí para escucharme, no solo felicitándome en los buenos momentos, sino haciéndome entender mis errores y los malos ratos.

A mi novia, Ana Milena, por su incalculable tolerancia, por siempre escoger apoyarme en todo momento y brindarme un amor incondicional.

A mi director, el profesor Ing. Heller Guillermo, por su guía y colaboración a lo largo de todo este trabajo.

BRAYAN S. GÓMEZ S.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	17
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	18
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	18
1.3.1 Objetivo general.....	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	19
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1 VIBRACIONES MECÁNICAS	20
2.1.1 Vibración:	20
2.1.2 Áreas de Aplicación.....	21
2.1.3 Fenómeno vibratorio en sistemas mecánicos.....	21
2.1.4 Excitación.....	22
2.1.5 El sistema.....	22
2.1.6 Respuesta.....	22
2.1.7 Cinemática de las vibraciones mecánicas	23
2.1.8 Clasificación temporal del movimiento vibratorio.....	24
2.1.9 Causas de fallas en elementos mecánicos.....	25
2.2 INTRODUCCIÓN A LOS LABORATORIOS VIRTUALES.....	26
2.2.1 Realidad Virtual	26
2.2.2 Laboratorios virtuales	27
2.2.3 Requerimientos para la implementación de laboratorios virtuales	28
2.3 PRÁCTICAS Y LABORATORIOS DESARROLLADOS POR OTRAS ENTIDADES	29
2.3.1 MOBIUS INSTITUTE. (Mobius simulator spotlight).....	29

2.3.2	Escuela Politécnica Nacional (Quito, Ecuador): IMPLEMENTACION DE UN LABORATORIO VIRTUAL BASICO DE COMUNICACIONES POR FIBRA ÓPTICA UTILIZANDO LABVIEW	30
3.	DESARROLLO DEL LABORATORIO VIRTUAL DE VIBRACIONES MECÁNICAS.....	31
3.1	PROGRAMAS USADOS EN EL DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS	31
3.1.1	Labview	31
3.1.2	Matlab.....	31
3.1.3	JAVA	31
3.2	VENTANA PRINCIPAL	32
3.3	ESTRUCTURA DEL LABORATORIO VIRTUAL.....	33
3.4	MÓDULOS DEL SISTEMA	34
3.4.1	Módulo 1: Tratamiento digital de señales.....	34
3.4.2	Módulo 2: Detección de fallas en máquinas rotativas	35
3.5	INTERFAZ Y DESCRIPCIÓN DE CADA PRÁCTICA	36
3.5.1	Práctica 1: Transformada rápida de Fourier	36
3.5.2	Práctica 2: Filtrado promediado y superposición de la FFT	38
3.5.3	Práctica 3: Introducción a la Transformada de Wavelet para la descomposición de señales	40
3.5.4	Práctica 4: Técnica de Enveloping.	41
3.5.5	Práctica 5: Construcción y análisis de órbitas.....	42
3.5.6	Práctica 6: Desbalanceo de elementos rotativos.....	44
3.5.7	Práctica 7: Desalineamiento de elementos rotativos.....	44
3.5.8	Práctica 8: Fallos en rodamientos	46
3.5.9	Práctica 9: Fallas en dientes de engranaje	47
3.5.10	Práctica 10: Balanceo estático de elementos	48
3.5.11	Práctica 11: Prueba y análisis de amortiguamiento por fricción seca	49

3.5.12 Práctica 12: Prueba de cabeceo en ejes (whirling shaft test)	50
3.6 FORMATO DE INFORME.....	51
4. MANUAL DE USUARIO.....	53
4.1 PORTADA Y TABLA DE CONTENIDO.....	53
4.2 CONTENIDO DEL MANUAL.....	55
5. CONCLUSIONES	56
6. RECOMENDACIONES	57
BIBLIOGRAFÍA.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos del fenómeno vibratorio.....	22
Figura 2. Características de la vibración.....	24
Figura 3. Página principal de ingreso.....	32
Figura 4. Diagrama estructural del Laboratorio Virtual.....	33
Figura 5. Presentación del módulo 1: Procesamiento digital de señales.	34
Figura 6. Presentación del módulo 2: Detección de fallas en elementos rotativos.	35
Figura 7. Estructura de la interfaz para las prácticas correspondientes al módulo uno.	36
Figura 8. Práctica 1: Ventana de teoría.	37
Figura 9. Simulación 1 de la FFT.....	37
Figura 10. Simulación de un osciloscopio para la práctica 1.	38
Figura 11. Práctica 2: Indicaciones y teoría.	38
Figura 12. Panel frontal del filtrado de señales.....	39
Figura 13. Panel frontal de superposición y promediado de señales.....	39
Figura 14. Práctica 3: Indicaciones y teoría.	40
Figura 15. Simulación 1 de la Transformada de Wavelet.	40
Figura 16. Simulación 2 de la Transformada de Wavelet.	41
Figura 17. Práctica 4: Indicaciones y teoría.	41
Figura 18. Simulación 1 de la Técnica de Enveloping.	42
Figura 19. Simulación 2 de la Técnica de Enveloping.	42
Figura 20. Práctica 5: Indicaciones y teoría.	43
Figura 21. Simulación de las curvas de Lissajous.	43
Figura 22. Práctica 6. Desbalanceo de elementos rotativos.	44
Figura 23. Simulación de desbalanceo de un rotor.....	44
Figura 24. Práctica 7: Presentación.	45
Figura 25: a) Visualización de la simulación.	45
Figura 26. Práctica 8: Fallas en rodamientos.....	46
Figura 27. Simulación de fallas en rodamientos.	46
Figura 28. Práctica 9 Fallas en dientes de engranajes.	47
Figura 29. Simulación de fallas en dientes de engranajes.....	47

Figura 30. Práctica 10 Balanceo estático de elementos.	48
Figura 31. Simulación de balanceo estático en un rotor.	48
Figura 32. Práctica 11 Prueba y análisis de amortiguamiento por fricción seca.	49
Figura 33. Simulación de amortiguamiento por fricción seca.....	49
Figura 34. Práctica 12: Prueba de cabeceo en ejes.	50
Figura 35. Segunda ventana de la práctica 12.	50
Figura 36. Presentación del formato de informe.	51
Figura 37. Portada del manual de usuario.	53
Figura 38. Tabla de contenido del Manual de Usuario.....	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación temporal de las vibraciones.	24
Tabla 2. Algunas causantes de fallas en elementos mecánicos.	26
Tabla 3. Contenido del Manual de usuario.	55

LISTA DE ANEXOS

Los presentes anexos se encuentran ubicados en el CD – ROM del presente proyecto de grado:

ANEXO A. MANUAL DE USO DE VIBVIEW.....	63
--	----

RESUMEN

TITULO:

LABORATORIO VIRTUAL DE VIBRACIONES MECANICAS PARA LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.*

AUTOR:

BRAYAN STHEFEN GOMEZ SALAMANCA.**

PALABRAS CLAVES:

Laboratorio virtual, vibraciones mecánicas, vibración, maquinas rotativas.

DESCRIPCION:

El objetivo de este proyecto es la realización de un laboratorio virtual que permita a los estudiantes de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, afianzar los conceptos asociados a los fenómenos de vibración estudiados a lo largo del semestre en el aula de clase. Para la realización del laboratorio virtual se diseñó una interfaz gráfica dentro del ambiente de programación de Labview 2014, la cual cuenta con botones para moverse entre módulos y prácticas de manera que el estudiante la encuentre sencilla de usar. Al entrar en el laboratorio virtual se encuentran dos módulos correspondientes a las dos temáticas principales que engloban las practicas del laboratorio virtual.

Algunas de las prácticas dentro del laboratorio han sido realizadas en el entorno de programación Guide proporcionado por Matlab, ya que este permitía utilizar funciones adicionales. Los temas tratados en cada practica involucran una teoría previa para la lectura del estudiante, su respectiva bibliografía y posterior a eso una simulación del fenómeno que se está estudiando.

Para finalizar se realiza el manual de usuario que muestra de forma específica el procedimiento a seguir para la instalación del laboratorio virtual, uso y desinstalación del mismo.

* Proyecto de grado

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: HELLER GUILLERMO SANCHEZ ACEVEDO Ing. Mecánico.

ABSTRACT

TITLE:

VIRTUAL LABORATORY OF MECHANICAL VIBRATIONS FOR THE MECHANICAL ENGINEERING SCHOOL OF THE UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER .*

AUTHOR:

BRAYAN STHEFEN GOMEZ SALAMANCA.**

KEYWORDS:

Virtual laboratory, Mechanical vibrations, vibrations, rotating machinery.

DESCRIPTION:

The aim of this thesis is the realization of a virtual laboratory that allows students of Mechanical Engineering School of Universidad Industrial de Santander, verify and review the Vibrations phenomena studied during semester classes. For this project, a graphic interface was designed within a Labview 2014 programming environment which has buttons to move between modules and practices so that students finds it easy to use. At the moment to access to the virtual laboratory, the student can see two modules corresponding to both main topics of virtual laboratory practices. Some of the practices in the laboratory have been made in the programming environment provided by Matlab Guide, as this allowed to use additional functions. The topics covered in each practice involving a previous post that a simulation of the phenomenon being studied theory for student reading, their respective bibliography.

Finally, a user manual was made to guide the student step by step through the installation, use and uninstallation of the virtual laboratory program.

* Degree work.

** Universidad Industrial de Santander. Faculty of Physics Mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Director: HELLER GUILLERMO SANCHEZ ACEVEDO Mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años notamos y evidenciamos que la historia viene marcada por un sinnúmero de avances tecnológicos por el afán del ser humano de llegar a soluciones prácticas de los problemas que en su día a día se presentan. Esto, por supuesto, incluye avances tecnológicos en el área de la Ingeniería Mecánica, y más específicamente de las Vibraciones Mecánicas.

Los avances dentro del análisis de vibraciones mecánicas han traído consigo nuevos paradigmas para la educación de los ingenieros, ya que estas nuevas herramientas de análisis pese a ser muy útiles y prácticas, requieren de un conocimiento previo de los conceptos que involucra y de la finalidad de la misma, para de esta forma, sacar mayor provecho a su uso dentro de la industria. Sin embargo, otro de los avances que se ha dado y esta vez en el campo de la educación, es la enseñanza virtual. Por medio de simulaciones, paneles y teoría presentada a través de un ordenador, el estudiante puede acceder a información que le permita aprender o reforzar los conocimientos aprendidos en el aula de clase.

De esta manera y en el contexto que anteriormente se cita, este trabajo de grado se centra en el diseño y construcción de un Laboratorio Virtual de Vibraciones Mecánicas.

El trabajo realizado tiene varias etapas en donde se desarrollaron los objetivos planteados partiendo desde el diseño de la interfaz gráfica del laboratorio virtual hasta llegar a la realización del manual de usuario correspondiente.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El área de vibraciones mecánicas es una parte importante en la educación de la ingeniería mecánica. La comprensión de cómo las vibraciones afectan a las máquinas y sus distintos elementos, permite tener ideas del comportamiento de dichas piezas mecánicas y así poder mejorar su funcionamiento.

Si bien, el proceso de formación en el área de las vibraciones mecánicas está acompañado del desarrollo de una serie de prácticas en el laboratorio, existe un gran contenido teórico que debería estar apoyado en elementos visuales, durante las exposiciones del profesor, que le permita al estudiante relacionar los conceptos con el fenómeno, aunque sea de forma virtual.

La Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander imparte cursos de posgrado que vinculan módulos de vibraciones mecánicas, tanto en Bucaramanga como en otras ciudades. Para éste último caso la formación no está acompañada de prácticas de laboratorio, para lo cual, una buena solución es contar con herramientas virtuales que permitan mejorar el proceso de mediación.

La formación de ingenieros mecánicos, con las mejores capacidades que respondan acertadamente a las exigencias del mercado laboral es un compromiso de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Es por ello que el mejoramiento de los procesos de formación se hace relevante para lograr esta meta. Así, fortaleciendo las capacidades en el análisis de vibraciones mecánicas de los estudiantes de la escuela contribuye a la consecución de este objetivo.

1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

En el laboratorio de vibraciones mecánicas existen fenómenos que por su naturaleza no se aprecian a simple vista. Sin embargo, un medio que permite observar y estudiar en forma detallada dichos fenómenos, lo constituye un entorno virtual, el cual simula los procesos que se llevan a cabo en tales situaciones; y por consiguiente, se puede llegar a realizar un análisis más profundo y prolijo de los fenómenos que intervienen en ellos.

Por otra parte, para los estudiantes es importante mejorar el proceso de competencias a través de la validación y apropiación de los conceptos, por lo que es necesaria la utilización de una herramienta que sirva de apoyo al proceso de construcción de conocimiento tanto en horas de clase con el docente, como en el tiempo de estudio independiente.

Está comprobado que una manera de ayudar a la generación de conocimiento en la asignatura, en este caso de vibraciones mecánicas, es mediante el empleo de las TIC's como herramienta que permita mostrar de forma detallada procesos y respuestas dinámicas de los sistemas vibratorios.

De esta forma, en todos aquellos cursos de vibraciones mecánicas que sean ofertados por la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, y que por temas de tiempo de desarrollo del curso o porque van a ser desarrollados en otra ciudad, no se tiene a disposición el Laboratorio; una herramienta virtual que permita simular los fenómenos propios de la temática, se convierte en un aliado para mejorar el proceso de construcción del conocimiento.

1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.3.1 Objetivo general

- Contribuir a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander en el cumplimiento de su misión respecto al desarrollo social, científico y tecnológico por medio del diseño, desarrollo e implementación de un laboratorio virtual de vibraciones mecánicas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar y programar las siguientes prácticas para el laboratorio virtual de

vibraciones mecánicas:

Tratamiento y análisis de espectro:

- Práctica 1: Análisis y comprensión de la FFT (Transformada rápida de Fourier de su sigla en inglés Fast Fourier Transform).
- Práctica 2: Filtrado, promediado y superposición de la FFT.
- Práctica 3: Introducción a la Transformada de Wavelet para la descomposición de señales.
- Práctica 4: Técnica de enveloping, conceptos teóricos y métodos de aplicación hacia el estudio de fallas.
- Práctica 5: Construcción y análisis de órbitas.

Detección de fallas en máquinas rotativas:

- Práctica 6: Desbalanceo de elementos rotativos.
- Práctica 7: Desalineamiento en elementos rotativos.
- Práctica 8: Fallos en rodamientos.
- Práctica 9: Fallas en dientes de engranaje.
- Práctica 10: Balanceo de elementos estáticos.
- Práctica 11: Prueba y análisis de amortiguamiento por fricción seca.
- Práctica 12: Pruebas de cabeceo en ejes (whirling shaft test).
- Diseñar e implementar la interfaz y guía de usuario.
- Diseñar e implementar las prácticas de laboratorio virtual.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Se decide elaborar un laboratorio virtual, con el objetivo de mostrar en detalle los diferentes fenómenos estudiados a través del análisis de vibraciones mecánicas; con el que se busca aportar en la asignatura una herramienta que esté a disposición del docente en las horas de clase y además, que apoye al estudiante en el refuerzo de conocimientos teórico- prácticos de la materia en el tiempo de estudio individual.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 VIBRACIONES MECÁNICAS

2.1.1 Vibración: Se define vibración como la oscilación de un sistema físico o de una propiedad alrededor de una posición de equilibrio (o de referencia)¹. Este fenómeno es causado por una fuerza de excitación, la cual puede ser aplicada de forma externa al objeto, o puede tener su origen dentro de él.

La frecuencia y la magnitud de la vibración están determinadas por la fuerza de excitación y las propiedades del sistema mecánico. Donde, las amplitudes de vibración son una muestra determinante del estado de salud de una máquina. Esta premisa es lo que fundamenta la necesidad y los beneficios que brinda la realización del mantenimiento predictivo basado en vibraciones.

En primera instancia, las vibraciones se pueden clasificar como²:

- Vibración lineal
- Vibración armónica
- Vibración periódica
- Vibración aleatoria

Así mismo, de acuerdo a su naturaleza pueden clasificarse como las define Rao³:

- **La vibración libre o natural:** Es una manifestación del comportamiento oscilatorio de los sistemas mecánicos como resultado de un repetitivo intercambio de energía cinética y energía potencial entre los componentes del sistema.
- **Las vibraciones forzadas:** Se obtienen en un sistema mediante alguna forma de excitación. Las fuerzas de excitación pueden ser generadas internamente dentro del sistema dinámico (fuerzas de inercia o fuerzas del

¹ GARCIA CASTRO, Alfonso. Análisis de vibraciones. Bucaramanga, Ediciones UIS. 1995. P 9.

² LAFITA, F; MATA, H. Introducción a la teoría de las vibraciones mecánicas. Edición Labor. P 15.

³ SUNGIRESU S., Rao. Mechanical Vibrations. Miami, Addison Wesley Longman Publishing Co. 1990. P 10.

medio de trabajo) o transmitidas al sistema a partir de una fuente externa.

Existen vibraciones “benéficas”, las cuales sirven a propósitos útiles y vibraciones “indeseables” que pueden ser perjudiciales, desagradables o nocivas.

2.1.2 Áreas de Aplicación: La ingeniería de vibraciones comprende dos grandes categorías de aplicación:

- Eliminación y supresión de vibraciones indeseables.
- Generación de las formas y cantidades necesarias de vibraciones útiles.

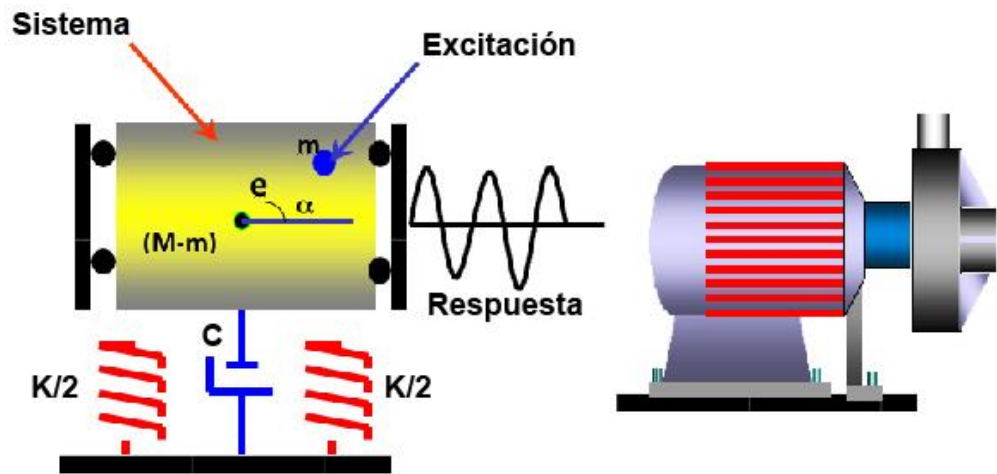
Las vibraciones indeseables son aquellas relacionadas con el mal funcionamiento de una máquina o elemento, lo cual genera molestia, peligro y desgaste de estructuras, y por consiguiente se busca suprimirlos o atenuarlos. Entre estos tipos se encuentran: movimiento por sismos en estructuras y construcciones, interacciones dinámicas entre vehículos y puentes o avenidas, ruido generado por equipo de construcción, entre otros.

Por el contrario, las vibraciones generadas por instrumentos musicales, aparatos utilizados en terapia física y aplicaciones médicas, así como máquinas industriales diseñadas para aprovechar un sistema vibratorio, hacen parte de las vibraciones deseables.

2.1.3 Fenómeno vibratorio en sistemas mecánicos: Un sistema mecánico vibra cuando sobre él actúan fuerzas variables en magnitud y/o dirección y el sistema presenta movilidad apreciable. La intensidad de la vibración depende de la excitación y de la movilidad del sistema⁴.

⁴ PALOMIRO, Evelio. Medición y análisis de vibraciones en el diagnóstico de máquinas rotativas, Cuba. 1997.

Figura 1. Elementos del fenómeno vibratorio.



Fuente: Autor.

El fenómeno vibratorio (o problema de vibraciones) se encuentra formado principalmente por: la excitación, resultado de la fuerza que actúa sobre el sistema; el sistema, cuyas características están representadas por su movilidad y la respuesta del sistema, que es la vibración generada como resultado.

2.1.4 Excitación⁵: Es la acción externa del sistema que causa la vibración, representada en una fuerza variable o un movimiento que desplaza al sistema alternativamente en torno a su posición de equilibrio.

2.1.5 El sistema⁶: Se denomina sistema mecánico vibratorio al conjunto de elementos mecánicos que se encuentran enlazados unos con otros de cierta forma particular, con el objetivo de cumplir una función específica; donde además, dicho conjunto está sometido a vibración proveniente de fuentes externas o de su propia dinámica de trabajo.

2.1.6 Respuesta: La respuesta de un sistema mecánico vibratorio, se define como el movimiento oscilatorio que adquiere dicho sistema como consecuencia de la acción de excitaciones y fuerzas elásticas recuperadoras del mismo.

⁵ GARCIA CASTRO, Alfonso. Análisis de vibraciones. Bucaramanga, Ediciones UIS. 1995. P 12.

⁶ SUNGIRESU S., Rao. Mechanical Vibrations. Miami, Addison Wesley Longman Publishing Co. Second Edition. 1990. P 375.

2.1.7 Cinemática de las vibraciones mecánicas⁷:

➤ Características de la vibración

Las características (o parámetros característicos) de una vibración simple, son las magnitudes mediante las cuales la vibración queda definida o determinada. Estas son: amplitud, frecuencia y fase.

- **Amplitud:** Indica la intensidad de la vibración expresada en cualquiera de los parámetros cinemáticos: desplazamiento, velocidad, o aceleración.
- **Frecuencia:** Muestra el ritmo de la vibración, es decir, con qué rapidez (o lentitud) se repite ésta en el tiempo, y matemáticamente se expresa como:

$$F = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

Donde F corresponde a la frecuencia y T al periodo o tiempo requerido para completar un ciclo de vibración.

Por otro lado, desde el punto de vista mecánico, este parámetro temporal está relacionado con el tipo de causa o falla que produce el movimiento oscilatorio de un sistema.

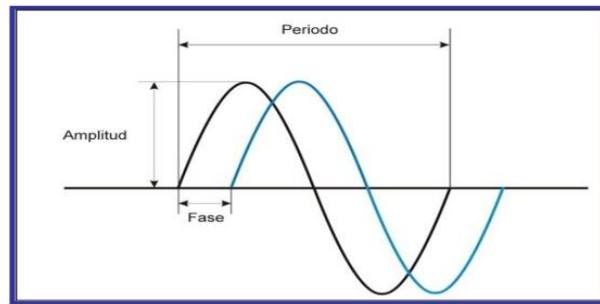
En el análisis de vibraciones es común realizar medición de amplitud y frecuencia solamente, pero en otras aplicaciones y para que la vibración sea totalmente caracterizada, es necesario determinar también su fase.

- **Fase:** Indica la posición angular o temporal de la vibración, respecto a una señal de referencia.

El ángulo de fase de la vibración es la separación en tiempo, convertida en grados, entre dos vibraciones de la misma frecuencia; puede ser utilizada la separación en tiempo entre una excitación (fuerza) y la vibración causada.

⁷ GARCIA, Op. cit., P 14.

Figura 2. Características de la vibración.



Fuente: Vibraciones mecánicas, Alfonso García

2.1.8 Clasificación temporal del movimiento vibratorio

En general las vibraciones mecánicas pueden ser clasificadas en periódicas y no periódicas. Una vibración periódica es aquella en la cual se observa un patrón que se repite en el tiempo, mientras que en la no periódica no se logra apreciar esta característica. Dentro de estos dos grupos se identifican subdivisiones asociadas a formas diferentes en que ocurre la vibración. En la tabla 1 se presenta dicha clasificación.

Tabla 1. Clasificación temporal de las vibraciones.

VIBRACIONES MECANICAS	Periódicas	Armónicas	
		No armónica	
	No periódicas	Determinísticas	
		Aleatorias	Estacionarias
			No estacionarias

Fuente: Vibraciones mecánicas, Alfonso García

La mayoría de las vibraciones presentes en sistemas mecánicos no son del tipo armónico, sin embargo, una vibración o cualquier señal, representada como una función periódica, puede ser descompuesta en una serie de funciones senoidales y cosenoidales simples, lo que facilita el manejo matemático de las mismas. Este concepto fue establecido por Jean Baptiste

Joseph Fourier, por lo que se conoce como teorema de Fourier⁸. Así mismo, existen otros conceptos utilizados ampliamente en el análisis de señales, tales como:

- **La técnica de enveloping:** Esta técnica busca principalmente detectar zonas resonantes excitadas o moduladas por fuerzas de impacto periódicas.
- **La Transformada de Wavelet:** Esta descompone una señal en formas de tiempo – frecuencia, es utilizada en el análisis de señales con alto grado de ruido ya que permite la eliminación del mismo en un grado bastante amplio.
- **Filtrado, promediado y superposición de señales:** Técnicas del tratamiento de señales por medio del cual se puede observar una señal dentro de valores de frecuencia escogidos. De esta forma, al analizar una pieza mecánica en movimiento, las frecuencias provenientes de ruidos u otros elementos mecánicos pueden ser discriminadas.

2.1.9 Causas de fallas en elementos mecánicos

De acuerdo al tipo de máquina o elemento mecánico que se esté usando, se pueden presentar distintas fallas debido a las vibraciones producidas por el equipo o algún elemento externo a él. Es por esto que sus estudios han ido evolucionando en la forma de detectar los comportamientos que producen esas consecuencias, a continuación, se muestran distintas causas de fallos en la Tabla 2, y las consecuencias que estos fallos pueden presentar.

⁸ De Silva, Clarence W. Vibration: Fundamentals and Practice. London. Boca Raton. 2000. P 188.

Tabla 2. Algunas causantes de fallas en elementos mecánicos.

Causas de fallas en elementos mecánicos	Consecuencias
Desbalanceo mecánico ⁹	Daños en los cojinetes, además de desgaste de las piezas relacionadas. En algunos casos puede afectar el producto final. Ejemplo: torno.
Des alineamiento de elementos rotativos ¹⁰	Vibraciones fuertes, daños en los cojinetes y pérdida de potencia.
Desgaste de rodamientos ¹¹	Fuertes vibraciones perjudiciales en los distintos anillos del rodamiento acompañado de un desgaste sobre el eje.
Dientes de engranaje	Vibraciones fuertes y rotura de engranajes que pueden llevar a parar la producción. Ruido bastante fuerte.

Fuente: Autor

2.2 INTRODUCCIÓN A LOS LABORATORIOS VIRTUALES

2.2.1 Realidad Virtual

La realidad virtual es una representación de las cosas a través de medios electrónicos, como el computador, que da la sensación de estar en una situación real en la que se puede interactuar con lo que nos rodea.

La realidad virtual puede ser de dos tipos: inmersiva y no inmersiva. Los métodos inmersivos con frecuencia se ligan a un ambiente tridimensional creado por computadora, y donde se usan dispositivos adicionales como cascos, guantes, etc. La realidad virtual no inmersiva utiliza medios como el que actualmente ofrece Internet en el cual se puede interactuar en tiempo real con diferentes personas en espacios y ambientes que en realidad no existen, sin la necesidad de dispositivos adicionales a la computadora.

⁹ SUNGIRESU S. Op. cit., P 434.

¹⁰ CYRIL M, Harris. PIERSOL, Allan. HARRIS' SHOCK AND VIBRATION HANDBOOK. New York, McGRAW HILL. Fifth Edition. 2002. P 39.37.

¹¹ CASTRO, YIRA. PAEZ, EDWIN. BANCO EXPERIMENTAL PARA ESTUDIO DE FALLAS EN RODAMIENTOS. Bucaramanga, Ediciones UIS. 2008. P 42.

La realidad virtual puede ser un medio sencillo y barato para simular muchos tipos de procesos, o para hacer demostraciones visuales muy variadas, por lo que el campo de aplicaciones es muy amplio, como por ejemplo en: la arquitectura, el entretenimiento, la medicina, entre otros.

2.2.2 Laboratorios virtuales

La creciente aparición de aplicaciones de las nuevas tecnologías a la enseñanza tales como los avances de los entornos multimedia y la aplicación cada vez más amplia del internet en la educación debido a la enorme cantidad de recursos educativos, nos obliga a hacer uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación para integrarlas en nuestro trabajo diario. Dentro de estas aplicaciones informáticas resultan de gran interés en las ciencias el uso de los laboratorios virtuales.

En los últimos años ha aumentado considerablemente el uso de las nuevas tecnologías en la educación. Esto ha brindado la oportunidad de estimular el aprendizaje con una tecnología educativa apta para los distintos niveles de la enseñanza.

2.2.2.1 Ventajas y desventajas del uso de laboratorios virtuales¹²:

- Ventajas:

- Un laboratorio virtual ofrece flexibilidad de horarios para el estudiante, ya que podrá acceder a él casi en cualquier momento y en cualquier lugar.
- Facilita las condiciones de aprendizaje al alumno ya que permite que el estudiante pueda repetir varias veces una práctica de laboratorio hasta que considere haber entendido el experimento que se esté tratando.
- Brinda una optimización de recursos, ya que un laboratorio real requiere de suficiente cantidad de materiales para cada estudiante, así como de una persona encargada del mantenimiento del mismo, lo que implica

¹² CAPITO RUIZ, María E. IMPLEMENTACION DE UN LABORATORIO VIRTUAL BASICO DE COMUNICACIONES POR FIBRA OPTICA UTILIZANDO LABVIEW. Quito, Ecuador. 2003. P 37.

altos costos; por el contrario, un laboratorio virtual requiere de menos equipo ya que éste se comparte, lo que representa un ahorro económico.

- Permite que el alumno además de mejorar su formación en la materia concreta de ingeniería que se está practicando, mejore sus conocimientos de las nuevas tecnologías aplicadas a Internet.
- Mayor seguridad, ya que se elimina el riesgo asociado con la utilización de equipos de alta potencia en laboratorios eléctricos.

- Desventajas:

- El estudiante no adquiere todas las habilidades que le proporciona el manejo de equipos del laboratorio.
- La ausencia del profesor o instructor al momento de realizar la práctica, cuando la información proporcionada por el laboratorio virtual no es suficiente, puede provocar en el estudiante ciertas dudas y requerir de una explicación adicional.

2.2.3 Requerimientos para la implementación de laboratorios virtuales¹³:

La existencia de un laboratorio virtual, está basada en un conjunto de computadores para la interacción de los alumnos con el mismo. El laboratorio intenta siempre permitir a los estudiantes practicar de la forma más cercana a la que daría una experiencia real, brindándoles la posibilidad de interactuar con las simulaciones.

Los requerimientos de un laboratorio virtual entonces, dependerán de la aplicación que se desarrolle y de la funcionalidad que se le otorgue. A continuación, se muestran los requerimientos:

Requerimientos de Hardware:

- Un computador personal o de escritorio, en el cual se instalará la aplicación.

¹³ CAPITO RUIZ, op. cit, P 39.

- Se recomienda que el equipo cuente un procesador Intel o AMD dual Core (mínimo) y con 4 Gb de memoria RAM para el correcto funcionamiento.
- 200 Mb de espacio en el disco duro.

Requerimientos de Software:

El software requerido será el programa VIBVIEW, así como drivers de Matlab, java y archivos necesarios los cuales se incluyen en una carpeta proporcionada en la clase. Adicionalmente el computador deberá contar con las siguientes características de software:

- Sistema operativo: Windows 7, Windows 8.1 ó Windows 10.
- Actualización de Java en su última versión disponible.
- Se recomienda la última actualización de sus drivers de video para el correcto funcionamiento.
- Drivers de audio actualizados. Se recomienda Realtek HD.
- Suite ofimática: Word, Excel, etc.

2.3 PRÁCTICAS Y LABORATORIOS DESARROLLADOS POR OTRAS ENTIDADES

2.3.1 MOBIUS INSTITUTE. (Mobius simulator spotlight): MOBIUS INSTITUTE es un proveedor mundial en la educación de mantenimiento para las empresas industriales, ingenieros de fiabilidad y técnicos de monitoreo y diagnóstico. Se enfoca en colaborar para que las plantas tengan éxito en la implementación de programas de mantenimiento y confiabilidad a través de la venta de sus productos para la enseñanza del análisis de vibraciones en línea y a distancia.

Haciendo uso de este recurso en el internet se pudo apreciar la existencia de un simulador de vibraciones mecánicas, donde se muestra por medio de videos los atributos de un software de vibraciones mecánicas. Estos atributos mostrados resaltan lo importante y también enfatizan en las siguientes prácticas:

- Tratamiento de señales

- Filtrado de señales.
- Construcción y análisis de ondas.
- Fallas en engranajes.
- El desalineamiento de elementos rotativos.
- Fallas en rodamientos.

Estas prácticas se desarrollan en un entorno práctico, permitiendo al usuario conocer algunas de las variables que influyen sobre ellas. Es por esto que el simulador de Mobius Institute es una fuente importante para el desarrollo de este proyecto, ya que en base a sus temas se seleccionaron las temáticas y prácticas básicas desarrolladas en este proyecto y enunciadas en los objetivos.

2.3.2 Escuela Politécnica Nacional (Quito, Ecuador): IMPLEMENTACION DE UN LABORATORIO VIRTUAL BASICO DE COMUNICACIONES POR FIBRA ÓPTICA UTILIZANDO LABVIEW: La Escuela Politécnica Nacional, también conocida como EPN, es una universidad pública ubicada en Quito, Ecuador. Conocida por ser una universidad pionera dentro de su país en las ramas de ingeniería, física y astronomía.

En el año 2003 fue publicado el proyecto de grado mencionado, el cual maneja un entorno desarrollado en Labview. Constituye la realización de un laboratorio virtual con una serie de módulos y prácticas para que el estudiante realice de manera online a través de un dominio de internet asignado.

El proyecto evidencia y hace uso de herramientas de programación proporcionando finalmente a su universidad un laboratorio virtual para el estudio de las comunicaciones por fibra óptica, y de esta manera contribuir a la formación académica de sus profesionales.

3. DESARROLLO DEL LABORATORIO VIRTUAL DE VIBRACIONES MECANICAS

3.1 PROGRAMAS USADOS EN EL DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS

Para el desarrollo de las prácticas se hizo uso de 3 importantes programas y lenguajes de programación:

3.1.1 Labview: Labview es la herramienta principal de desarrollo de todo el entorno del laboratorio y de una gran parte de las prácticas, gracias a su utilidad y simplicidad al ser un lenguaje gráfico de alto nivel.

Las prácticas realizadas en Labview incluyen todas las del primer módulo “Tratamiento digital de señales” el cual comprende de 5 prácticas en total. Éstas llevan consigo conceptos básicos de los temas expuestos, para que el estudio por parte del estudiante sea continuo y fácil de digerir; a su misma vez cuentan con las instrucciones necesarias para manipular las simulaciones y notas adicionales en cada caso que se consideraron importantes, así como links a páginas web de interés.

3.1.2 Matlab: Para el desarrollo del módulo dos “Fallas en elementos rotativos”, se hizo necesario la utilización de otro lenguaje de programación, el cual proporcionaba ventajas que dentro de Labview eran inconvenientes, tales como el trabajo matricial y su forma de desenvolverse al realizar cálculos completos que empleaban métodos de solución de ecuaciones diferenciales.

3.1.3 JAVA: El lenguaje Java se hizo prioritario para el desarrollo de la practica 11 (“Prueba y análisis de amortiguamiento por fricción seca”). Pues mediante el uso de figuras geométricas básicas a través de la aplicación Easy Java Simulations, se podían lograr resultados deseados que serán expuestos más adelante.

3.2 VENTANA PRINCIPAL

Una parte de gran importancia en el proyecto, es el diseño de la interfaz de usuario, la que ha sido desarrollada, de manera que sea amigable e intuitiva además que resulte fácil de mantener y actualizar. En la figura 3 se muestra la primera parte a la que ingresa el usuario al ejecutar el laboratorio.

Figura 3. Página principal de ingreso.



Fuente: Autor.

La interfaz principal consta de un encabezado tradicional de presentación al laboratorio y a continuación presenta los botones de ingreso a los dos módulos principales de los que se compone.

Adicional a esto, en la zona debajo de la figura 3 se presentan 3 botones con sus respectivos logos, que dirigirán al estudiante a las siguientes páginas:

- Página de Facebook de la escuela o grupo de Facebook de estudiantes de la materia de Vibraciones mecánicas.
- Página de la Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Página de la Universidad Industrial de Santander.

3.3 ESTRUCTURA DEL LABORATORIO VIRTUAL

La estructura del laboratorio cuenta con una interfaz base desde la cual se acceso a las diferentes prácticas y simulaciones. Esto se realizó de tal manera que cada práctica es un ejecutable independiente llamado desde la aplicación base, haciéndolo de esta forma un proceso intuitivo y fluido.

El resultado final consta de un programa con un menú desde el cual se puede tener acceso a cada una de las prácticas. En la Figura 4 se resume en un diagrama de bloques la estructura organizacional del laboratorio virtual de vibraciones mecánicas.

Figura 4. Diagrama estructural del Laboratorio Virtual.



Fuente: Autor.

3.4 MÓDULOS DEL SISTEMA

Una vez ingresado al laboratorio virtual se presenta la posibilidad de entrar a los dos respectivos módulos que lo componen, y dentro de cada uno de los módulos se encuentran contenidas las prácticas a realizar.

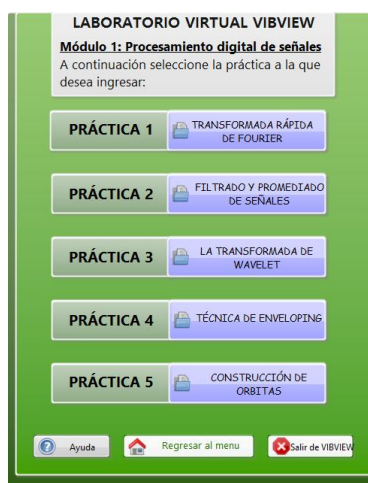
3.4.1 Módulo 1: Tratamiento digital de señales: Este módulo está orientado al tratamiento digital de una señal de vibración de tal forma que pueda ser interpretada de una mejor manera por el analista. Está caracterizado por la representación en el dominio del tiempo discreto, frecuencia discreta, u otro dominio discreto de señales. A continuación se enlistan las prácticas que corresponden a este primer módulo.

- Transformada rápida de Fourier.
- Filtrado y promediado de señales.
- La transformada de Wavelet.
- Técnica de enveloping para el tratamiento de señales.
- Construcción de órbitas.

Adicionalmente, dentro de cada práctica se incluye la referencia teórica - bibliográfica correspondiente a cada una de manera que el estudiante pueda visitarla y complementar lo aprendido. Esto se ve en las figuras de presentación de cada práctica del presente documento.

En la Figura 5 se puede observar la presentación del módulo 1.

Figura 5. Presentación del módulo 1: Procesamiento digital de señales.



Fuente: Autor

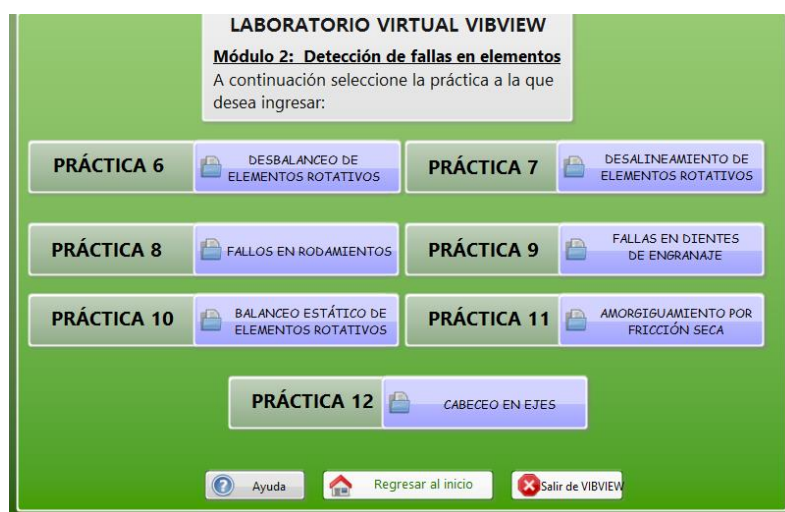
3.4.2 Módulo 2: Detección de fallas en máquinas rotativas: La mayoría de las máquinas rotatorias basan su buen funcionamiento en la discriminación de las vibraciones por las cuales se puedan ver afectadas; son estas vibraciones, como ya se ha mencionado, objeto de interés para evaluar en la realización de mantenimientos preventivos y predictivos.

En el módulo 2 (ver Figura 6) se busca mostrar al estudiante el comportamiento básico de algunas fallas que se presentan principalmente en la práctica, de forma que aprenda a identificarlas y analizarlas. Para ello, este módulo está compuesto por las siguientes prácticas:

- Desbalanceo de elementos rotativos.
- Desalineamiento de elementos rotativos.
- Fallas en rodamientos.
- Fallas en engranajes.
- Balanceo estático de elementos.
- Prueba y análisis de amortiguamiento por fricción seca.
- Prueba de cabeceo en ejes.

Adicionalmente cada práctica lleva consigo igualmente sus referencias teórico - bibliográficas, al igual que el Modulo 1. De esta manera el estudiante puede complementar y verificar la teoría presente en cada una. Esto se evidencia en cada figura de presentación de cada práctica del Módulo 2.

Figura 6. Presentación del módulo 2: Detección de fallas en elementos rotativos.

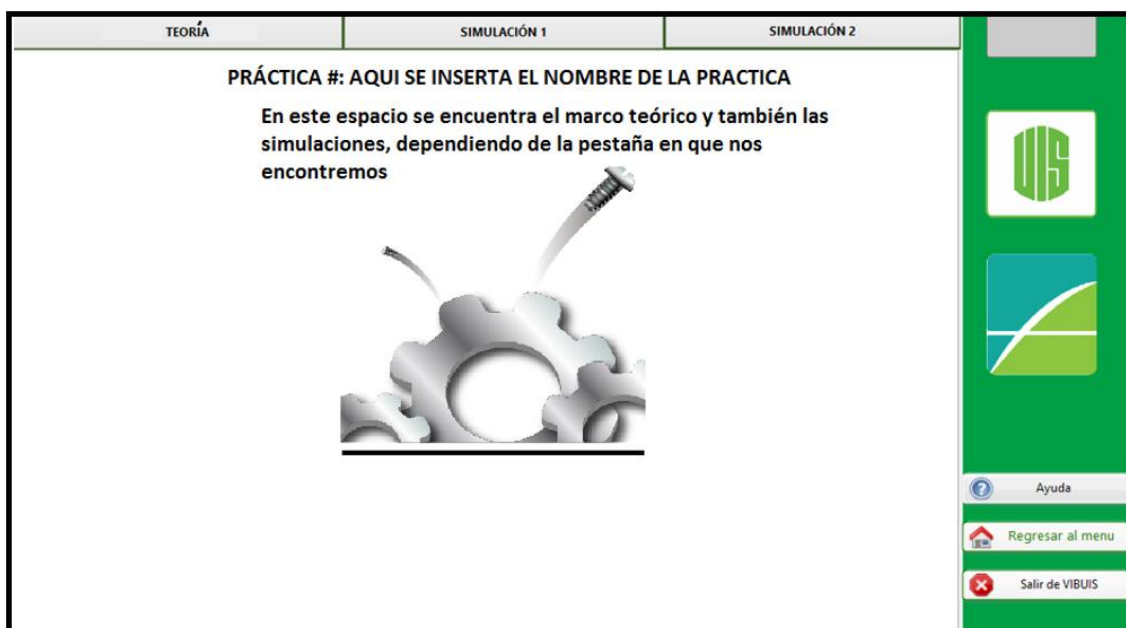


Fuente: Autor

3.5 INTERFAZ Y DESCRIPCIÓN DE CADA PRÁCTICA

Para las prácticas del módulo 1 y 2, se diseñó una plantilla sencilla y amigable, como lo muestra la Figura 7.

Figura 7. Estructura de la interfaz para las prácticas correspondientes al módulo uno.



Fuente: Autor

En esta interfaz se puede apreciar lo siguiente:

- Teoría e indicaciones para la manipulación de la práctica.
- Simulaciones 1 y 2 (En algunos casos solo habrá una simulación).
- Botones a la derecha de ayuda, regresar al menú del módulo y salir del laboratorio virtual.
- Logos emblemáticos de la Escuela de Ingeniería Mecánica y de la Universidad Industrial de Santander.

3.5.1 Práctica 1: Transformada rápida de Fourier: El primer cuadro de diálogo (ver Figura 8) que muestra esta práctica es el correspondiente a la presentación (título) y teoría del ensayo, en las cuales el estudiante podrá observar de forma básica qué es la transformada rápida de Fourier y cómo se manipulan las simulaciones.

Figura 8. Práctica 1: Ventana de teoría.

TEORÍA
SIMULACIÓN 1
SIMULACIÓN 2

LABORATORIO VIRTUAL DE VIBRACIONES MECÁNICAS
PRÁCTICA 1: LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

INTRODUCCIÓN
LA FFT: DEFINICIONES



Normalmente al hablar de vibraciones, estas se muestran en el dominio del tiempo, que son las señales capturadas directamente de la máquina. En estas señales se encuentra plasmada toda la información acerca del comportamiento de cada componente de la máquina. Sin embargo, existe un problema a la hora de realizar un diagnóstico: estas señales están cargadas de mucha información en forma muy compleja, la cual comprende las señales características de cada componente de la máquina, por lo cual prácticamente resulta imposible distinguir a simple vista sus comportamientos característicos.

Existen otras formas para realizar un estudio de vibraciones, entre las cuales se encuentra analizar las señales en el dominio de la frecuencia. Para ello se emplea la gráfica de amplitud frente a frecuencia que es conocida con el nombre de espectro. Esta es la mejor herramienta que se tiene actualmente para el análisis de maquinaria.

Bibliografía: http://www.sinais.es/Recursos/Cursosvibraciones/fundamentos/transformada_fourier.html
<ftp://ftp.udistrital.edu.co/Documentacion/Electronica/Dsp/capitulo6.PDF>

VIBVIEW





Ayuda
Regresar al menú
Salir de VIBVIEW

Fuente: Autor

La práctica correspondiente a la Transformada rápida de Fourier (FFT) consiste en el análisis de dos señales, una lleva ruido y la otra no, de esta forma variándolas dentro de los mismos parámetros se puede observar y analizar en qué difiere su comportamiento (Ver Figura 9).

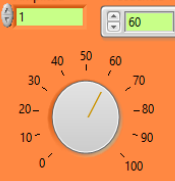
Figura 9. Simulación 1 de la FFT.

TEORÍA
SIMULACIÓN 1
SIMULACIÓN 2

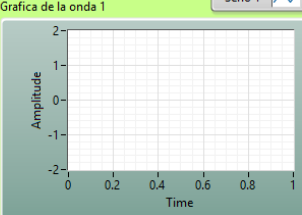
● Switch de encendido y apagado

Onda Seno 1


Amplitud 1 Frecuencia 1




Grafica de la onda 1 Seno 1




Grafica de la onda 2 Seno 2



VIBVIEW






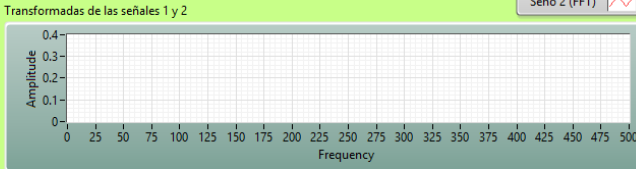
Ayuda
Regresar al menú
Salir de VIBVIEW

Onda Seno 2

Amplitud 2 Frecuencia 2



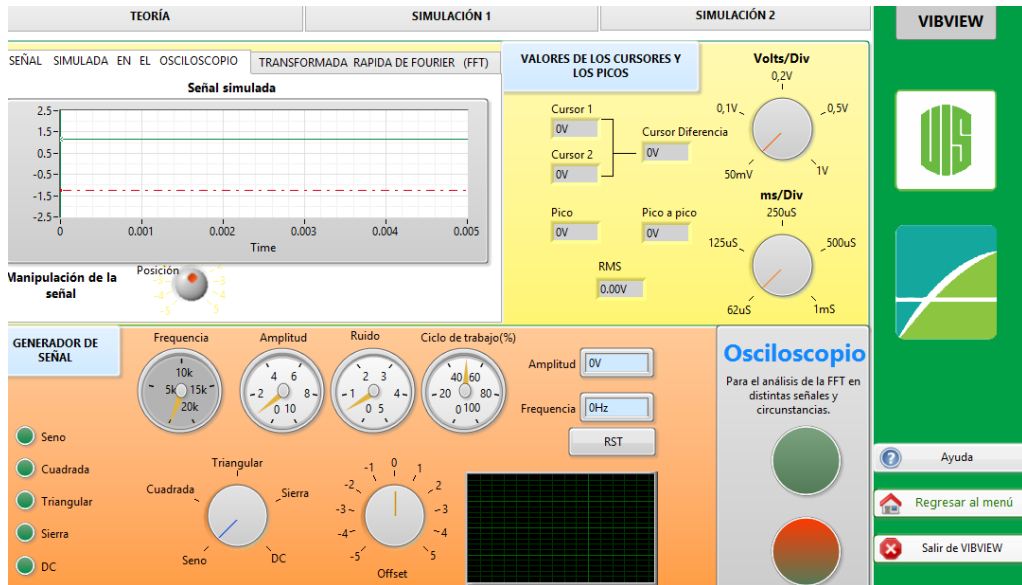
Transformadas de las señales 1 y 2 Seno 1 (FFT)
Seno 2 (FFT)



Fuente: Autor.

Adicional a esto se presenta la simulación de un osciloscopio el cual permite generar distintos tipos de señales, manipular el nivel de ruido y observar su espectro de Fourier, tal como se puede ver en la Figura 10.

Figura 10. Simulación de un osciloscopio para la práctica 1.



Fuente: Autor.

3.5.2 Práctica 2: Filtrado promediado y superposición de la FFT: Esta práctica permite filtrar y superponer una señal de forma que se pueda analizar en el rango de frecuencia impuesto en el filtro que el usuario escoja. Primeramente, se presenta la teoría e indicaciones en la Figura 11.

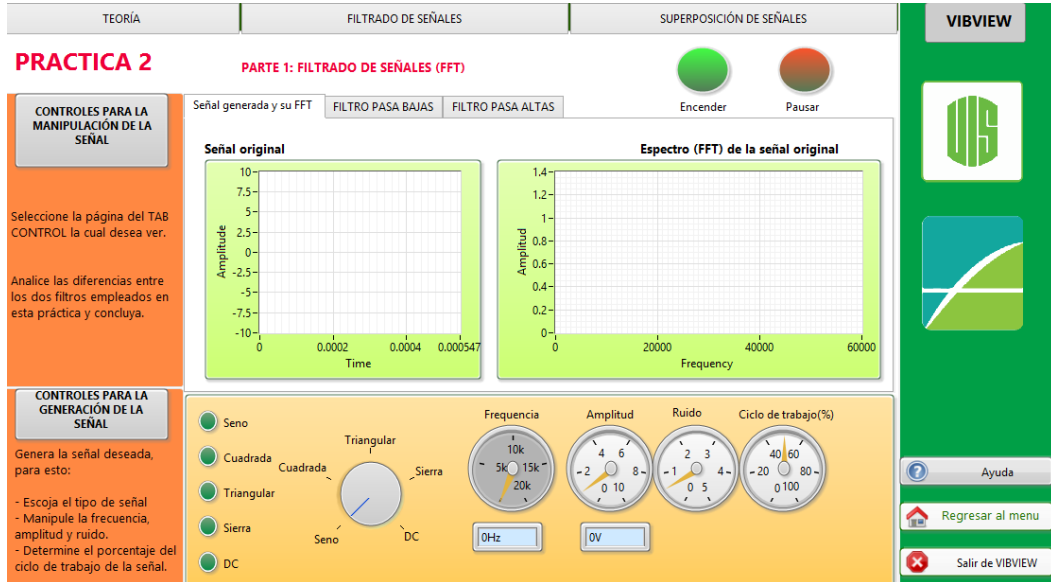
Figura 11. Práctica 2: Indicaciones y teoría.



Fuente: Autor.

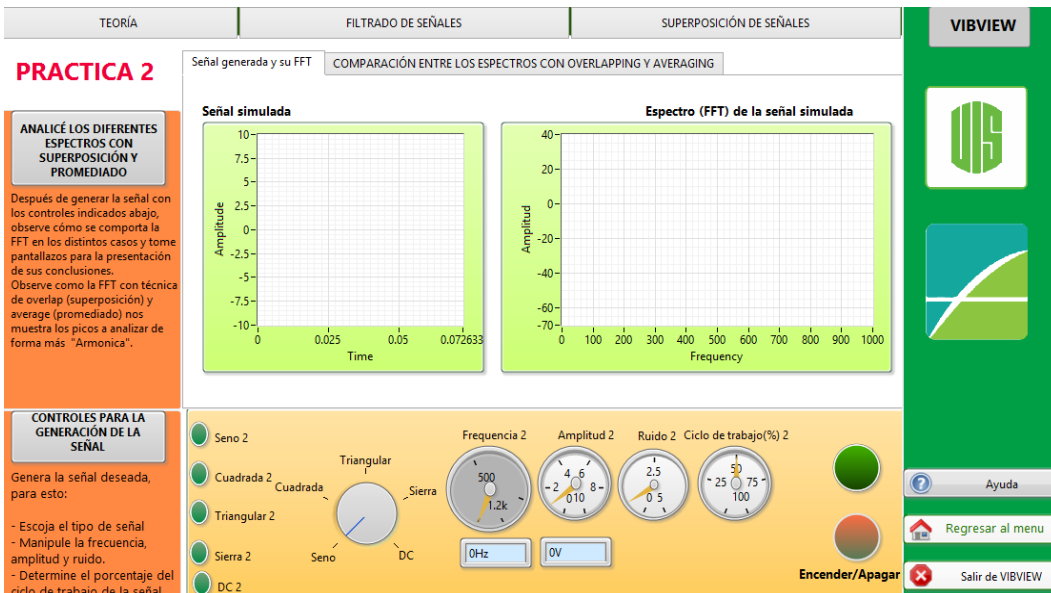
Posteriormente se encuentran las ventanas correspondientes a cada una de las partes de la práctica, en las cuales el usuario tendrá control sobre el tipo de señal a manipular y el filtro a usar (ver Figura 12 y 13).

Figura 12. Panel frontal del filtrado de señales.



Fuente: Autor.

Figura 13. Panel frontal de superposición y promediado de señales.



Fuente: Autor.

3.5.3 Práctica 3: Introducción a la Transformada de Wavelet para la descomposición de señales: La Transformada de Wavelet es usada para descomponer una señal con ruido y de esta forma poder obtener un aproximado de la señal original que se quiere observar. Esto en la práctica se ilustra a través de dos ejemplos en los cuales el usuario tendrá la oportunidad de manipular el ruido o el tipo de señal y observar como a través de la Transformada de Wavelet se intenta recomponer la señal de una manera más limpia y fácil de analizar.

A continuación se muestra el panel de indicaciones en la Figura 14.

Figura 14. Práctica 3: Indicaciones y teoría.

TEORÍA | WAVELET SIMULACIÓN 1 | WAVELET SIMULACIÓN 2

LABORATORIO VIRTUAL DE VIBRACIONES MECÁNICAS
PRÁCTICA 3: INTRODUCCIÓN A LA TRANSFORMADA DE WAVELET

INTRODUCCIÓN | **TEORÍA**

La transformada de Wavelet (ondículas) es una herramienta matemática que promete no solo tener múltiples aplicaciones en el procesamiento de señales sino que además está siendo usada en Control de Procesos y detección de anomalías sintomáticas en medicina e ingeniería. Por lo que a vibraciones mecánicas se refiere se usara como elemento discriminador para separar el ruido anormal de nuestra señal simulada.

La teoría de ondículas está relacionada con campos muy variados. Todas las transformaciones de ondículas pueden ser consideradas formas de representación en tiempo-frecuencia y, por tanto, están relacionadas con el análisis armónico. Las transformadas de ondículas son un caso particular de filtro de respuesta finita al impulso. Las ondículas, continuas o discretas, responden al principio de incertidumbre de Hilbert (conocido por los físicos como principio de incertidumbre de Heisenberg), el cual establece que el producto de las dispersiones obtenidas en el espacio directo y en el de las frecuencias no puede ser más pequeño que una cierta constante geométrica.

Bibliografía: <http://www.exa.unicen.edu.ar/escuelapav/cursos/wavelets/apunte.pdf>
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/osorio_s_a/capitulo2.pdf

VIBVIEW

Ayuda

Regresar al menú

Salir de VIBVIEW

Fuente: Autor.

Las prácticas se presentan siguiendo el mismo formato, donde se pueden ver dos simulaciones con el botón de ingreso a cada una, Figura 15 y 16.

Figura 15. Simulación 1 de la Transformada de Wavelet.

TEORÍA | **WAVELET SIMULACIÓN 1** | WAVELET SIMULACIÓN 2

Botones de accionamiento

Play STOP

INSTRUCCIONES E INFORMACIÓN GENERAL

Información general: muestra la aplicación de las Transformadas Wavelet en la reducción de ruido.

Instrucciones

1. Ejecutar dando Play.
2. Comparar la señal con ruido y la señal sin ruido.
3. Haga clic en Stop para detener el VI.

Nivel de ruido (Amplitud)

0 0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5 1.75 2 2.25 2.5 2.75 3 3.25 3.5 3.75 4 4.25 4.5 4.75 5

Gráfica de la señal

Amplitud

Time

Transformada de Wavelet

Amplitud

Time

VIBVIEW

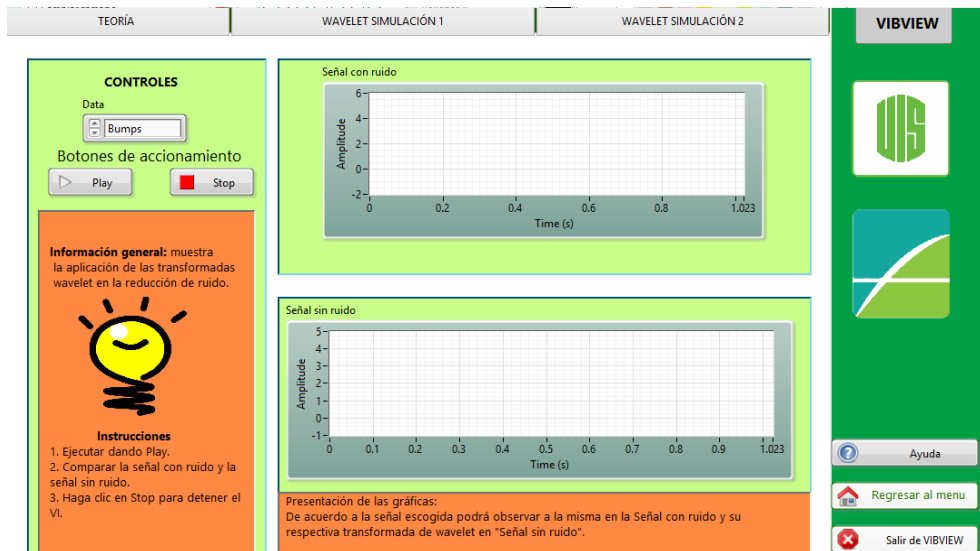
Ayuda

Regresar al menú

Salir de VIBVIEW

Fuente: Autor

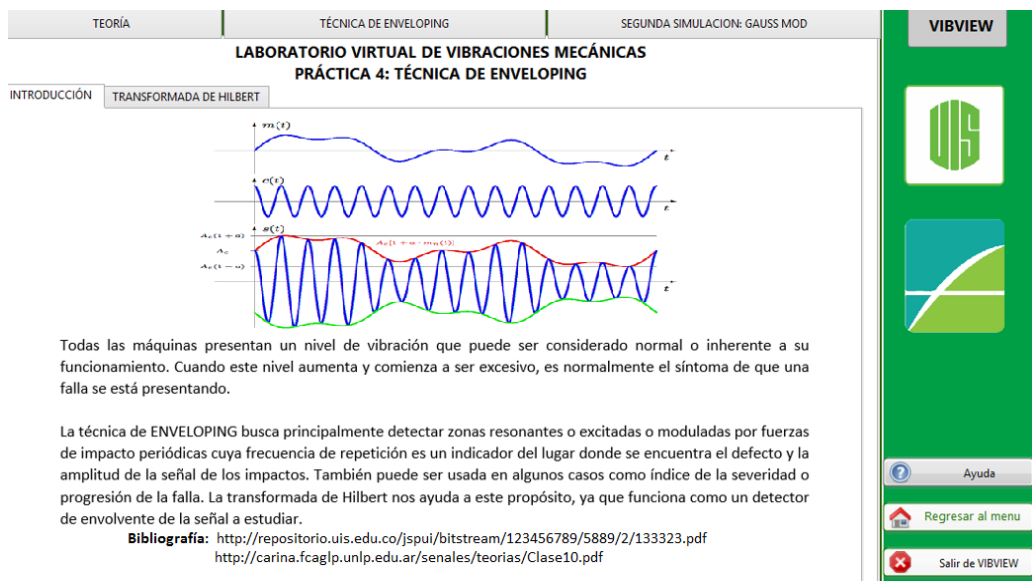
Figura 16. Simulación 2 de la Transformada de Wavelet.



Fuente: Autor

3.5.4 Práctica 4: Técnica de Enveloping: Este ensayo permite estudiar la Técnica de Enveloping, algunos de sus conceptos teóricos y métodos de aplicación en el estudio de fallas en la industria mostrando ejemplos y simulaciones. En la Figura 17 se muestra el panel de conceptos teóricos y métodos de aplicación, así como las respectivas indicaciones para la manipulación de las simulaciones.

Figura 17. Práctica 4: Indicaciones y teoría.



Fuente: Autor

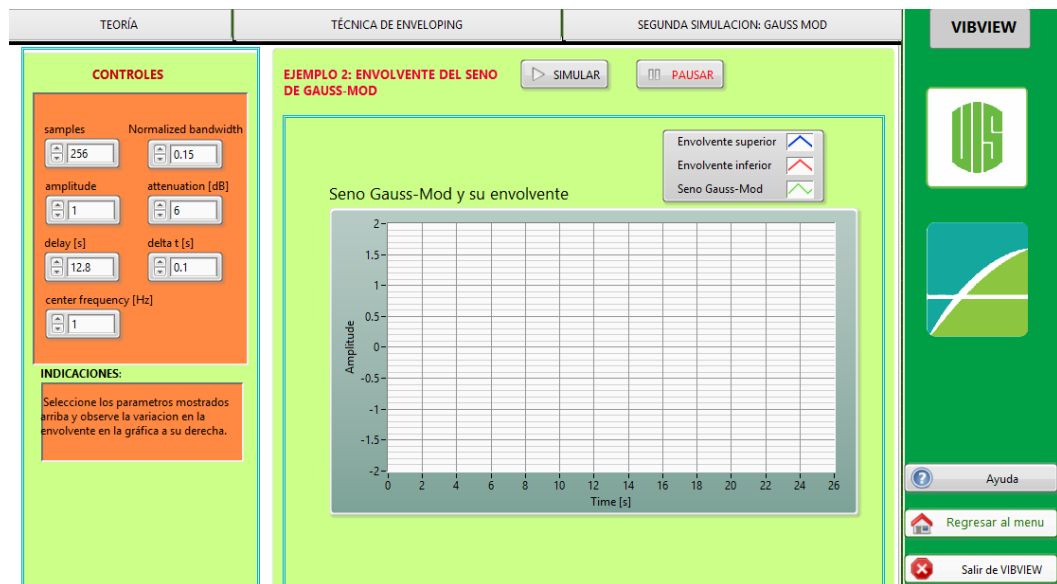
Después de esto se puede ingresar a las distintas simulaciones, las cuales cuentan con algunos links de interés donde se pueden apreciar conceptos utilizados (ver Figura 18 y 19).

Figura 18. Simulación 1 de la Técnica de Enveloping.



Fuente: Autor

Figura 19. Simulación 2 de la Técnica de Enveloping.

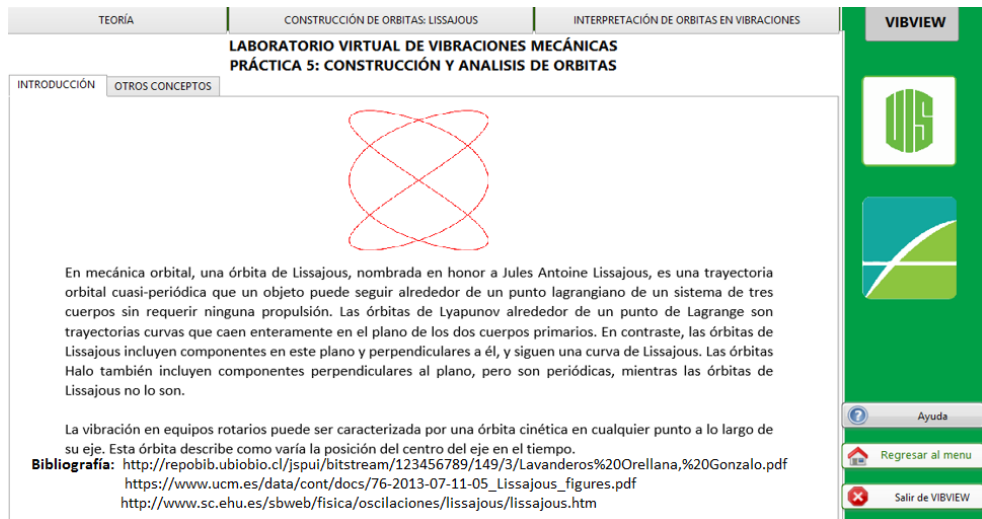


Fuente: Autor

3.5.5 Práctica 5: Construcción y análisis de órbitas: En este caso se estudian cierto tipo de órbitas denominadas curvas de Lissajous, las cuales son originadas por la superposición de dos oscilaciones armónicas perpendiculares

(en X y en Y). Estas pueden ser analizadas y asociadas a los comportamientos de desbalanceo de elementos, cabeceo de ejes o desalineamiento, con el fin de mostrar visualmente al estudiante cómo se asocia de forma básica las órbitas con el estudio de fallas del sistema rotativo. La Figura 20 muestra la ventana principal correspondiente a la teoría e indicaciones.

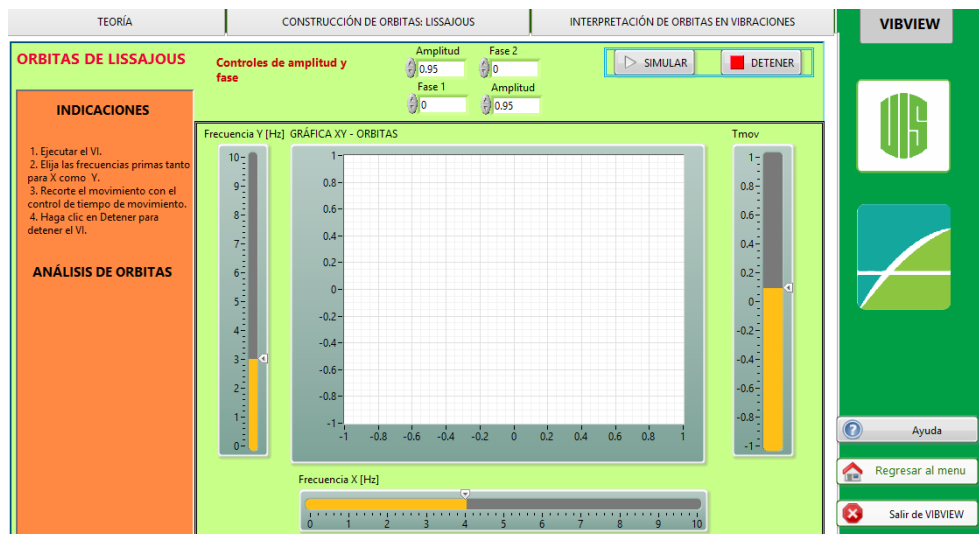
Figura 20. Práctica 5: Indicaciones y teoría.



Fuente: Autor

A partir de la pantalla inicial mostrada en la Figura 20 se puede entrar a la simulación de órbitas en la cual se manipulan la velocidad de simulación y las frecuencias de las ondas para así producir la órbita de Lissajous (Ver Figura 21).

Figura 21. Simulación de las curvas de Lissajous.



Fuente: Autor

3.5.6 Práctica 6: Desbalanceo de elementos rotativos: Dentro del ensayo 6 el objetivo principal es mostrar los conceptos usados en el análisis de desbalanceo de elementos rotativos, así como las consecuencias de este tipo de falla y su método de análisis. Las Figuras 22 y 23 muestran la teoría y simulaciones realizadas en esta sección.

Figura 22. Práctica 6. Desbalanceo de elementos rotativos.

TEORÍA E INDICACIONES DESBALANCEO DE UN ROTOR EN UN PLANO

VIBVIEW

LABORATORIO VIRTUAL DE VIBRACIONES MECÁNICAS
PRÁCTICA 6: DESBALANCEO DE ELEMENTOS ROTATIVOS

INTRODUCCIÓN DESBALANCEO EN UN PLANO

El desequilibrio constituye la principal causa de avería de tipo mecánico en máquinas rotativas. Este fenómeno es debido a la distribución no uniforme de masas sometidas a rotación. La fase es un parámetro íntimamente relacionado con la vibración, ya que aparece en la realización de los equilibrados, la detección de resonancias y en el diagnóstico de averías. Definiremos el concepto de fase de dos formas diferentes para una mejor comprensión:

Es el tiempo de adelanto o retraso que tiene una onda vibratoria respecto a otra de igual período o con respecto a una marca de referencia. La frecuencia de ambas ondas vibratorias y de la marca de referencia han de ser iguales.

Físicamente, la fase es el movimiento relativo que tiene un punto de la máquina con respecto a otro. La aplicación práctica de las lecturas de fase en el diagnóstico de averías está en la diferenciación de problemas mecánicos que se manifiestan espectralmente de la misma forma, como son: el desequilibrio, la excentricidad, el eje deformado, la desalineación, las holguras, la falta de rigidez en la bancada y la resonancia armónica.

Bibliografía: <http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/desequilibrio/desequilibrio.html>
<http://www.metas.com.mx/guiametas/la-guia-metas-09-03-desbalanceo-mecanico.pdf>

Ayuda
Regresar al menu
Salir de VIBVIEW

Fuente: Autor

Figura 23. Simulación de desbalanceo de un rotor.

TEORÍA E INDICACIONES DESBALANCEO DE UN ROTOR EN UN PLANO

VIBVIEW

PRÁCTICA 6: DESBALANCEO DE ELEMENTOS ROTATIVOS

INDICACIONES
A continuación se presentan los controles, seleccione una velocidad de rotor y un radio para poner la masa y de en el boton simular.
El programa abrirá una grafica con la orbita que se genera.
RADIO DEL ROTOR: 2 [F]

GENERAR GRAFICA

DESBALANCEO

Masa en gramos

Radio

Ayuda
Regresar al menu
Salir de VIBVIEW

Fuente: Autor.

3.5.7 Práctica 7: Desalineamiento de elementos rotativos: En el desarrollo de esta actividad se permite desalinear dos ejes y las RPM a la que ambos giran (Ambos giran a las mismas RPM) de forma que el usuario pueda a

partir de estos parámetros graficar y observar los picos que se producen y la variación de los mismos. También ofrece información sobre los métodos más utilizados a la hora de solucionar desalineamientos dentro de la industria y páginas web de videos en la plataforma YouTube para apreciar el uso en la práctica de dichos métodos. En las Figuras 24 y 25 se puede apreciar la presentación de la práctica y la presentación de la simulación.

Figura 24. Práctica 7: Presentación.

TEORÍA | DESALINEAMIENTO PARALELO (SIMULACIÓN)

LABORATORIO VIRTUAL DE VIBRACIONES MECANICAS
PRÁCTICA 7: DESALINEAMIENTO DE ELEMENTOS ROTATIVOS

INTRODUCCIÓN | DESALINEAMIENTO | DESALINEAMIENTO ANGULAR | DESALINEACIÓN EN OFFSET O PARALELA | RODAMIENTOS | METODO DE CORRECCIÓN

La desalineación es uno de los problemas más frecuentes de vibraciones en máquinas rotativas y se debe a la dificultad que presenta la alineación de dos rotores con sus respectivos apoyos. La desalineación puede tener su origen en causas muy diversas como: excesiva confianza en la utilización de acoplamientos elásticos y rodamientos autoalineables, distorsiones en la máquina durante su operación que producen desplazamientos del sistema conductor o conducido, etc. La desalineación producirá unos niveles de vibración muy elevados en las proximidades del acoplamiento que pueden llegar a precipitar la degradación de los rodamientos, el desgaste de los tacos del acoplamiento, la rotura de pernos, el sobrecalentamiento excesivo del sistema conductor por un aumento del consumo eléctrico, etc., por lo que es conveniente corregirla antes de que produzca daños más considerables que pueden llegar a producir paros en la máquina.

Bibliografía: http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/bajas_frecuencias/desalineacion.html
<https://es.scribd.com/doc/153054254/Desalineamiento-de-Ejes-en-Maquinas-Acopladas>

VIBVIEW

Ayuda

Regresar al menú

Salir de VIBVIEW

Fuente: Autor.

Figura 25: a) Visualización de la simulación.

TEORÍA | DESALINEAMIENTO PARALELO (SIMULACIÓN)

DESALINEAMIENTO PARALELO

Límites aceptables de Vibración

Tolerancias de Desalineamiento Paralelo:

Alignment condition	Rotation speed	Tolerances	
		mills	mm.
Parallel offset between stationary and moveable machine	0-1000	5,0	0,13
	1-2000	4,0	0,10
	2-3000	3,0	0,07
	3-4000	2,0	0,05
	4-6000	1,5	0,03

SIMULACIÓN DE DESALINEAMIENTO PARALELO

VIBVIEW

Ayuda

Regresar al menú

Salir de VIBVIEW

Fuente: Autor.

Figura 25 b) Simulación

PRÁCTICA 7: DESALINEAMIENTO DE ELEMENTOS ROTATIVOS

RPM: 1000

Desalineamiento: 100 1x10⁻⁹ [m]

CUADRO DE INDICACIONES
 A la izquierda varie las RPM a las que giran los rotores y el desalineamiento entre ambos ejes de rotación.
 Luego de click en ejecutar y observe la grafica.

EJECUTAR

DIAGRAMA DE LA PRÁCTICA 7

0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1

0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1

Fuente: Autor.

3.5.8 Práctica 8: Fallos en rodamientos: El ejercicio 8 corresponde a las fallas en rodamientos permite al estudiante aprender conceptos que intervienen en el análisis de rodamientos dentro del mantenimiento predictivo.

Dentro de este, el estudiante se encuentra con la introducción y marco teórico de la misma la cual se ilustra en la Figura 26, seguidamente de la pestaña de detección en rodamientos la cual se puede apreciar en la Figura 27.

Figura 26. Práctica 8: Fallas en rodamientos.

TEORÍA DETECCIÓN EN RODAMIENTOS SITIOS DE INTERÉS

LABORATORIO VIRTUAL DE VIBRACIONES MECÁNICAS
PRÁCTICA 8: FALLAS EN RODAMIENTOS

INTRODUCCIÓN FRECUENCIAS DE DETERIORO EN RODAMIENTOS FÓRMULAS

Los rodamientos son elementos mecánicos presentes en la mayoría de las máquinas rotativas. Su vida útil depende de una serie de factores: la carga, la velocidad de trabajo, la lubricación, el montaje, la temperatura, las fuerzas exteriores causadas por desalineaciones, desequilibrios, etc., de ahí que sea prácticamente imposible determinar su duración por métodos analíticos. La importancia y criticidad de estos elementos hace necesaria la utilización de técnicas modernas de mantenimiento predictivo (basadas en el análisis de vibraciones) que contribuyan a un mejor reconocimiento de su estado y, por lo tanto, de la disponibilidad de las máquinas rotativas en las que están instalados.

Bibliografía: http://www.vibratec.net/pages/tecnico_rodamientos.html
<http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/rodamientos/rodamientos.html>

VIBVIEW

Ayuda

Regresar al menú

Salir de VIBVIEW

Fuente: Autor.

Figura 27. Simulación de fallas en rodamientos.

TEORÍA DETECCIÓN EN RODAMIENTOS SITIOS DE INTERÉS

PRÁCTICA 8: FALLAS EN RODAMIENTOS

CONTROLES PARA LA GENERACION DE GRAFICOS SITIOS DE INTERÉS

SELECCIONE EL TIPO DE FALLA A OBSERVAR

ANÁLISIS DEL ANILLO INTERNO DEL RODAMIENTO (BPFI)

ANÁLISIS DEL ANILLO EXTERNO DEL RODAMIENTO (BPFO)

Velocidad del rodamiento [RPM]

Ayuda

Regresar al menú

Salir de VIBVIEW

Fuente: Autor.

3.5.9 Práctica 9: Fallas en dientes de engranaje: El ejercicio propuesto en la praxis 9 permite al estudiante repasar conceptos teóricos aprendidos en clase sobre las causas y métodos de análisis de fallas en rodamientos. En primera instancia la práctica muestra la introducción y teoría acerca de las frecuencias principales que se encuentran en engranajes (Ver Figura 28).

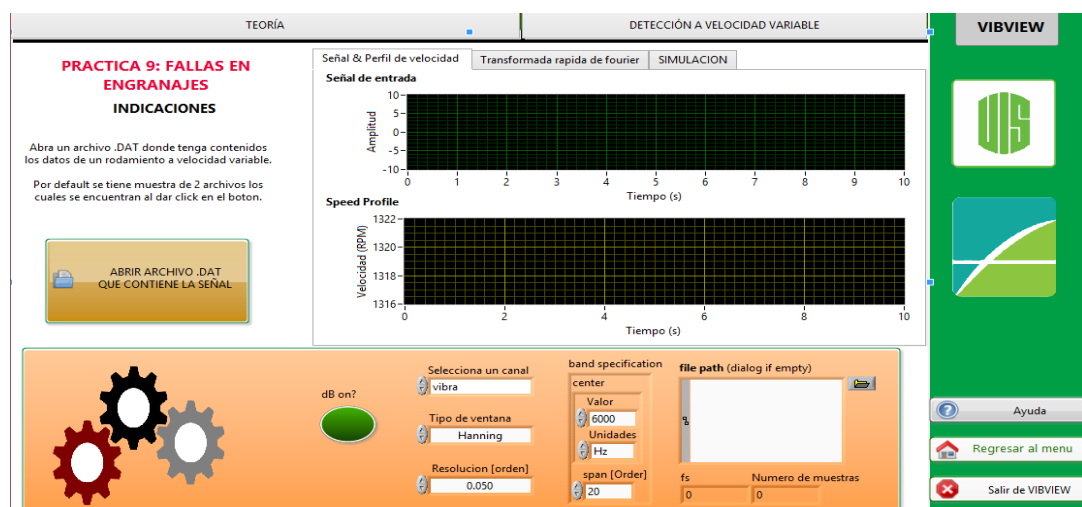
La pestaña de detección a velocidad variable (Ver Figura 29) presenta una simulación en la cual se puede seleccionar el archivo con datos de un juego de engranajes, al seleccionarse el archivo el programa grafica los datos y la transformada para su respectivo análisis.

Figura 28. Práctica 9 Fallas en dientes de engranajes.



Fuente: Autor.

Figura 29. Simulación de fallas en dientes de engranajes.



Fuente: Autor.

3.5.10 Práctica 10: Balanceo estático de elementos: La práctica 10 utiliza el desbalanceo generado de la práctica 6 y adiciona a él los cálculos respectivos para generar el balanceo en base a la adición de una segunda masa puesta con el mismo radio y sentido opuesto. Aquí el estudiante podrá variar el radio para analizar de qué forma se va balanceando el rotor hasta que la órbita generada sea un círculo, lo cual indica que el rotor se encuentra balanceado.

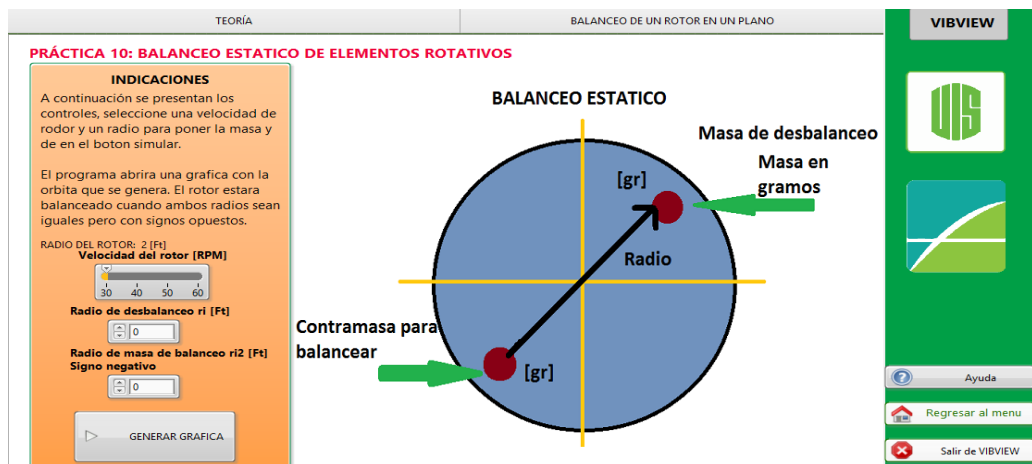
La Figura 30 muestra la presentación de la práctica donde se puede observar la introducción y teoría de la misma y a continuación en la Figura 31 se muestra el panel de simulación de balanceo.

Figura 30. Práctica 10 Balanceo estático de elementos.



Fuente: Autor

Figura 31. Simulación de balanceo estático en un rotor.



Fuente: Autor.

3.5.11 Práctica 11: Prueba y análisis de amortiguamiento por fricción

seca: La prueba 11 de amortiguamiento por fricción seca presenta conceptos teóricos (Ver Figura 32) de manera que el estudiante pueda repasar lo aprendido en el aula de clase. Adicionalmente nos muestra una simulación de amortiguamiento donde se podrán variar ciertos parámetros y analizar las gráficas generadas, esto se puede ver en la Figura 33.

Figura 32. Práctica 11 Prueba y análisis de amortiguamiento por fricción seca.

TEORÍA AMORTIGUAMIENTO POR FRICCIÓN SECA

LABORATORIO VIRTUAL DE VIBRACIONES MECÁNICAS
PRÁCTICA 11: AMORTIGUAMIENTO POR FRICCIÓN SECA

INTRODUCCIÓN **FRICCIÓN SECA** TEORÍA DE COULOMB

Y(t)

Amortiguación o amortiguamiento se define como la capacidad de un sistema o cuerpo para disipar energía cinética en otro tipo de energía. Típicamente los amortiguadores disipan la energía cinética en energía térmica y/o en energía plástica (e.g. atenuador de impactos), es decir, la función de un amortiguador es recibir, absorber y mitigar una fuerza tal, ya sea porque se ha dispersado o porque la energía se ha transformado de forma que la fuerza inicial se haya hecho menor. Cuanto mejor sea la amortiguación de la fuerza inicial, menor será la fuerza recibida sobre el punto final.

El amortiguamiento es un parámetro fundamental en el campo de las vibraciones, también en el desarrollo de modelos matemáticos que permiten el estudio y análisis de sistemas vibratorios, como lo son: estructuras metálicas, motores, maquinaria rotativa, turbinas, automóviles, etc. Esto va encaminado a la teoría de que todo sistema vibratorio (regularmente sistemas mecánicos) tiene la capacidad de disipar energía. Para el control de vibraciones e impactos en maquinaria se utiliza el concepto de amortiguamiento como una técnica para disipar energía del sistema, manipulando así la amplitud de vibración en el sistema y otros parámetros de estudio. También, amortiguación es la disipación de energía en una estructura mecánica y su conversión en calor. Hay varios mecanismos de amortiguación, los más importantes son la amortiguación Coulomb y la amortiguación viscosa.

Bibliografía: ingenierias.uanl.mx/64/documentos/64_estudio.pdf

VIBVIEW

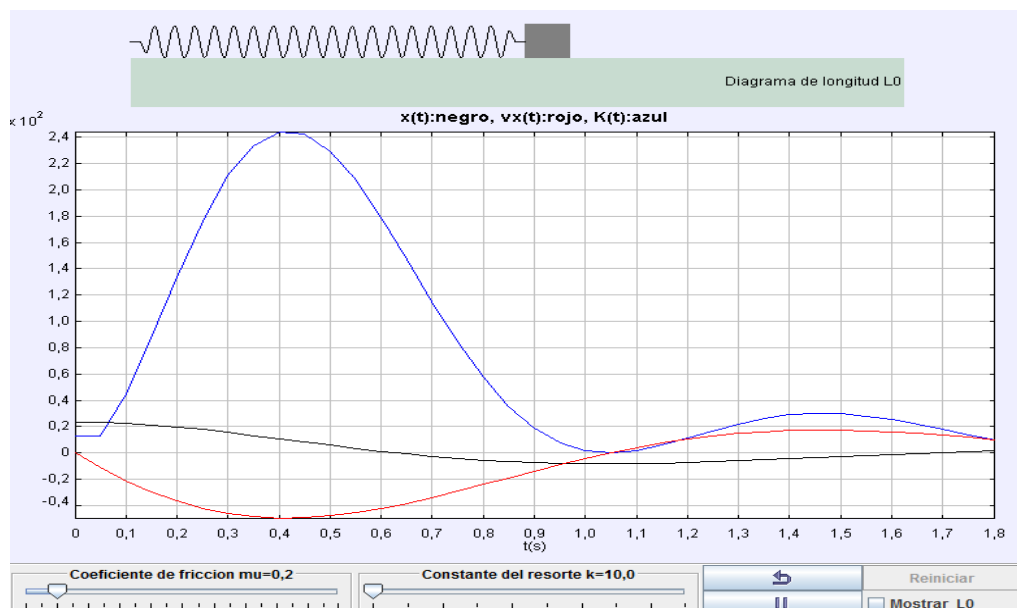
Ayuda

Regresar al menú

Salir de VIBVIEW

Fuente: Autor.

Figura 33. Simulación de amortiguamiento por fricción seca.

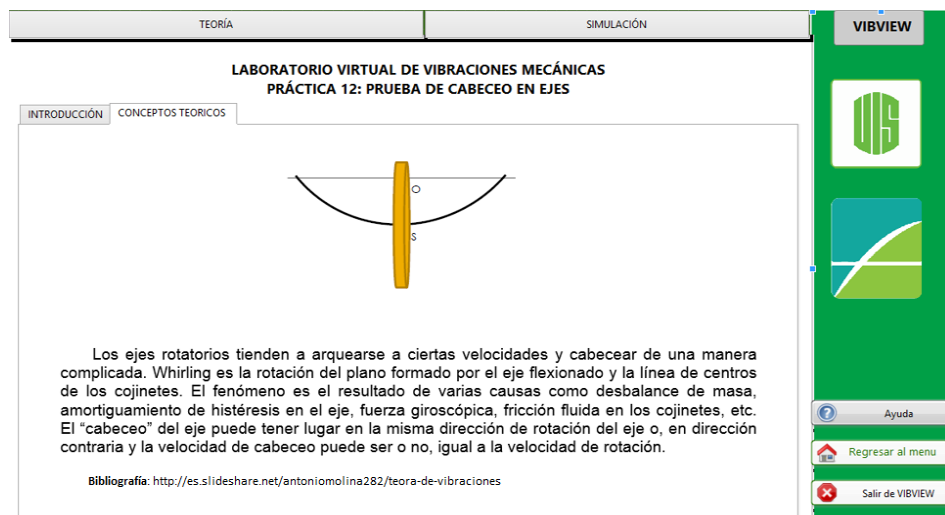


Fuente: Autor.

3.5.12 Práctica 12: Prueba de cabeceo en ejes (whirling shaft test): El ensayo 12 finalmente se proporciona al estudiante teoría acerca de lo que es el whirling en los ejes, las causas y situaciones por las cuales se presenta este fenómeno y las consecuencias que puede llegar a tener.

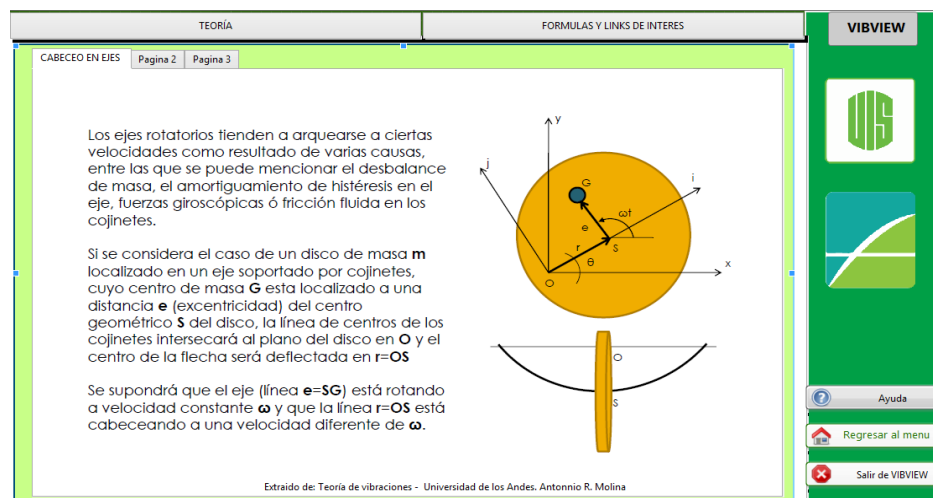
La Figura 34 muestra la pantalla de presentación en la cual encontramos una breve introducción y un apartado dedicado a recordar algunos conceptos teóricos preliminares. En la pestaña de fórmulas (Ver Figura 35) encontramos información relacionada con esta práctica.

Figura 34. Práctica 12: Prueba de cabeceo en ejes.



Fuente: Autor.

Figura 35. Segunda ventana de la práctica 12.





Fuente: Autor.

3.6 FORMATO DE INFORME

En cada una de las prácticas a efectuarse en el laboratorio virtual de vibraciones mecánicas de la UIS; el estudiante después de estudiada la práctica, realizará un informe de conceptos aprendidos y análisis de lo estudiado, el cual se registrará a partir de un formato elaborado como lo muestra la Figura 36.

Figura 36. Presentación del formato de informe.

 LABORATORIO VIRTUAL DE VIBRACIONES MECÁNICAS UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Practica 1. Transformada rápida de Fourier (FFT)		Pagina 1
Director: Heller Guillermo Sanchez	Auxiliar:	Fecha:
Estudiante:	Código:	
OBJETIVOS DE LA PRACTICA		
FUNDAMENTO TEORICO		
TEMAS DE CONSULTA		
PROCEDIMIENTO		
BIBLIOGRAFÍA		

Fuente: Autor.

A continuación, se definen cada una de las partes mostradas en el formato de informe:

- **Encabezado:** En esta sección se recogen los datos correspondientes para identificar la práctica, entre los cuales están:
 - Número y nombre de la práctica
 - Director de la materia
 - Estudiante
 - Auxiliar
 - Código
- **Objetivos de la práctica:** Aquí se deben plantear objetivos a alcanzar con la realización de la práctica.
- **Fundamento teórico:** Se debe hacer un resumen de la teoría consultada.
- **Procedimiento:** Aquí se enumera y explica de forma detallada cada uno de los pasos seguidos en el laboratorio y la muestra de pantallazos en la manipulación de las simulaciones.
- **Conclusiones:** Se deberán redactar las conclusiones obtenidas por el estudiante a partir de los análisis hechos.
- **Bibliografía:** Deben citarse tanto los documentos que han sido autorizados para la profundización de los temas de la práctica como también los propuestos a partir de la investigación propia del estudiante.

4. MANUAL DE USUARIO

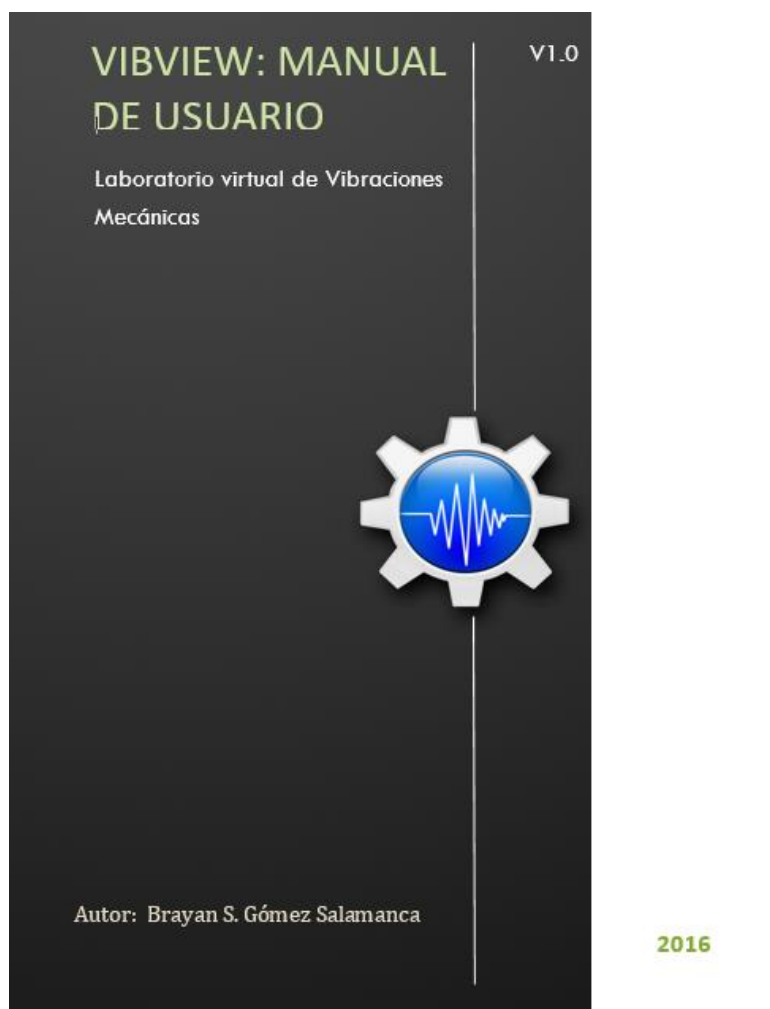
El manual de usuario permite a los estudiantes entender el proceso de instalación y uso del software en sus equipos personales, para que de esta forma puedan trabajar en la comodidad de su espacio personal.

A continuación, se muestra el formato del manual de usuario entregado al profesor, el cual se encuentra en el Anexo A y que también será distribuido junto con los archivos necesarios para usar la aplicación por parte de los estudiantes.

4.1 PORTADA Y TABLA DE CONTENIDO

La portada del manual se muestra a continuación en la Figura 37.


Figura 37. Portada del manual de usuario.



Fuente: Autor.

La tabla de contenido tiene un diseño que intenta mezclar colores emblemáticos de la universidad en tonos claros y se acompaña de un pie de página y encabezado que proporciona siempre el título del manual y año de la publicación. En el pie de página se proporciona la numeración del documento y el autor del manual y proyecto. Ver Figura 38.


Figura 38. Tabla de contenido del Manual de Usuario.

VIBVIEW: MANUAL DE USUARIO 

VIBVIEW: MANUAL DE USUARIO

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. INSTALACIÓN DEL LABORATORIO VIRTUAL.....	3
3. INGRESO AL LABORATORIO VIRTUAL.....	
4. INDICACIONES DE USO DE CADA PRÁCTICA.....	
5. DESINSTALACIÓN DEL LABORATORIO VIRTUAL.....	
6. INGRESO AL LABORATORIO VIRTUAL.....	3

Autor: Brayan S. Gómez  2
Salamanca

Fuente: Autor.

4.2 CONTENIDO DEL MANUAL

En la Tabla 3 se muestra el contenido estructurado y lo que cada título comprende.

Tabla 3. Contenido del Manual de usuario.

CONTENIDO DEL MANUAL DE USUARIO	RESUMEN DEL CONTENIDO
1. INTRODUCCIÓN	Es el espacio donde se da una breve explicación sobre lo que VIBVIEW es y quiere ser como herramienta para los estudiantes de Vibraciones Mecánicas.
2. INSTALACIÓN DEL LABORATORIO VIRTUAL	Espacio destinado a la explicación de los recursos necesarios para correr VIBVIEW así como su instalación de principio a fin para garantizar un buen funcionamiento del Software.
3. INGRESO AL LABORATORIO VIRTUAL	Explicación pasó a paso sobre el ingreso al laboratorio y recomendaciones, así como también el ingreso a los distintos módulos y prácticas dentro del Software.
4. INDICACIONES DE USO DE CADA PRACTICA	Explicación detallada sobre los paneles dentro de las prácticas y el uso de los controles que allí se presentan para manipulación del estudiante.
5. DESINSTALACIÓN DEL LABORATORIO VIRTUAL	En este apartado se da conocimiento sobre los pasos a seguir para la correcta y completa desinstalación de VIBVIEW, incluyendo los archivos residuales que deben ser eliminados.
6. PREGUNTAS FRECUENTES	Este es un apartado destinado a dar respuestas a preguntas frecuentes que se pueden presentar, así como información de contacto del autor del proyecto.

Fuente: Autor.

5. CONCLUSIONES

- Un laboratorio virtual puede ser implementado en casi cualquier área de la educación como un complemento óptimo para la enseñanza de temáticas puntuales. VIBVIEW entonces, es un primer paso hacia la realización de un entorno virtual de enseñanza sobre vibraciones mecánicas para el estudiante, a través del cual y de manera amigable logra refrescar conceptos aprendidos durante la clase.
- El desarrollo tecnológico pertenece a un ciclo continuo y es por esto que la persona que vaya a implementar un sistema, debe buscar en lo posible, herramientas que le brinden mayor facilidad para la realización de sus objetivos.
- A pesar de que un laboratorio virtual pueda no reemplazar a uno físico en todas sus facultades, este es una herramienta importante para la enseñanza de conceptos y la familiarización del estudiante con lo que encontrará en la práctica real. De manera que un laboratorio virtual es un refuerzo o un apoyo importante en la enseñanza.
- Labview es una herramienta con muchas facilidades de uso y un entorno bastante amigable para el programador, basándose en paneles y paletas de funciones las cuales permiten ir armando poco a poco lo que necesitamos, así como su buena vinculación con otros programas de cálculo y programación como por ejemplo Matlab.

6. RECOMENDACIONES

- Se pueden realizar otras prácticas adicionales en las que se amplíen las practicas con explicaciones de los modelos matemáticos de forma más específica, así como la realización de otras simulaciones como lo son las vibraciones relacionadas con las películas de aceite en acoples o rodamientos, etc.
- Dentro de las actualizaciones recomendadas a este laboratorio también se puede contar con la adaptación del mismo a una página web, para lo cual Labview cuenta con muchas facilidades siendo el único punto en contra que estas mismas solo se podrían visualizar perfectamente a través de Internet Explorer. Sin embargo, esta actualización daría mayor facilidad a los estudiantes para que ingresen a los módulos a través de cualquier computador con una conexión a internet y trabajar las prácticas.

BIBLIOGRAFÍA

BARCHIESI, Juan. *Introducción al Procesamiento Digital de Señales*. Valparaíso, Chile. (2008). Ediciones Universitarias Valparaíso. Universidad de Valparaíso.

CAPITO, María. *IMPLEMENTACION DE UN LABORATORIO VIRTUAL BASICO DE COMUNICACIONES POR FIBRA OPTICA UTILIZANDO LABVIEW*. [Trabajo de grado]. Quito, Ecuador. (2003). ESCUELA POLITECNICA NACIONAL.

Ejs Wiki. [En línea]. [Consultado el 5 de Marzo de 2016] Disponible en internet: <URL:<http://www.um.es/fem/EjsWiki/Main/Matlab>>

ENERGIZA. [En línea]. [Consultado el 14 de Junio de 2015]. Disponible en internet: <URL:<http://www.energiza.org/mantenimiento-de-plantas/19-mantenimiento-de-plantas/516-analisis-de-vibraciones-una-tecnologia-clave-del-mantenimiento-predictivo>>

FISICA CON ORDENADOR. [En línea]. [Consultado el 12 de Julio de 2015]. Disponible en internet: <URL:<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/oscilaciones/lissajous/lissajous.htm>>

GARCIA, Alfonso. *Análisis de vibraciones*. Bucaramanga. (1995). Ediciones UIS. Universidad Industrial de Santander.

GATTI, P. L., & Ferrari, V. *Applied Structural and Mechanical Vibration*. (2003). Taylor and Francis Group.

GÓMEZ, Víctor. [En línea]. [Consultado el 12 de Noviembre de 2015]. *Clasificador neuronal de fallos en rodamientos utilizando entradas basadas en transformadas de Wavelet packet y de Fourier*. Disponible en

internet:

<URL:<http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/ingenieria/article/viewFile/16316/14140>>

GREENE, Chad. [En línea]. [Consultado el 25 de Marzo de 2016] Disponible en internet:

<URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/53534-filter1>>

HARRIS, C. M., & PIERSOL, A. G. *HARRIS SHOCK AND VIBRATION HANDBOOK*. New York. (2002). (Fifth ed.). McGRAW HILL.

HSU, Hwei. *Análisis de Fourier*. (1987). Wilmington: Addison - Wesley Iberoamericana.

HWUANG, Fu-Kwun. [En línea]. [Consultado el 11 de Febrero de 2016].

Disponible en internet:
<URL:<http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/index.php?board=14.0>>

INSTRUMENTS, N. [En línea]. [Consultado el 2 de Febrero de 2016]. *Advanced*

Signal Processing Toolkit Help. Disponible en internet:
<URL:[http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372656B-01/\[3\]](http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372656B-01/[3])>

INTRODUCTION TO WAVELET SIGNAL PROCESSING. [En línea]. [Consultado

el 12 de Noviembre de 2015]. Disponible en internet:
<URL:http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372656B-01/lvasptconcepts/wa_intro/>

LEON, Juan. *Vibraciones Mecánicas*. Ciudad de México. (1985). EDICIONES LIMUSA.

MATHWORKS. [En línea]. [Consultado el 5 de Diciembre de 2015].

Disponible en internet:

<URL:<http://www.mathworks.com/examples/matlab/mw/matlab-ex23709184-line-plots>>

METAS. [En línea]. [Consultado el 6 de Diciembre de 2015]. Disponible en internet: Practica 6: <URL: <http://www.metas.com.mx/guiametas/la-guia-metas-09-03-desbalanceo-mecanico.pdf>>

MOLINA, Antonio. [En línea]. [Consultado el 22 de Diciembre de 2015]. *Teoría de vibraciones*. Disponible en internet: <URL:<http://es.slideshare.net/antoniomolina282/teora-de-vibraciones>>

MOLINA, Fredy & BENÍTEZ , Diego. [En línea]. [Consultado el 21 de Noviembre de 2015]. DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN ALGORITMO PARA LA CARACTERIZACION DE LIMITES DE FORMA DE ONDA DE UN ELECTROCARDIOGRAMA (ECG) UTILIZANDO ONDILLAS (WAVELETS) *Escuela Politecnica Nacional*. Disponible en internet: <URL:<http://ciecfie.epn.edu.ec/wss/VirtualDirectories/80/JIEE/historial/XIJIEE/14Wavelets.pdf>>

NATIONAL INSTRUMENTS. [En línea]. [Consultado el 18 de Octubre de 2015]. Disponible en internet: <URL:<http://www.ni.com/white-paper/4844/en/>>

NATIONAL INSTRUMENTS. [En línea]. [Consultado el 15 de enero de 2016]. Disponible en internet: <URL:<http://search.ni.com/nisearch/app/main/p/bot/no/ap/tech/lang/es/pg/1/sn/catnav:du/q/Labview/>>

NATIONAL INSTRUMENTS. [En línea]. [Consultado el 12 de Febrero de 2016]. Disponible en internet: <URL:http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361H-01/lvanlsconcepts/hilbert_transform_analytic/>

PAIN, H. J. *THE PHYSICS OF VIBRATIONS AND WAVES* (Sixth Edition ed.). London. (2005). John Wiley and Sons, Ltd.

PALOMINO, Evelio. *Medicion y análisis de vibraciones en el diagnostico de máquinas rotativas*. Cuba. (1997).

PEER, Roni. [En línea]. [Consultado el 18 de Febrero de 2016]. *Using MATLAB for Bearing Fault Analysis*. Disponible en internet: <URL:<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34385-using-matlab-for-bearing-fault-analysis>>

REID, Thomas. [En línea]. [Consultado el 11 de Febrero de 2016]. Disponible en internet: <URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27243-virtual-signal-generator>>

S. GRAHAM, K. *THEORY AND PROBLEMS OF MECHANICAL VIBRATIONS*. New York. (1996). McGRAW HILL.

SILVA, Clarence. *Vibration: Fundamentals and practice*. Boca Raton. (2000). CRC Press.

SINAIS INGENIERIA. [En línea]. [Consultado el 9 de Diciembre de 2015]. Disponible en internet: <URL: <http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/desequilibrio/desequilibrio.html>>

SINAIS INGENIERIA. [En línea]. [Consultado el 10 de Diciembre de 2015]. Disponible en internet: <URL: http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/bajas_frecuencias/desalineacion.html>

SINAIS INGENIERIA. [En línea]. [Consultado el 16 de Diciembre de 2015]. Disponible en internet: <URL: <http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/rodamientos/rodamientos.html>>

SINAIS INGENIERIA. [En línea]. [Consultado el 16 de Diciembre de 2015]. Disponible en internet: <URL: <http://www.sinais.es/Recursos/Curso->

vibraciones/bajas_frecuencias/bajas_frecuencias_vibraciones.html>

SINGIRESU, Rao. *Vibraciones mecánicas* (5 ed.). México. (2012). PEARSON EDUCACIÓN.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. [En línea]. [Consultado el 20 de Diciembre de 2015]. *Leccion 10: Balanceo de mecanismos y máquinas*. Disponible en internet: <URL:http://blog.utp.edu.co/adriamec/files/2012/02/Balanceo_2011.pdf>

VAZQUEZ, Carlos. [En línea]. [Consultado el 16 de Octubre de 2015]. *Central Sindical Independiente y de Funcionarios*. Disponible en internet: <URL:http://www.csicsif.es/andalucia/modules/mod_ense/revista/pdf/Numero_20/CARLOS_VAZQUEZ_SALAS01.pdf>

VIBRATEC. [En línea]. [Consultado el 14 de Diciembre de 2015]. Obtenido de <URL:http://www.vibratec.net/pages/tecnico_desbalance.html>

WANG, Lei. [En línea]. [Consultado el 14 de Diciembre de 2015]. Obtenido de <URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3142-envelope1-1>>

WOLFGANG, Christian. [En línea]. [Consultado el 12 de Diciembre de 2015]. *UNIVERSIDAD DE MURCIA*. Disponible en internet: <URL:<http://www.um.es/fem/EjsWiki/uploads/Download/EjsAndSimulink.pdf>>