

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LÓPEZ MATEOS"

“Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRO EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA MECÁNICA

P R E S E N T A:

ING. ANTONIO CARLOS GÓMEZ NAVARRO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JULIO CÉSAR GÓMEZ MANCILLA

CIUDAD DE MÉXICO, 2017





Agradecimientos:

Primeramente, a Dios por darme vida y permitirme seguir mi camino, por todas las cualidades que me permite tener para realizar este y más proyectos.

A mi Madre, que me ha apoyado incondicionalmente en todo lo que he hecho y que a pesar de los tropiezos sigue confiando en mí. A mi hermana, por sus consejos y apoyo en todo momento.

Al Instituto Politécnico Nacional, por otorgarme el conocimiento científico y humano, así como la oportunidad de utilizar sus instalaciones para mi crecimiento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico que me otorgó durante mis estudios de grado.

Al Dr. Julio César Gómez Mancilla, por compartir su tiempo, conocimientos y experiencia, por la confianza que me dio, la oportunidad de ser su estudiante y la fortuna de que fuera mi asesor durante el estudio de maestría y la realización de este trabajo.

A la comisión revisora conformada por: Dr. Julio César Gómez Mancilla, Dr. Jesús Alberto Meda Campaña, Dr. Valeriy Nosov, Dr. José Ángel Lodegario Ortega Herrera, Dr. Orlando Susarrey Huerta, Dr. Didier Samayoa Ochoa, por la revisión del presente trabajo.

A mis amigos, con los que compartí grandes momentos y experiencias a lo largo de este tiempo como son Tepa, Pancho, Erick, Jelipao, Gustrago, Pedroleus entre otros, así como los compañeros y demás personas que directa o indirectamente colaboraron para realizar este trabajo.

"No vivas para que tu presencia se note, sino para que tu ausencia se sienta."

Bob Marley



Resumen

En esta tesis, se realizó un programa para monitoreo de vibraciones en un sistema rotativo, con el propósito de evaluar el comportamiento de dicho sistema con ayuda de diferentes tipos de sensores, tales como, proximetros, acelerómetros, micrófono y/o sonómetro.

El programa de monitoreo se realizó en el software LabVIEW, en el cual se visualiza el comportamiento del sistema rotativo y se llevan a cabo los diferentes post-procesos de los datos de señales obtenidos por medio de los sensores. Se eligió LabVIEW, ya que, cuenta con un paquete especializado para sonido y vibraciones, además de que permite manipular los datos obtenidos para utilizarlos en diversos post-procesos en diferentes programas, que es una de las principales ventajas que se tienen sobre el sistema ADRE de Bently Nevada DAU 208-P, que es con el que se cuenta en el Laboratorio de Vibraciones y Rotodinámica de ESIME Zacatenco en el Instituto Politécnico Nacional, el cual no permite acceso a los datos.

Se dan a conocer los diferentes tipos de sistemas de monitoreo de condición, manejo de datos y trabajos existentes que se relacionen al programa diseñado. Se definen conceptos usados en esta tesis, la importancia de las vibraciones mecánicas, los sensores y su modo de empleo, incluyendo una introducción al software utilizado, que es LabVIEW.

Se explica en detalle el funcionamiento del programa diseñado, sus ventajas y los programas secundarios utilizados para los diferentes post-procesos. Se muestra el modelo experimental, refiriéndonos al sistema Machine Fault Simulator, así como su configuración y características mecánicas con las que se realizaron las pruebas, mostrando las validaciones y el correcto funcionamiento del programa diseñado en LabVIEW, mediante la alineación y balanceo del sistema experimental, en comparación al sistema de monitoreo mencionado anteriormente ADRE.

Por último, se ofrecen diversas posibilidades de ampliar las capacidades de este programa, estas opciones van desde el aumento de tipos de filtros utilizados para las señales, así como, post-procesos mejorados de características no lineales, tal como lo es Largest Lyapunov Exponent (LLE).



Abstract

In this thesis, a program for vibration monitoring was performed in a rotating system, in order to evaluate the performance of the system using different types of sensors, such as, proximator, accelerometers, microphone and / or sound level meter.

The monitoring program was carried out in the LabVIEW software, in which one the behavior of the rotor displays and various post-processes of the signal data obtained by the sensors are carried out. LabVIEW was chosen because, has a specialized package for sound and vibration, plus it allows us to manipulate the data for use in various post-processes in different programs, which is one of the main advantages have on the system Bently Nevada Ather Daiu 208-P, which is with that account at the Laboratory of Vibrations and Rotodynamic of ESIME Zacatenco at the National Polytechnic Institute, which does not allow us access to the data.

The different types of condition monitoring systems, data management and existing works that relate to the designed program are presented. The concepts used in this thesis are defined, the importance of mechanical vibrations, sensors and how to use them, including an introduction to the software used, which is LabVIEW.

It explains in detail the operation of the designed program, its advantages and the secondary programs used for the different post-processes. We present the experimental model, referring to the Machine Fault Simulator system, as well as its configuration and mechanical characteristics, which showed the validations and the correct operation of the program designed in LabVIEW, by aligning and balancing the experimental system, In comparison to the monitoring system previously mentioned ADRE.

Finally, various possibilities to expand the capabilities of this program are offered, these options range from increasing types of filters used for signals, as well as post-processes improved of nonlinear characteristics, as is Largest Lyapunov Exponent (LLE).



Tabla de contenido

Objetivo	11
Objetivos específicos	11
Justificación	12
Índice de figuras.....	13
Índice de tablas.....	17
Nomenclatura	17
Capítulo 1 Estado del arte.....	19
1.1 Tipos de Sistemas de Monitoreo del Estado de Vibración	19
1.1.1 Sistemas Permanentemente Instalados	19
1.1.2 Sistemas Semipermanentes.....	20
1.1.3 Sistemas de Monitoreo Portátiles	20
1.2 Recolección de Datos	21
1.2.1 Recolección Continua de Datos.....	21
1.2.2 Recolección de Datos Periódica	22
1.2.3 Programas de Monitoreo de Estado	22
1.3 Monitoreo de Condición	23
1.3.1 National Instruments (NI).....	23
1.3.2 Bently Nevada	25
Capítulo 2 Marco Teórico.....	27
2.1 Vibraciones	27
2.2 Sistema Vibratorio.....	27
2.3 Importancia de las vibraciones mecánicas	27
2.4 Rotodinámica	28
2.4.1 Las vibraciones mecánicas en la rotodinámica.....	28
2.5 Ecuaciones de movimiento.....	28
2.6 Instrumentación.....	41



2.6.1 Definición y antecedentes de la instrumentación	41
2.6.2 Instrumentación electrónica e industrial.....	42
2.6.3 Definiciones usadas en la instrumentación.....	42
2.6.4 Sensores	46
2.7 Instrumentación virtual	47
2.7.1 Definición y antecedentes de la instrumentación virtual.....	47
2.7.2 Composición de un instrumento virtual.....	49
2.7.3 LabVIEW	49
Capítulo 3 Desarrollo, construcción e implementación de la instrumentación	57
3.1 Plataforma de pruebas instrumentada.....	57
3.2 Hardware	59
3.2.1 Tipos de sensores y plataformas utilizadas	60
3.3 Capacidades del software	65
3.4 Panel Frontal.....	67
3.4.1 Configuración	67
3.4.2 Análisis de amplitud vs. tiempo (Timebase).....	75
3.4.3 Análisis de los patrones de Lissajous (Órbita)	77
3.4.4 Análisis de amplitud vs. fase (Diagrama de Nyquist) Polar	80
3.4.5 Análisis de amplitud/fase vs. velocidad angular (Diagrama de Bode)	83
3.4.6 Análisis de la línea de centros del eje (Centerline)	86
3.4.7 Análisis de amplitud vs. frecuencia (Espectro).....	87
3.4.8 Análisis de amplitud vs. frecuencia vs. tiempo (Diagrama de Cascada)	90
3.4.9 Análisis de amplitud vs. frecuencia vs. tiempo (Colormap)	91
3.4.10 Señales vs Tiempo	92
3.4.11 Lyapunov.....	92
3.5 Diagrama de bloques	96



Capítulo 4 Pruebas experimentales	105
4.1 Cálculo de frecuencias naturales y modos de vibración del eje.....	105
4.2 Alineamiento del eje.....	107
4.3 Balanceo del eje.....	112
4.4 Pruebas realizadas y comparación de resultados con sistema ADRE	117
4.4.1 Condiciones de la prueba.....	117
4.4.2 Resultados del balanceo y comparación con sistema ADRE.....	117
4.4.3 Prueba de comparación entre Proxímetros, Acelerómetros y Micrófono.....	127
4.4.4 Prueba de aplicación de filtros externos y post-procesos (LLE) programados en MATLAB.....	131
Conclusiones	141
Trabajos futuros	142
Referencias.....	143
Anexos.....	149



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"



Objetivo

Desarrollar un programa de monitoreo de condición para máquinas rotativas con el software LabVIEW, el cual sea capaz de realizar diversos post-procesos a las señales adquiridas utilizando diferentes tipos de sensores.

Objetivos específicos

- Crear un programa de pruebas de análisis de vibraciones con características específicas, y con una plataforma de programación expandible y modificable.
- Adaptar procesos de otro lenguaje de programación como lo es MATLAB, al lenguaje de LabVIEW, para obtener características no lineales y de estabilidad, como es LLE.
- Definir los alcances de los diferentes tipos de sensores utilizados, ventajas y desventajas en cuanto a las condiciones ambientales y la forma de montaje.
- Validar los resultados del programa, mediante diversas pruebas de alineación y balanceo de una plataforma experimental.



Justificación

En la actualidad es necesario monitorear el comportamiento de los equipos rotativos para encontrar y prevenir fallas, ya que existen diversos factores que pueden causar inestabilidad en dichos equipos, por lo cual se requiere un programa fácilmente adaptable y con la capacidad de funcionar con diversos tipos de sensores, elegibles de acuerdo a las condiciones del equipo rotativo. Además, debe facilitar la visualización de resultados, realizar los cálculos lo más rápido y directo posible de post-procesamientos para un diagnóstico más completo del funcionamiento del equipo, para corregir las inestabilidades y reducir las vibraciones lo más acertadamente posible.

Debido a que los datos en bruto no comunican información útil inmediatamente, el procesamiento de señales a menudo se necesita para transformar la señal, eliminar perturbaciones de ruido o compensar los efectos ambientales. Aquí aparece otra de las ventajas de realizar procesamiento de señales y análisis personalizado en el entorno de desarrollo integrado del software de desarrollo de sistemas NI LabVIEW.

Esto permite conocer mejor la condición de máquinas o equipo para predecir desgaste mecánico y fallas. La vibración, el ruido y la temperatura son indicadores clave del estado de la máquina. Las tendencias en los datos pueden mostrar cómo prevenir una falla inesperada y una reparación costosa.

Este programa elaborado en LabVIEW brinda la oportunidad de monitorear maquinas rotativas con mayor precisión, mayor rapidez para ejecutar ciertos procesos, mucho menor costo (hablando de hasta 1 millón de pesos de diferencia) y además permite acceder a los datos en "bruto" y realizar diversos post-procesos con ellos, esto a diferencia del sistema ADRE de Bently Nevada, el cual además es más difícil de transportar en caso de ser necesario, sin olvidar mencionar el hecho de que el sistema ADRE requiere un equipo de cómputo muy específico para funcionar (en caso del sistema ADRE 208-P es un equipo de cómputo muy viejo), restando velocidad a su funcionamiento.



Índice de figuras

Fig. 1.1 Sistema Permanentemente Instalado en una empresa	20
Fig. 1.2 Analizador de Vibraciones Portátil de Bently Nevada	21
Fig. 1.3 Software de Monitoreo del Estado NI InsightCM Data Explorer	21
Fig. 1.4 Parte de equipo de National Instruments para monitoreo de condición	24
Fig. 1.5 Sistema ADRE Bently Nevada	25
Fig. 2.1 Rotor flexible, cargando un solo disco	29
Fig. 2.2 Coordenadas usadas en el análisis de un rotor	29
Fig. 2.2.1 Un rotor rígido asimétrico en soportes flexibles	34
Fig. 2.2.2 Posición instantánea de la línea de centro de la chumacera S y el centro de masa del rotor G.	34
Fig. 2.2.3 Modelos de desbalance causando fuerza lateral.	37
Fig. 2.2.4 Rotor rígido con el eje principal de inercia sesgado.	38
Fig. 2.3 Definiciones de los instrumentos. a) campo, alcance, precisión, zona muerta, sensibilidad. b) repetitividad. c) histéresis	43
Fig. 2.4 Exactitud y precisión	44
Fig. 2.5 Esquema básico de un sensor	46
Fig. 2.6 Ejemplo de un panel frontal	50
Fig. 2.7 Paleta de Controles	51
Fig. 2.8 Diagrama de bloques	51
Fig. 2.9 Paleta de funciones	52
Fig. 2.10 Paleta de herramientas	53
Fig. 2.11 Ventana de dialogo de propiedades de un medidor	53
Fig. 3.1 Plataforma experimental instrumentada	57
Fig. 3.2 Sistema ADRE	59
Fig. 3.3 (1) Controlador de velocidad, (2) Acondicionador de señales de proximetros	60
Fig. 3.4 Sensor de proximidad de la serie 3300 XL	61
Fig. 3.5 Acelerómetro tri-axial Dytran	62
Fig. 3.6 Micrófono Shure	63
Fig. 3.8 Chasis cDAQ-9178	63
Fig. 3.9 Módulo NI 9234	64
Fig. 3.10 Módulo NI 9232	65
Fig. 3.11 Panel frontal del software, ventana de Configuración general	67
Fig. 3.12 Control para seleccionar el número de canales a utilizar	68
Fig. 3.13 Configuración del archivo a guardar	68



Fig. 3.14 Ventana de configuración para el guardado de archivos	69
Fig. 3.15 Control para activar/desactivar la adquisición de datos en tiempo real y buscador de archivos	69
Fig. 3.16 Control para duración de la prueba y Sampling rate	70
Fig. 3.17 Indicadores y botón de STOP	70
Fig. 3.18 Nota	70
Fig. 3.19 Control para activar/desactivar el filtro	71
Fig. 3.20 Ventana de configuración del filtro en diagrama de bloques	71
Fig. 3.21 Panel frontal mostrando la configuración de Buffer	72
Fig. 3.22 Controles para manipular el Buffer de ciertos gráficos	72
Fig. 3.23 Controles para efectuar la extracción de la señal	73
Fig. 3.24 Panel frontal mostrando la configuración de gráfica RPM vs Tiempo	73
Fig. 3.25 Panel frontal mostrando la configuración de integración de señal	74
Fig. 3.26 Panel frontal mostrando la configuración de LLE	75
Fig. 3.27 Panel frontal mostrando la ventana de Timebase	76
Fig. 3.28 Ventana de configuración de Timebase en diagrama de bloques	77
Fig. 3.29 Panel frontal mostrando la ventana de Orbit con orden 1	79
Fig. 3.30 Ventana de configuración de Orbit en diagrama de bloques	79
Fig. 3.30.1 Sistema de lazo cerrado	80
Fig. 3.31 Panel frontal mostrando la ventana de Polar	82
Fig. 3.32 Ventana de configuración de Polar en diagrama de bloques	83
Fig. 3.33 Panel frontal mostrando la ventana de Bode	85
Fig. 3.34 Ventana de configuración de Bode en diagrama de bloques	85
Fig. 3.35 Típico gráfico de centerline de arranque de una máquina	86
Fig. 3.36 Panel frontal mostrando la ventana de Centerline	86
Fig. 3.37 Ventana de configuración de Centerline en diagrama de bloques	87
Fig. 3.38 Panel frontal mostrando la ventana de Spectrum	89
Fig. 3.39 Ventana de configuración de Spectrum en diagrama de bloques	90
Fig. 3.40 Panel frontal mostrando la ventana de Waterfall	90
Fig. 3.41 Ventana de configuración de Waterfall en diagrama de bloques	91
Fig. 3.42 Panel frontal mostrando la ventana de Cascade/Colormap	91
Fig. 3.43 Panel frontal mostrando la ventana de Señales vs Tiempo	92
Fig. 3.44 Panel frontal mostrando la ventana de Cálculo de Tau	94
Fig. 3.45 Panel frontal mostrando la ventana de Lags vs Mutual Information	94
Fig. 3.46 Panel frontal mostrando la ventana de Dimensión/LLE	95



Fig. 3.47 Panel frontal mostrando la ventana de FNN vs Dimensión	95
Fig. 3.48 Primera parte del diagrama de bloques	96
Fig. 3.49 Ampliación del buscador de archivos en diagrama de bloques	97
Fig. 3.50 Ampliación del código para cálculo de Time step en diagrama de bloques	97
Fig. 3.51 Ampliación del código para duración de prueba en diagrama de bloques	97
Fig. 3.52 Ventana de configuración de canales en diagrama de bloques	98
Fig. 3.53 Continuación de la primera parte del diagrama de bloques, se muestra un subVI	99
Fig. 3.54 Segunda parte del código de programación en diagrama de bloques	100
Fig. 3.55 Tercera parte del código de programación en diagrama de bloques	102
Fig. 4.1 Primeros cuatro modos de vibración	106
Fig. 4.2 Modos de vibración cinco y seis	106
Fig. 4.3 Máquina Desalineada	107
Fig. 4.4 Desalineamiento Paralelo (Izq.) / Desalineamiento Angular (Der.)	107
Fig. 4.5 Partes del sistema de alineación láser	108
Fig. 4.6 Sistema de alineación láser montado en la plataforma experimental	109
Fig. 4.7 Distancias solicitadas por el sistema de alineación láser	109
Fig. 4.8 Posiciones que se deben realizar para medición láser	110
Fig. 4.9 Significado de los valores descritos por el sistema de alineación láser	110
Fig. 4.10 Muestra el desbalance estático en uno y dos planos	114
Fig. 4.11 Muestra del desbalance tipo par	114
Fig. 4.12 Muestra el desbalance tipo dinámico. (Combinación del estático y par)	115
Fig. 4.13 Ventana del programa para balanceo en un plano, Murphy & Pérez	115
Fig. 4.14 Trazado de los vectores para colocación de masas de corrección	116
Fig. 4.15 Diagrama Timebase en sistema ADRE. Amplitudes: $x=3.16$ mil pp / $y=1.82$ mil pp	120
Fig. 4.16 Diagrama Timebase en sistema LabVIEW. Amplitudes: $x=3.28$ mil pp / $y=1.86$ mil pp	120
Fig. 4.17 Diagrama Orbit en sistema ADRE. Amplitudes: $x=3.16$ mil pp / $y=1.82$ mil pp	121
Fig. 4.18 Diagrama Orbit en sistema LabVIEW. Amplitudes: $x=3.28$ mil pp / $y=1.86$ mil pp	121
Fig. 4.19 Diagrama Polar en sistema ADRE. Eje X (90°), se observan amplitudes alrededor de 3 mil	122
Fig. 4.20 Diagrama Polar en sistema LabVIEW. Eje X (90°), se observan amplitudes alrededor de 3 mil	122
Fig. 4.21 Diagrama de Bode en sistema ADRE. Eje X= 2.97 mil pp. (Izq.) / Eje Y= 1.85 mil pp. (Der.)	123
Fig. 4.22 Diagrama de Bode en sistema LabVIEW. Eje X= 2.82 mil pp. (Azul) / Eje Y= 1.55 mil pp. (Rojo)	123
Fig. 4.23 Diagrama Centerline en sistema ADRE. Mediciones tomadas respecto a la velocidad de giro	124
Fig. 4.24 Diagrama Centerline en sistema LabVIEW. Respecto a velocidad de giro.	124
Fig. 4.25 Diagrama Spectrum en sistema ADRE. Eje X= 3.16 mil pp. (Izq.) / Eje Y= 1.82 mil pp. (Der.)	125



Fig. 4.26 Diagrama Spectrum en sistema LabVIEW. Eje X=2.82 mil pp. (Rojo) / Eje Y=1.55 mil pp. (Blanco)	125
Fig. 4.27 Diagrama Waterfall en sistema ADRE. Eje X (Izq.) / Eje Y (Der.)	126
Fig. 4.28 Diagrama Waterfall en sistema LabVIEW. Eje X (Izq.) / Eje Y (Der.)	126
Fig. 4.29 Diagrama Colormap en sistema LabVIEW. Eje X. Una forma diferente y configurable de mostrar los resultados	127
Fig. 4.30 Timebase de proximetros, señal directa (Izq.) / Timebase de proximetros, señal 1x (Der.)	127
Fig. 4.31 Timebase de acelerómetros, señal 1x (Izq.) / Timebase de micrófono, señal 1x (Der.)	128
Fig. 4.32 Orbit de proximetros, señal 1x (Izq.) / Orbit de acelerómetros, señal 1x (Der.)	128
Fig. 4.33 Orbit de acelerómetros, señal 2x (Izq.) / Polar de proximetro X a 90° (Der.)	128
Fig. 4.34 Polar de proximetro Y a 0° (Izq.) / Polar de acelerómetro X a 90° (Der.)	129
Fig. 4.35 Polar de acelerómetro Y a 0° (Izq.) / Polar de micrófono (Der.)	129
Fig. 4.36 Diagrama de Bode, todos los sensores mostrados en la misma gráfica	129
Fig. 4.37 Centerline de proximetros (Izq.) / Centerline de acelerómetros (Der.)	130
Fig. 4.38 Diagrama Spectrum, se muestran las gráficas juntas para mejor comparación	130
Fig. 4.39 Waterfall de proximetro Y a 0° (Izq.) / Waterfall de acelerómetro Y a 0° (Der.)	130
Fig. 4.40 Waterfall de micrófono	131
Fig. 4.41 Señales de Amplitud vs Tiempo de todos los sensores usados en esta prueba	131
Fig. 4.42 Timebase, X=0.37, Y=0.53 v pp. (Izq.) / Orbit (Der.)	132
Fig. 4.43 Timebase, X=0.24, Y=0.31 v pp. (Izq.) / Orbit (Der.)	133
Fig. 4.44 Timebase, X=0.24, Y=0.32 v pp. (Izq.) / Orbit (Der.)	133
Fig. 4.45 Timebase, X=0.17, Y=0.32 v pp. (Izq.) / Orbit (Der.)	134
Fig. 4.46 Timebase, X=0.12, Y=0.29 v pp. (Izq.) / Orbit (Der.)	134
Fig. 4.47 Timebase, X=0.06, Y=0.13 v pp. (Izq.) / Orbit (Der.)	135
Fig. 4.48 Timebase señal directa X=0.76 v pp. (Izq.) / Timebase señal filtrada X=0.79 v pp. (Der.)	135
Fig. 4.49 Timebase Orden 1 X=0.51 v pp. (Izq.) / Timebase Orden 7 X=1.42 v pp. (Der.)	136
Fig. 4.51 Tabla de datos filtrados y cálculo de Tau	137
Fig. 4.52 Gráfica de Lags vs Mutual Information	137
Fig. 4.53 Dimensión y LLE	138
Fig. 4.54 FNN vs Dimensión	138
Fig. 4.55 Gráfica de Largest Lyapunov Exponent	139



Índice de tablas

Tabla 2.1 Herramientas de depuración	54
Tabla 2.2 Datos básicos en LabVIEW	55
Tabla 4.1 Distancias para alineación son láser	110
Tabla 4.2 Tolerancias para alineación	111
Tabla 4.3 Mediciones obtenidas con sistema láser antes de alineación	112
Tabla 4.4 Mediciones obtenidas con sistema láser después de alineación	112
Tabla 4.5 Valores de las condiciones de la plataforma experimental y RPM	117
Tabla 4.6 Valores de las amplitudes antes y después del balanceo	117
Tabla 4.7 Valores de amplitudes sin balancear a 3655 rpm (61 Hz.)	118
Tabla 4.8 Valores de amplitud con masa de 0.5 gr.	118

Nomenclatura

f	Frecuencia
T	Período
Ω, ω	Velocidad Angular
N	Frecuencia Angular
c	Amortiguamiento, coeficiente de amortiguamiento viscoso
c_c	Amortiguamiento Crítico
x	Desplazamiento
v	Velocidad
a	Aceleración
C_m	Centro de masas
C_r	Centro Geométrico
C_a	Centro de Apoyos o de Giros
O_x, O_y, O_z	Ejes x, y, z en sistema de coordenadas
θ, ψ, Φ	Representan rotaciones sobre los ejes O_x, O_y, O_z respectivamente
$\dot{\psi}$	Velocidad angular del disco sobre O_y también llamada precesión
M_x	Momento aplicado sobre el eje x
$\dot{\theta}$	Velocidad angular constante del disco
M_y	Momento aplicado sobre el eje y
k_{y2}	Indica la rigidez del resorte en la chumacera 2 en la dirección y (vertical)
m	Masa del rotor
$\ddot{\theta}$	Aceleración angular sobre el eje O_x
$\ddot{\psi}$	Aceleración angular sobre el eje O_y
δ	Deflexión del resorte debido a la fuerza f_{x1}
T, C, R	Traslación, (Coupling) acoplamiento y coeficientes de rigidez rotacional (Rotation)
r, φ	Coordenadas complejas
f_x, f_y	Fuerza aplicada al eje en la dirección O_x y O_y respectivamente



k_{uu}	Fuerza en O_x para producir unidad de desplazamiento u cuando no se permite que ocurran otros desplazamientos o rotaciones
$k_{\psi u}, k_{u\psi}, k_{\psi\psi}$	Coefficientes de rigidez en una localización particular en el eje
v	Desplazamiento resultante de la relación entre las fuerzas y momentos aplicados
I_d	Momento de inercia diametral
I_p	Momento polar de inercia
L	Longitud entre chumaceras cortas (i. e. simplemente apoyadas en los extremos)
a	Distancia de una de las chumaceras con un disco
b	Distancia entre el disco y otra chumacera
K	Representa la matriz de rigidez efectiva para el rotor girando en aislamiento
q	Vector de desplazamiento nodal de estado estable
Q_b	Fuerza ejercida en el rotor por la chumacera
Q_g	Fuerza debida al peso del rotor
M	Matriz de masa de la máquina
g	Vector gravedad
Q_{bi}	Fuerza en el rotor proveniente de la i -ésima chumacera
f_i	Representa una función no lineal
q_{si}	Desplazamiento offset de la i -ésima chumacera
O	Muestra la posición de equilibrio
S	Posición instantánea de la línea de centro perturbada del rotor
G	Posición del centro de masa del rotor
$ OS $	Amplitud de remolineo del rotor
SG	Línea del rotor
ε	Representa la distancia $ SG $
f	Fuerza de desbalance
β	Ángulo entre el eje de rotación y el rotor rígido sesgado
r	Representa el vector OS en la Figura 3-21
ω_n	Frecuencia natural de un sistema no amortiguado
V_0	Amplitud de vibración original en balanceo
θ_0	Ángulo de fase de vibración original en balanceo
$(m_e)_p$	Valor de masa de prueba
α_p	Ubicación angular de la masa de prueba en el disco
V_1	Amplitud de vibración resultante con masa de prueba
θ_1	Ángulo de fase de vibración resultante con masa de prueba
V_x	Valor de amplitud de efecto neto
θ_x	Ángulo de amplitud de efecto neto
$(m_e)_0$	Valor de masa de corrección
α_0	Ubicación angular de masa de corrección



Capítulo 1 Estado del arte

1.1 Tipos de Sistemas de Monitoreo del Estado de Vibración

Hay distintos sistemas de monitoreo del estado de vibración, pueden ser permanentemente instalados, semipermanentemente o equipo de medición portátil. La decisión del equipo que se utilizará depende de distintos factores tales como:

- La importancia de la operación de la máquina.
- Costo de tiempo de inactividad de la máquina.
- Costo de una falla catastrófica.
- Costo de la máquina.
- Tasa de progreso del modo de falla.
- Accesibilidad para reparar o dar mantenimiento (e. g. en plantas nucleares o lugares remotos).
- Accesibilidad a las posiciones de medición apropiadas.
- Calidad del sistema de medición/diagnóstico.
- Modos de Operación de la Máquina (e.g. velocidad, potencia).
- Costo del Sistema de Medición.
- Seguridad.
- Impactos Ambientales [24].

1.1.1 Sistemas Permanentemente Instalados

Este tipo de Sistemas son en los que los transductores, acondicionadores de señal, procesamiento de datos y almacenamiento de datos están permanentemente instalados. Los datos pueden ser recolectados ya sea continuamente o periódicamente. La aplicación de sistemas permanentemente instalados está normalmente limitada para máquinas costosas y críticas o para aquellas con tareas de monitoreo complejas [24].



Fig. 1.1 Sistema Permanentemente Instalado en una empresa

1.1.2 Sistemas Semipermanentes

Los sistemas semipermanentes son una unión entre los sistemas permanentes y los portátiles. En este tipo de sistemas los transductores generalmente están instalados permanentemente, mientras los componentes electrónicos de adquisición de datos están intermitentemente conectados [24].

1.1.3 Sistemas de Monitoreo Portátiles

Un sistema de monitoreo portátil desempeña funciones similares como el de un sistema en línea "continuo", pero es menos detallado y normalmente menos costoso. Con este arreglo, los datos son guardados periódicamente ya sea automáticamente o manualmente, con un recolector de datos portátil.

Normalmente, los sistemas de monitoreo portátiles son usados para guardar mediciones manualmente en localizaciones preseleccionadas en la máquina en intervalos periódicos (semanalmente, mensualmente, etc.). Los datos son generalmente registrados y almacenados localmente en un recolector de datos portátil. Un análisis superficial preliminar se puede hacer inmediatamente; sin embargo, para un análisis y procesamiento más a fondo, los datos son descargados a una computadora personal que tiene un software especializado [24].



Fig. 1.2 Analizador de Vibraciones Portátil de Bently Nevada

1.2 Recolección de Datos

1.2.1 Recolección Continua de Datos

Un sistema de recolección de datos continuo es en el que los transductores de vibración están instalados permanentemente en puntos clave de la máquina y en los que las mediciones de vibración son normalmente grabadas y almacenadas continuamente durante la operación de la máquina. Éste puede incluir sistemas de monitoreo de la vibración automáticos con conexiones multiplexoras siempre que la tasa de multiplexación sea suficientemente rápida para que datos significativos o tendencias no se pierdan. Los datos pueden ser procesados para dar ya sea información de banda ancha o de espectro que puede ser comparada con datos adquiridos previamente. Configurando “Alertas de límite” en los datos almacenados es posible informar al operador que el patrón de vibración de la máquina ha cambiado (la magnitud tiene ya sea incrementos o decrementos), y por lo tanto se recomiendan procesos de diagnóstico.

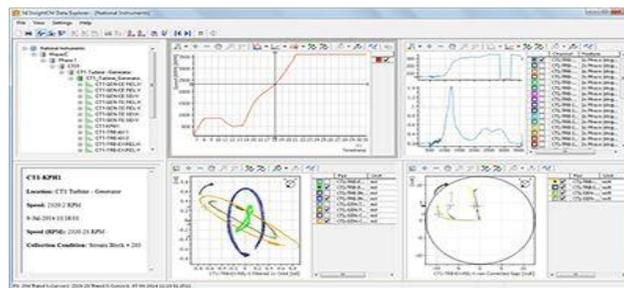


Fig. 1.3 Software de Monitoreo del Estado NI InsightCM Data Explorer



Un sistema de recolección de datos continuo puede ser instalado en el mismo sitio que la máquina para uso directo por el personal operador de la máquina, o puede ser instalado en un sitio remoto con datos transmitidos a un sitio de análisis de datos central. La ventaja obvia de un sistema "continuo" es la disponibilidad del estado en tiempo real de la máquina disponible en línea.

En un sistema automático, los transductores permanentes de vibración son instalados en la máquina casi de la misma manera que en los sistemas de monitoreo continuo. El sistema es programado para grabar y almacenar datos automáticamente. Los últimos datos son comparados con los datos previamente almacenados para así determinar si existe una condición de ALARMA [24].

1.2.2 Recolección de Datos Periódica

Para máquinas en las que los sistemas en línea no pueden estar justificados, sistemas portátiles son usados normalmente y estos son en la mayoría de los casos adecuados para monitoreo periódico [24].

1.2.3 Programas de Monitoreo de Estado

Descripciones claras de estados de operación, tales como velocidad, carga y temperatura, deben acompañar cualquier dato de vibración recolectado, como mínimo, tales descripciones deben incluir velocidad del eje (r/min) y carga de la máquina (potencia, flujo, presión, etc.) y cualquier otro parámetro que pueda afectar las vibraciones medidas.

En general, durante la adquisición de datos se hace gran énfasis en que las condiciones de operación se deben aproximar a las condiciones normales de operación de la máquina tan cerca como sea posible, para asegurar la consistencia y comparabilidad válida de los datos. Cuando esto no es posible, las características de la máquina deben ser bien conocidas de manera que se evalúe cualquier diferencia en datos.

Ya que el proceso de monitoreo del estado incluye el proceso de "tendencia", que examina la tasa en que los valores de vibración cambian con el tiempo de operación, es muy importante que las condiciones de operación durante mediciones sucesivas permanezcan iguales, de manera que tales tendencias sean válidas.



Los datos bajo otras condiciones pueden también necesitar ser recolectados dependiendo de la complejidad de la máquina y el propósito de la medición. Por ejemplo, cuando se sospechan problemas con desbalance, rozamiento, ejes fisurados o remolino de aceite, se recomiendan pruebas durante condiciones de operación transitoria tales como puesta en marcha y apagado [24].

1.3 Monitoreo de Condición

1.3.1 National Instruments (NI)

El mantenimiento basado en condición puede ayudar a una organización a controlar el riesgo por interrupciones y fallas inesperadas, optimizar el rendimiento de máquinas y reducir tiempo de reparación y costos de mantenimiento. Por más de 15 años, NI ha proporcionado productos de hardware y software para resolver aplicaciones de monitoreo de condición en línea, diagnóstico portátil y pruebas de fábrica.

Las herramientas de NI han sido utilizadas en la industria para monitorear una gran variedad de equipo crítico y auxiliar incluyendo turbinas, compresores y generadores; y cómo los usuarios se han beneficiado de sus programas de mantenimiento predictivo [60].

- **Monitoreo de Condición de Producción Industrial**

Soluciones para manufactura discreta y de proceso, fábricas de acero, fábricas de semiconductores, bienes de consumo y químicos, plataformas para monitoreo portátil y distribuido y pruebas de fábrica.

- **Monitoreo de Condición de Equipo Pesado**

Las soluciones para excavación, construcción y equipo de agricultura, mayor fiabilidad del equipo para administrar las restricciones de rentabilidad de la industria, monitorear palas, camiones y otros equipos.

- **Monitoreo de Condición del Transporte**

Soluciones para la industria ferroviaria, marina y aeroespacial, monitoreo remoto y distribuido para equipos móviles, integración de monitoreo de energía eléctrica y vibración.



- Monitoreo de Condición de Petróleo y Gas

Soluciones para extracción, tuberías y refinación, fácil integración con una variedad de sensores para monitoreo con turbo maquinaria, software avanzado que proporciona funciones de análisis como análisis de orden y detección.

- Monitoreo de Condición Eólica

Bajo costo para monitoreo embebido y en línea, sistemas de gran cantidad de canales y alto rendimiento para pruebas eficientes de industria y dinamómetro, procesamiento embebido para análisis de señal en tiempo real, registro de datos y control.

- Monitoreo de Condición de Generación de Energía Tradicional

Soluciones para plantas de energía fósil, nuclear e hidráulica, monitoreo para equipo crítico y equilibrio de la inversión de la planta, diagnósticos de toda la flota para resolver las crecientes demandas de fiabilidad [60].



Fig. 1.4 Parte de equipo de National Instruments para monitoreo de condición



1.3.2 Bently Nevada

ADRE para Windows/DAIU

El "ADRE para Windows/DAIU" de "Bently Nevada" consiste en una unidad de interface de adquisición de datos "208-P" y el software "ADRE para Windows", la unidad de adquisición de datos debe estar conectada a una computadora capaz de correr el software.

ADRE (Automated Diagnostics for Rotating Equipment), Sistema de Diagnóstico Automatizado para Equipo Rotatorio está específicamente diseñado para capturar datos de maquinaria, incorpora las características y las capacidades de osciloscopios, analizadores de espectro, filtros e instrumentos de grabación. Cuando se usa el sistema, los datos son presentados en la pantalla, es configurable para proporcionar soporte para transductores estándar y no estándar, incluyendo transductores de señales dinámicas y estáticas, y keyphasor u otras señales de velocidad de entrada, puede desplegar gráficas de: órbitas, órbitas/timebase, timebase, X vs Y (cualquier variable vs cualquier variable), tendencia, lista tabular, órbitas "Plus", polar, bode, shaft centerline, full spectrum, hall spectrum, cascada y waterfall, además cuenta con ocho canales de entrada [52].



Fig. 1.5 Sistema ADRE Bently Nevada



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"



Capítulo 2 Marco Teórico

2.1 Vibraciones

Cualquier movimiento que se repite después de un intervalo de tiempo se llama vibración u oscilación. El vaivén de un péndulo y el movimiento de una cuerda pulsada son ejemplos comunes de vibración. La teoría de la vibración tiene que ver con el estudio de los movimientos oscilatorios de los cuerpos y las fuerzas asociadas con ellos [3].

2.2 Sistema Vibratorio

Por lo común un sistema vibratorio incluye un medio para almacenar energía potencial (resorte o elasticidad), un medio para conservar energía cinética (masa o inercia) y un medio por el cual la energía se pierde gradualmente (amortiguador).

La vibración de un sistema implica la transformación de su energía potencial en energía cinética y de ésta en energía potencial, de manera alterna. Si el sistema se amortigua, una parte de su energía se disipa en cada ciclo de vibración y se le debe reemplazar por una fuente externa para que se mantenga un estado de vibración estable [3].

2.3 Importancia de las vibraciones mecánicas

El análisis de vibraciones se aplica con eficacia desde hace más de 30 años al control y diagnóstico de fallos mecánicos en máquinas rotativas. Inicialmente, se emplearon equipos analógicos para la medida de la vibración en banda ancha, lo que hacía imposible el diagnóstico fiable de fallos específicos por falta de información.

Más tarde, se incorporaron filtros sintonizables a la electrónica analógica, lo que incrementó enormemente la capacidad de diagnóstico, pero sin poder tratar la información de forma masiva. Desde 1984, se comenzaron a emplear equipos digitales con FFT en tiempo real y capacidad de almacenamiento (analizadores-colectores) y tratamiento en software para PC. Hoy día nadie pone en



duda la capacidad del análisis de vibraciones en máquinas rotativas, que incluso permite el diagnóstico de algunos problemas en máquinas eléctricas.

2.4 Rotodinámica

La Rotodinámica es la rama de la dinámica que se ocupa de los dispositivos mecánicos en los que al menos una parte suelen definirse como rotores, éstos giran con un momento angular significativo. Siguiendo la definición de la normatividad ISO correspondiente a rotores, un rotor es un cuerpo suspendido a través de un conjunto de soportes cilíndricos o rodamientos que le permite girar libremente alrededor de un eje fijo en el espacio.

Los rotores que están provistos de rodamientos o chumaceras para limitar su eje de rotación de una manera más o menos rígida a una posición fija en el espacio, suelen ser nombrados por lo general, como rotores fijos, mientras que aquellos que no están limitados de alguna manera se definen como rotores libres [16].

2.4.1 Las vibraciones mecánicas en la rotodinámica

El estudio para el control de vibraciones en los elementos de un sistema rotodinámico ha tenido gran importancia y es fundamental, un ejemplo claro son los soportes que se busca disminuir la amplitud cuando el sistema entra en resonancia, permitiendo una mayor vida útil de los soportes y ejes de la maquinaria [9], también recordar que una de las primeras publicaciones sobre vibraciones en rotores fue realizada por Rankine [67].

2.5 Ecuaciones de movimiento

Modelo Simple de un Rotor Flexible

Muchos rotores no pueden ser modelados como cuerpos rígidos, por lo tanto, son flexibles porque tienen un diámetro relativamente pequeño respecto a su longitud. Así, un rotor puede vibrar, incluso si es soportado por chumaceras rígidas o soportes rígidos. La figura 2.1 muestra ese rotor, consiste de un eje



largo, uniforme y flexible con sección transversal circular, soportado en dos cortas o auto-alineables, chumaceras soportadas rígidamente. El eje tiene un solo disco y se asume que la masa del eje es pequeña comparada a la del disco. Como consecuencia la masa del eje puede ser despreciada en el análisis.

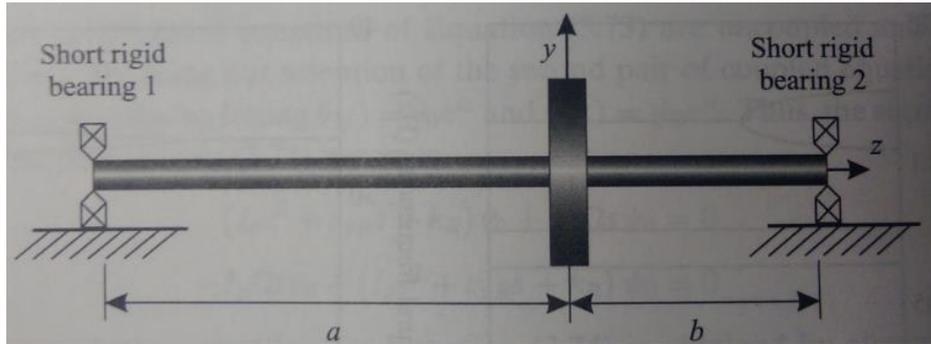


Fig. 2.1 Rotor flexible, cargando un solo disco

Si el disco es puesto a la mitad de la envergadura del eje, el rotor es frecuentemente llamado Jeffcott o un rotor de De Laval, quienes realizaron algunos de los primeros estudios de dinámica de rotores flexibles.

Para analizar el comportamiento dinámico del rotor mostrado en la figura 2.1, se debe considerar el desplazamiento del disco a lo largo de la posición de equilibrio y sobre los ejes O_x y O_y . Así, el sistema dinámico requiere cuatro coordenadas para especificar el desplazamiento a lo largo y las rotaciones sobre los ejes O_x y O_y . Éstas son las únicas coordenadas requeridas; así, el modelo tiene cuatro grados de libertad. Las definiciones de coordenadas están dadas en la figura 2.2.

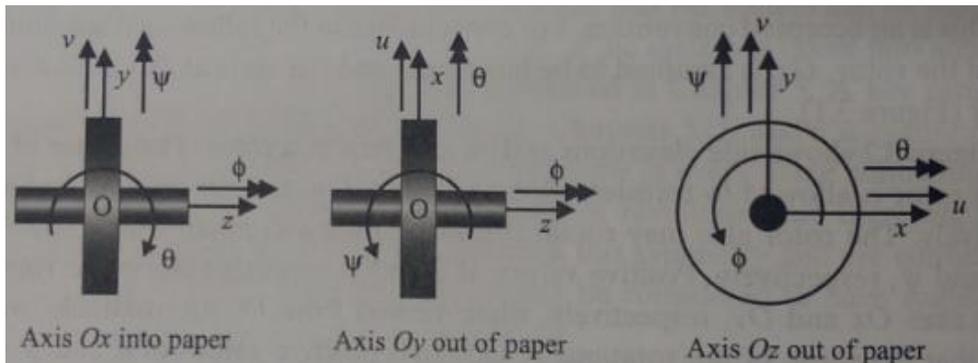


Fig. 2.2 Coordenadas usadas en el análisis de un rotor



Para pequeños, desplazamientos estáticos del eje, hay una relación lineal entre la fuerza aplicada a el eje sobre los ejes O_y (u O_x) y los desplazamientos resultantes y rotaciones. Así, para un punto específico en el eje, se tiene:

$$f_x = k_{uu}u + k_{u\psi}\psi$$

$$M_y = k_{\psi\psi} + k_{\psi u}u$$

Ec. 2.1

En estas ecuaciones, f_x es una fuerza aplicada al eje en la dirección O_x y M_y es un momento aplicado sobre el eje O_y . Los parámetros u y ψ son definidas en la figura 2.2. Los coeficientes k_{uu} , $k_{\psi u}$, $k_{u\psi}$ y $k_{\psi\psi}$ son los coeficientes de rigidez en una localización particular en el eje. De la ecuación 2.1, se pueden deducir definiciones para esos coeficientes. Por ejemplo, k_{uu} es la fuerza en la dirección O_x requerida para producir una unidad de desplazamiento u cuando no se permite que ocurran otros desplazamientos o rotaciones. Notar que, para sistemas conservativos, $k_{u\psi} = k_{\psi u}$.

La relación entre las fuerzas y momentos aplicados y el desplazamiento resultante v y rotación θ son:

$$f_y = k_{vv}v + k_{v\theta}\theta$$

$$M_x = k_{\theta\theta}\theta + k_{\theta v}v$$

Ec. 2.2

Notar que, para un sistema conservativo, $k_{v\theta} = k_{\theta v}$

Para determinar la ecuación de movimiento para este sistema, se debe aplicar la segunda ley de movimiento de Newton al sistema. Así, para un disco de masa m , momento de inercia diametral I_d y momento polar de inercia I_p se obtiene:

Fuerza en el disco en dirección x :

$$-f_x = m\ddot{u}$$

Fuerza en el disco en la dirección y :

$$-f_y = m\ddot{v}$$



Momentos actuando en el disco en la dirección θ :

$$-M_x = I_d \ddot{\theta} + I_p \Omega \dot{\psi}$$

Momentos actuando en el disco en la dirección ψ :

$$-M_y = I_d \ddot{\psi} - I_p \Omega \dot{\theta}$$

Ec. 2.3

Las fuerzas y momentos aplicados al disco debido a la elasticidad del eje son iguales y opuestas a las fuerzas actuando en el eje debido a los desplazamientos del disco. Los efectos giroscópicos también se incluyen en el análisis. Sustituyendo las ecuaciones 2.1 y 2.2 en las ecuaciones 2.3 y reordenando se obtiene:

$$m\ddot{u} + k_{uu}u + k_{u\psi}\psi = 0$$

$$m\ddot{v} + k_{vv}v + k_{v\theta}\theta = 0$$

$$I_d \ddot{\theta} + I_p \Omega \dot{\psi} + k_{\theta v}v + k_{\theta\theta}\theta = 0$$

$$I_d \ddot{\psi} + I_p \Omega \dot{\theta} + k_{\psi u}u + k_{\psi\psi}\psi = 0$$

Ec. 2.4

Las propiedades de rigidez de un eje circular son idénticas en cada dirección, así $k_{uu} = k_{vv}$ y $k_{\theta\theta} = k_{\psi\psi}$. Sin embargo, $k_{u\psi} = -k_{v\theta}$ debido a la convención de signos que se usa (ver la Figura 2.2). Así, dejando $k_{u\psi} = k_{uu} = k_{vv}$, $k_{\psi\psi} = k_{uu} = k_{vv}$, y $k_{u\psi} = k_{uu} = k_{vv}$, se tiene:

$$m\ddot{u} + k_T u + k_C \psi = 0$$

$$m\ddot{v} + k_T v + k_C \theta = 0$$

$$I_d \ddot{\theta} + I_p \Omega \dot{\psi} + k_C v + k_R \theta = 0$$

$$I_d \ddot{\psi} + I_p \Omega \dot{\theta} + k_C u + k_R \psi = 0$$

Ec. 2.5



Para un eje de longitud L entre chumaceras cortas (i. e., simplemente apoyada en los extremos), con un disco ubicado a una distancia a de una de las chumaceras y a una distancia b de la otra, entonces:

$$k_T = k_{uu} = k_{vv} = \frac{3EI(a^3 + b^3)}{a^3b^3}$$
$$k_C = k_{u\psi} = -k_{v\theta} = \frac{3EI(a^2 - b^2)}{a^2b^2}$$
$$k_R = k_{\psi\psi} = k_{\theta\theta} = \frac{3EI(a + b)}{ab}$$

Ec. 2.6

El Efecto del Amortiguamiento en los Soportes

Se considera el efecto del amortiguamiento viscoso en las chumaceras. Se asume que un amortiguador viscoso es puesto en paralelo con cada elemento resorte, las fuerzas f_{x1} , f_{x2} , f_{y1} y f_{y2} de la Ecuación:

$$f_{x1} = k_{x1}(u - a\psi)$$
$$f_{x2} = k_{x2}(u + b\psi)$$
$$f_{y1} = k_{y1}(v + a\theta)$$
$$f_{y2} = k_{y2}(v - b\theta)$$

ahora se convierte:

Ec. 2.7

$$f_{x1} = k_{x1}(u - a\psi) + c_{x1}(\dot{u} - a\dot{\psi})$$
$$f_{x2} = k_{x2}(u + b\psi) + c_{x2}(\dot{u} - b\dot{\psi})$$
$$f_{y1} = k_{y1}(v + a\theta) + c_{y1}(\dot{v} - a\dot{\theta})$$
$$f_{y2} = k_{y2}(v - b\theta) + c_{y2}(\dot{v} - b\dot{\theta})$$

Ec. 2.8

Donde c es el coeficiente de amortiguamiento viscoso y está definido como la fuerza requerida para producir una unidad de velocidad a través del elemento amortiguador. Dejando:



$$\begin{aligned}c_{xT} &= c_{x1} + c_{x2}; & c_{yT} &= c_{y1} + c_{y2} \\c_{xC} &= -ac_{x1} + bc_{x2}; & c_{yC} &= -ac_{y1} + bc_{y2} \\c_{xR} &= a^2c_{x1} + b^2c_{x2}; & c_{yR} &= a^2c_{y1} + b^2c_{y2}\end{aligned}$$

Ec. 2.9

Haciendo uso de las definiciones anteriores, sustituyendo la Ecuación (2.8) en la ecuación siguiente:

Las fuerzas actuando sobre el rotor en la dirección x : $-f_{x1} - f_{x2} = m\ddot{u}$

Las fuerzas actuando sobre el rotor en la dirección y : $-f_{y1} - f_{y2} = m\ddot{v}$

Los momentos actuando sobre el rotor en la dirección θ : $-af_{y1} + bf_{y2} = I_d\ddot{\theta} + I_p\Omega\dot{\psi}$

Los momentos actuando sobre el rotor en la dirección ψ : $af_{x1} - bf_{x2} = I_d\ddot{\psi} - I_p\Omega\dot{\theta}$

y reordenando esas ecuaciones se obtiene:

$$\begin{aligned}m\ddot{u} + c_{xT}\dot{u} + c_{xC}\dot{\psi} + k_{xT}u + k_{xC}\psi &= 0 \\m\ddot{v} + c_{yT}\dot{v} - c_{yC}\dot{\theta} + k_{yT}v - k_{yC}\theta &= 0 \\I_d\ddot{\theta} + I_p\Omega\dot{\psi} - c_{yC}\dot{v} + c_{yR}\dot{\theta} - k_{yC}v + k_{yR}\theta &= 0 \\I_d\ddot{\psi} - I_p\Omega\dot{\theta} + c_{xC}\dot{u} - c_{xR}\dot{\psi} + k_{xC}u + k_{xR}\psi &= 0\end{aligned}$$

Ec. 2.10

Modelado de Fuerzas y Momentos de Desbalance

Se examina la respuesta síncrona de las fuerzas y momentos de un rotor fuera de balance. El análisis se desarrolla en términos de un rotor rígido, pero se extiende fácilmente a rotores flexibles. Para determinar el efecto de masa fuera de balance en el rotor rígido circular mostrado en la Fig. 2.2.1, se asume que el centro de masa del rotor es desplazado una distancia ε de la línea de centro de equilibrio del eje.

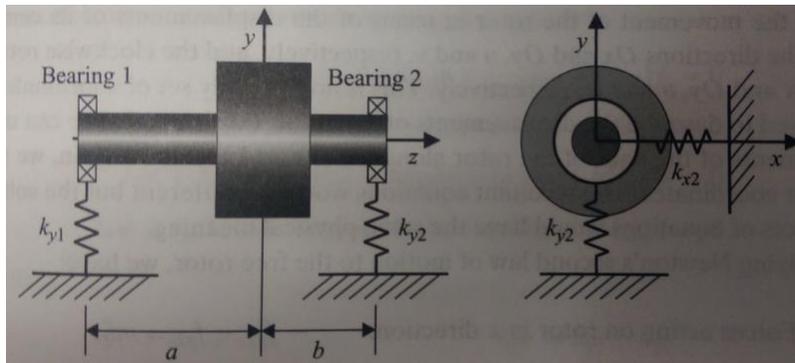


Fig. 2.2.1 Un rotor rígido asimétrico en soportes flexibles

Se considera el desplazamiento del centro de masa del rotor a lo largo de los ejes O_x y O_y . La Fig. 2.2.2 muestra la posición de equilibrio, O ; la posición instantánea de la línea de centro perturbada del rotor, S ; y la posición del centro de masa del rotor, G . Notar que $|SG| = \varepsilon$. El ángulo instantáneo entre la línea SG (que representa una línea en el rotor) y el eje O_x es entonces $(\Phi - \alpha)$. La distancia $|OS|$, que es calculada durante el análisis, es la amplitud de remolineo del rotor. El centro de masa del rotor se mueve u_G y v_G en la dirección x y y , respectivamente, mientras la línea de centro del rotor se desvía u y v en la dirección correspondiente en las chumaceras flexibles.

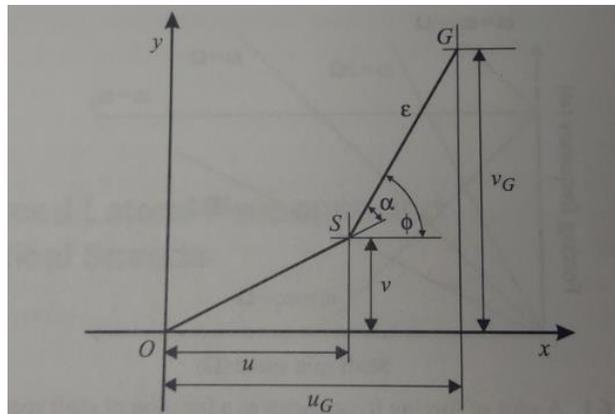


Fig. 2.2.2 Posición instantánea de la línea de centro de la chumacera S y el centro de masa del rotor G.

Ahora, de la Fig. 2.2.2, se muestra que:

$$u_G = u + \varepsilon \cos \Phi$$

$$v_G = v + \varepsilon \operatorname{sen} \Phi$$



Diferenciando esas ecuaciones dos veces con respecto al tiempo y observando que ε es constante obtenemos:

$$\ddot{u}_G = \ddot{u} + \varepsilon(-\dot{\phi}^2 \cos\phi - \ddot{\phi} \sin\phi)$$

$$\ddot{v}_G = \ddot{v} + \varepsilon(-\dot{\phi}^2 \sin\phi + \ddot{\phi} \cos\phi)$$

Ec. 2.12

En la derivación de las ecuaciones previas, no se ha restringido el análisis en el caso del rotor girando con una velocidad angular constante. Si ahora se introduce esta simplificación, entonces en una rotación a velocidad constante, Ω , $\dot{\phi} = \Omega$ y $\ddot{\phi} = 0$, así,

$$\ddot{u}_G = \ddot{u} - \varepsilon\Omega^2 \cos\Omega t$$

$$\ddot{v}_G = \ddot{v} - \varepsilon\Omega^2 \sin\Omega t$$

Ec. 2.13

La ecuación de movimiento para la vibración libre de este rotor, incluye amortiguamiento en los soportes y efectos giroscópicos, son dados en la Ecuación (2.10) y se repiten aquí por conveniencia:

$$m\ddot{u} + c_{xT}\dot{u} + c_{xC}\dot{\psi} + k_{xT}u + k_{xC}\psi = 0$$

$$m\ddot{v} + c_{yT}\dot{v} - c_{yC}\dot{\theta} + k_{yT}v - k_{yC}\theta = 0$$

$$I_d\ddot{\theta} + I_p\Omega\dot{\psi} - c_{yC}\dot{v} + c_{yR}\dot{\theta} - k_{yC}v + k_{yR}\theta = 0$$

$$I_d\ddot{\psi} - I_p\Omega\dot{\theta} + c_{xC}\dot{u} + c_{xR}\dot{\psi} + k_{xC}u + k_{xR}\psi = 0$$

Ec. 2.14

Para el rotor considerado, el centro de masa está desplazado de la línea de centro del eje en equilibrio por una pequeña cantidad ε , y el desplazamiento del centro de masa está dado por u_G y v_G . Sin embargo, el desplazamiento de los resortes y amortiguadores (en las chumaceras) continúan en términos de u y v . Así, reemplazando \ddot{u} por \ddot{u}_G y \ddot{v} por \ddot{v}_G en la Ecuación (2.10), tenemos:

$$m\ddot{u}_G + c_{xT}\dot{u} + c_{xC}\dot{\psi} + k_{xT}u + k_{xC}\psi = 0$$

$$m\ddot{v}_G + c_{yT}\dot{v} - c_{yC}\dot{\theta} + k_{yT}v - k_{yC}\theta = 0$$

$$I_d\ddot{\theta} + I_p\Omega\dot{\psi} - c_{yC}\dot{v} + c_{yR}\dot{\theta} - k_{yC}v + k_{yR}\theta = 0$$



$$I_a \ddot{\psi} - I_p \Omega \dot{\theta} + c_{xC} \dot{u} + c_{xR} \dot{\psi} + k_{xC} u + k_{xR} \psi = 0$$

Ec. 2.15

Sustituyendo por \ddot{u}_G y \ddot{u}_G de la Ecuación (2.13) y reordenando da:

$$m \ddot{u} + c_{xT} \dot{u} + c_{xC} \dot{\psi} + k_{xT} u + k_{xC} \psi = m \varepsilon \Omega^2 \cos \Omega t$$

$$m \ddot{v} + c_{yT} \dot{v} - c_{yC} \dot{\theta} + k_{yT} v - k_{yC} \theta = m \varepsilon \Omega^2 \sin \Omega t$$

$$I_a \ddot{\theta} + I_p \Omega \dot{\psi} - c_{yC} \dot{v} + c_{yR} \dot{\theta} - k_{yC} v + k_{yR} \theta = 0$$

$$I_a \ddot{\psi} - I_p \Omega \dot{\theta} + c_{xC} \dot{u} + c_{xR} \dot{\psi} + k_{xC} u + k_{xR} \psi = 0$$

Ec. 2.16

La Ecuación (2.16) muestra que el desplazamiento lateral del centro de masa respecto a la posición de equilibrio causa fuerzas de desbalance que actúan en el sistema. Así, se puede desarrollar la ecuación de movimiento para un sistema con un disco o rotor con un offset ya sea modificando la posición del centro de masa o más directamente añadiendo fuerzas en el lado derecho de las ecuaciones de movimiento, Ecuación (2.10), cualquiera es más conveniente.

En la discusión previa, se imaginó que las fuerzas de desbalance surgieron porque la masa total del rotor está desplazada respecto a la línea de unión de la chumacera por una pequeña cantidad ε . Esto es mostrado en el diagrama de la derecha en la Fig. 2.2.3. En tal caso, la fuerza de desbalance está dado por:

$$f = m \varepsilon \Omega^2$$

Ec. 2.17

Donde m es la masa total del rotor. Esta fuerza aparece en el lado derecho de la Ecuación (2.16), resuelta en dos componentes. El enfoque alternativo asume que el centro de masa del rotor original es coincidente con la línea de centro de la chumacera pero que una masa (insignificante) extra, m_0 , está fija al rotor una distancia a de la línea de centro de la chumacera. La masa añadida, m_0 , es despreciable comparada a la masa del rotor. Este modelo es mostrado en el diagrama de la izquierda en la Fig. 2.2.3.

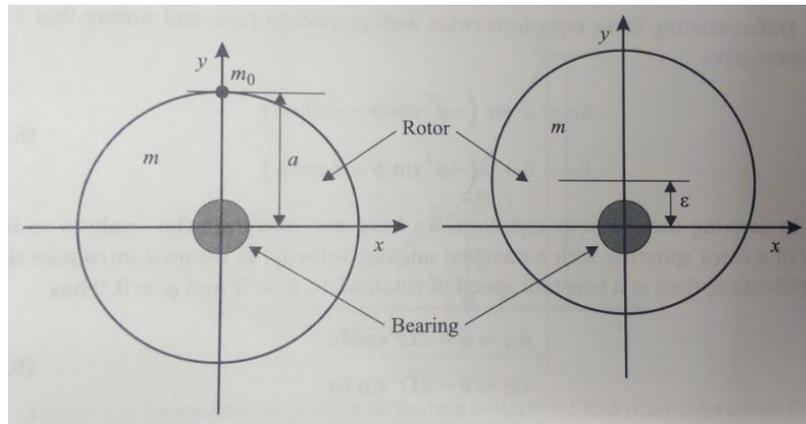


Fig. 2.2.3 Modelos de desbalance causando fuerza lateral.

La aceleración lateral de la masa m_0 es $a\Omega^2$ y la fuerza resultante es:

$$f = m_0 a \Omega^2$$

Ec. 2.18

De la Ecuación (2.17) y (2.18), se ve que las fuerzas de desbalance son idénticas si:

$$m_0 a = m \varepsilon$$

Ya que m_0 es pequeña comparada con m , para fuerzas de desbalance iguales, ε es pequeña comparada con a . Hay que destacar que esos modelos son equivalentes a otro; son simplemente diferentes maneras de visualizar o representar el mismo fenómeno. En la práctica, normalmente no se es conscientes de si la fuerza de desbalance surgió de un pequeño offset proveniente de la línea de centro de la chumacera de una masa significativa tal como un disco, o una masa extra pero pequeña como un tornillo agregado al rotor en un radio grande de la posición de equilibrio, o una combinación de ambos.

Los momentos de desbalance también pueden existir en un rotor. Se considera otra vez un rotor rígido y se supondrá que el rotor está soportado sobre chumaceras de tal manera que, a una velocidad baja, la línea de centro del rotor está relativamente sesgada a el eje de rotación por un pequeño ángulo β , como se muestra en la Fig. 2.2.4.

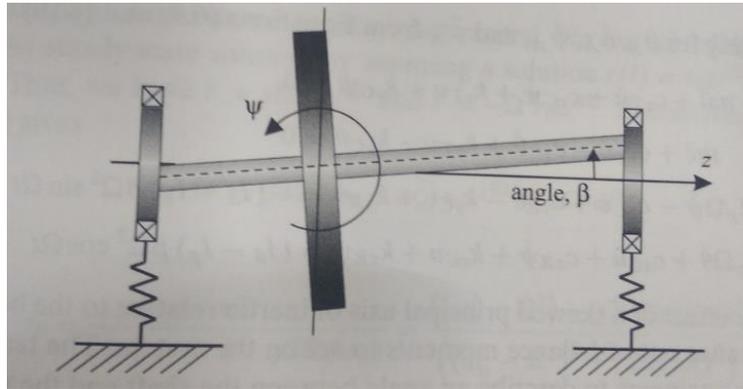


Fig. 2.2.4 Rotor rígido con el eje principal de inercia sesgado.

Así, para una velocidad de rotación constante, cuando el eje del rotor rota por θ y ψ en sentido de las manecillas del reloj sobre los ejes O_x y O_y , respectivamente, la posición angular del rotor (θ_A, ψ_A) es:

$$\theta_A = \theta - \beta \text{sen}\Omega t$$

$$\psi_A = \psi + \beta \text{cos}\Omega t$$

Ec. 2.19

Así:

$$\dot{\theta}_A = \dot{\theta} - \beta \Omega \text{cos}\Omega t$$

$$\dot{\psi}_A = \dot{\psi} - \beta \Omega \text{sen}\Omega t$$

Ec. 2.20

Y:

$$\ddot{\theta}_A = \ddot{\theta} + \beta \Omega^2 \text{sen}\Omega t$$

$$\ddot{\psi}_A = \ddot{\psi} - \beta \Omega^2 \text{cos}\Omega t$$

Ec. 2.21

Otra vez se comienza por considerar las ecuaciones de movimiento para vibración libre, Ecuación (2.10), repetida aquí por conveniencia:

$$m\ddot{u} + c_{xT}\dot{u} + c_{xC}\dot{\psi} + k_{xT}u + k_{xC}\psi = 0$$

$$m\ddot{v} + c_{yT}\dot{v} - c_{yC}\dot{\theta} + k_{yT}v - k_{yC}\theta = 0$$



$$I_d \ddot{\theta} + I_p \Omega \dot{\psi} - c_{yC} \dot{v} + c_{yR} \dot{\theta} - k_{yC} v + k_{yR} \theta = 0$$

$$I_d \ddot{\psi} - I_p \Omega \dot{\theta} + c_{xC} \dot{u} - c_{xR} \dot{\psi} + k_{xC} u + k_{xR} \psi = 0$$

Ec. 2.22

Cuando el rotor rígido está sesgada con respecto al eje de rotación por un pequeño ángulo, β , el desplazamiento angular del rotor está dado por θ_A y ψ_A ; sin embargo, el desplazamiento de los resortes y amortiguadores en las chumaceras, causado por los desplazamientos angulares del rotor sobre O_x y O_y , siguen siendo en términos de θ y ψ . Así, reemplazando la aceleración angular del rotor, $\ddot{\theta}$ y $\ddot{\psi}$, por $\ddot{\theta}_A$ y $\ddot{\psi}_A$ en la Ecuación (2.10), y las velocidades en los términos giroscópicos, $\dot{\theta}$ y $\dot{\psi}$, por $\dot{\theta}_A$ y $\dot{\psi}_A$, respectivamente, tenemos:

$$m \ddot{u} + c_{xT} \dot{u} + c_{xC} \dot{\psi}_A + k_{xT} u + k_{xC} \psi = 0$$

$$m \ddot{v} + c_{yT} \dot{v} - c_{yC} \dot{\theta}_A + k_{yT} v - k_{yC} \theta = 0$$

$$I_d \ddot{\theta}_A + I_p \Omega \dot{\psi}_A - c_{yC} \dot{v} + c_{yR} \dot{\theta}_A - k_{yC} v + k_{yR} \theta = 0$$

$$I_d \ddot{\psi}_A - I_p \Omega \dot{\theta}_A + c_{xC} \dot{u} - c_{xR} \dot{\psi}_A + k_{xC} u + k_{xR} \psi = 0$$

Ec. 2.23

Sustituyendo por $\dot{\theta}_A$, $\ddot{\theta}_A$, $\dot{\psi}_A$, y $\ddot{\psi}_A$ de las Ecuaciones (2.20) y (2.21) lleva a:

$$m \ddot{u} + c_{xT} \dot{u} + c_{xC} \dot{\psi} + k_{xT} u + k_{xC} \psi = 0$$

$$m \ddot{v} + c_{yT} \dot{v} - c_{yC} \dot{\theta} + k_{yT} v - k_{yC} \theta = 0$$

$$I_d \ddot{\theta} + I_p \Omega \dot{\psi} - c_{yC} \dot{v} + c_{yR} \dot{\theta} - k_{yC} v + k_{yR} \theta = (I_d - I_p) \beta \Omega^2 \sin \Omega t$$

$$I_d \ddot{\psi} - I_p \Omega \dot{\theta} + c_{xC} \dot{u} - c_{xR} \dot{\psi} + k_{xC} u + k_{xR} \psi = (I_d - I_p) \beta \Omega^2 \cos \Omega t$$

Ec. 2.24

Así, el efecto de un eje principal de inercia sesgado relativo a la línea de centro de la chumacera es la causa de momentos de desbalance que actúan en el sistema. El término en inglés "swash" es frecuentemente usado por los ingenieros para describir un ángulo entre el eje y el normal al disco.



Respuesta de un Rotor Jeffcott a Fuerzas de Desbalance

Las ecuaciones de movimiento para un rotor flexible simple en chumaceras rígidas mostradas son esencialmente las mismas que las ecuaciones de movimiento para un rotor rígido en chumaceras flexibles, sólo la derivación y origen de los coeficientes de rigidez es diferente. En el caso del rotor rígido, las deflexiones ocurren en las chumaceras; mientras que, en un rotor flexible en chumaceras rígidas, es el rotor el que se deforma. Debido a la gran similitud entre los dos sistemas, se puede afirmar que la Ecuación (2.25) describe el movimiento de un rotor Jeffcott excitado por fuerzas de desbalance.

$$\ddot{r} + 2\zeta\omega_n\dot{r} + \omega_n^2 r = \varepsilon\Omega^2 e^{j\Omega t}$$

Ec. 2.25

Donde $\omega_n = \sqrt{k_T/m}$ y $\zeta = c_T/(2m\omega_n)$.

$$\ddot{r} = -\Omega^2 r_0 e^{j\Omega t}$$

La solución de esta ecuación está dada por la Ecuación (2.26) y la Fig. 2.2.4 muestra la respuesta del rotor a la fuerza de desbalance.

$$|r_0| = \frac{\varepsilon\Omega^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \Omega^2)^2 + (2\Omega\zeta\omega_n)^2}} \text{ y } \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{2\Omega\zeta\omega_n}{\omega_n^2 - \Omega^2} \right)$$

Ec. 2.26

Si el disco llevado por un eje flexible, sin masa que no está en medio de la envergadura, hay una interacción entre los desplazamientos y rotaciones a lo largo y sobre los ejes O_x y O_y . Entonces, las ecuaciones gobernantes están dadas por la Ecuación (2.27) $m\ddot{r} + c_T\dot{r} + c_C\dot{\phi} + k_T r + k_C \phi = m\varepsilon\Omega^2 e^{j\Omega t}$

$$I_d\ddot{\phi} - {}_jI_p\Omega\dot{\phi} + c_C\dot{r} + c_R\dot{\phi} + k_C r + k_R \phi = 0$$

Ec. 2.27

Y la respuesta a la fuerza de desbalance está dada por las Ecuaciones (2.28) y (2.30). Otros sistemas de rotor simple, como un rotor en voladizo, también tienen interacción entre los desplazamientos y rotaciones del disco.

$$r_0 = \frac{m\varepsilon\Omega^2}{D} \{ -(I_d - I_p)\Omega^2 + {}_j c_R\Omega + k_R \}$$

Ec. 2.28



Donde:

$$D = -(I_d - I_p)\Omega^2 + j c_R \Omega + k_R)(-m\Omega^2 + j c_T \Omega + k_T) - (j c_C \Omega + k_C)^2$$

Ec. 2.29

Entonces:

$$\varphi_0 = \frac{m\varepsilon\Omega^2}{D} \{-j\Omega c_C - k_C\}$$

Ec. 2.30

2.6 Instrumentación

2.6.1 Definición y antecedentes de la instrumentación

Instrumentación se define como el arte y la ciencia de la medición y el control de las variables de proceso dentro de un área de producción o fabricación [26].

Elementos de la instrumentación industrial tienen una larga historia. Escalas para la comparación de los pesos y punteros simples para indicar la posición son tecnologías antiguas. Algunas de las primeras mediciones fueron de tiempo. La integración de sensores, pantallas, grabadoras y controles era poco común hasta la revolución industrial, limitada por las necesidades y el sentido práctico.

El transistor fue comercializado a mediados de la década de 1950. Cada empresa de instrumentos introdujo su propia señal de instrumentación estándar, causando confusión hasta que se utilizó el rango de 4-20 mA como la señal del instrumento electrónico estándar para los transmisores y válvulas. Esta señal fue finalmente estandarizada como ANSI/ISA S50, "Compatibilidad de señales analógicas de Instrumentos de Procesos Industriales Electrónicos", en la década de 1970. La transformación de la instrumentación de los transmisores mecánicos neumáticos, controladores y válvulas para instrumentos electrónicos reduce los costos de mantenimiento como instrumentos electrónicos eran más fiables que los instrumentos mecánicos. Esto también aumenta la eficiencia y la producción debido a su aumento de la precisión. Neumática disfrutó de algunas ventajas, siendo favorecida en ambientes corrosivos y explosivos.



La próxima evolución de los instrumentos vino con la producción de sistemas de control distribuido que permitió el seguimiento y control desde múltiples ubicaciones que podrían ser ampliamente separados. Un operador de proceso podría sentarse delante de una pantalla y controlar miles de puntos a lo largo de un gran complejo. Un desarrollo estrechamente relacionado se denomina "Control de Supervisión y Adquisición de Datos". Estas tecnologías fueron apoyadas por las computadoras personales, redes e interfaces gráficas de usuario [27].

2.6.2 Instrumentación electrónica e industrial

La instrumentación electrónica es la parte de la electrónica que tiene como objetivo la observación y medida del universo físico (sea de tipo eléctrico o no) empleando herramientas (instrumentos y equipos) electrónicas [28] [29].

La instrumentación electrónica se aplica en el sensado y procesamiento de la información proveniente de variables físicas y químicas, a partir de las cuales realiza el monitoreo y control de procesos, empleando dispositivos y tecnologías electrónicas [29].

La instrumentación industrial es el grupo de elementos que sirven para medir, convertir, transmitir, controlar o registrar variables de un proceso con el fin de optimizar los recursos utilizados en éste. Es el conocimiento de la correcta aplicación de los equipos encaminados para apoyar al usuario en la medición, regulación, observación, transformación, ofrecer seguridad, etc., de una variable dada en un proceso productivo [31].

Un sistema de instrumentación es una estructura compleja que agrupa un conjunto de instrumentos, un dispositivo o sistema en el que se mide, unas conexiones entre estos elementos y, por último, y no menos importante, unos programas que se encargan de automatizar el proceso y de garantizar la repetitividad de las medidas.

2.6.3 Definiciones usadas en la instrumentación

La terminología empleada se ha unificado con el fin de que los fabricantes, los usuarios y los organismos o entidades que intervienen directa o indirectamente en el campo de la instrumentación empleen el



mismo lenguaje. Las definiciones de los términos empleados se relacionan con las sugerencias hechas por ANSI/ISA-S51.1-1979 (R 1993) aprobadas el 26 de mayo de 1995.

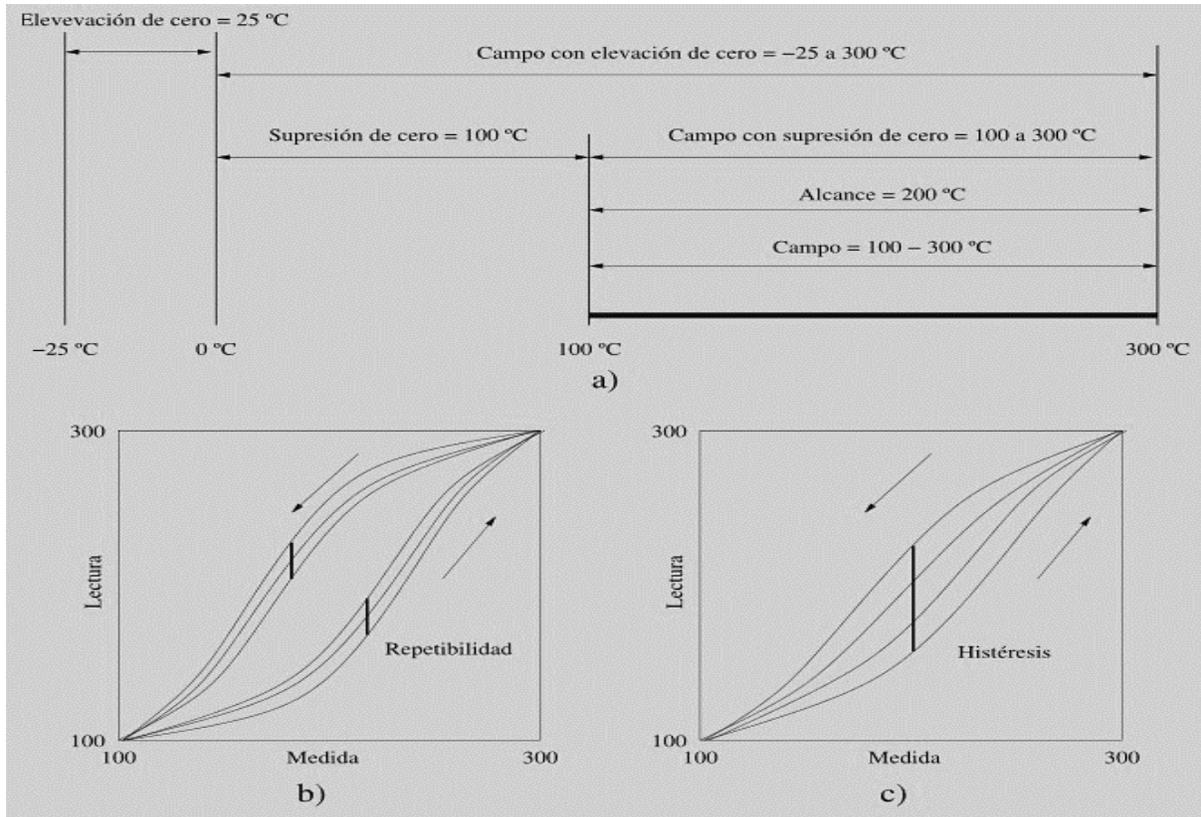


Fig. 2.3 Definiciones de los instrumentos. a) campo, alcance, precisión, zona muerta, sensibilidad. b) repetitividad. c) histéresis

- Campo de medida

El campo de medida (range), es el espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida, de recepción o de transmisión del instrumento.

- Alcance

El alcance (span) es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.



- Error

El error de la medida es la desviación que presentan las medidas prácticas de una variable de proceso con relación a las medidas teóricas o ideales, como resultado de las imperfecciones de los aparatos y de las variables parásitas que afectan al proceso. Es decir:

$$\text{Error} = \text{Valor leído en el instrumento} - \text{Valor ideal de la variable medida}$$

El error absoluto es:

$$\text{Error absoluto} = \text{Valor leído} - \text{Valor verdadero}$$

El error relativo representa la calidad de la medida y es:

$$\text{Error relativo} = \text{Error absoluto} / \text{Error verdadero}$$

- Precisión

La precisión (precisión) es la cualidad de un instrumento por la que se entiende a dar lecturas muy próximas unas a otras, es decir, es el grado de dispersión de las mismas. Un instrumento puede tener una pobre exactitud, pero una gran precisión (Fig. 2.4).

- Exactitud

La exactitud (accuracy) es la cualidad de un instrumento de medida por la que se entiende a dar lecturas próximas al valor verdadero de la magnitud medida (Fig. 2.4).

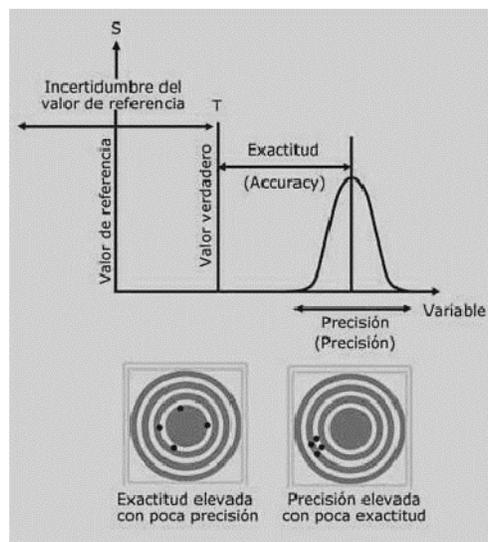


Fig. 2.4 Exactitud y precisión



- Zona muerta

La zona muerta (dead zone o dead band) es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce su respuesta.

- Sensibilidad

La sensibilidad (sensivity) es la razón entre el incremento de la señal de salida o de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo.

- Repetitividad

La repetitividad (repeatability) es la capacidad de reproducción de las posiciones de la pluma o del índice o de la señal de salida del instrumento, al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo. La repetitividad es sinónimo de precisión.

- Histéresis

La histéresis (hysteresis) es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el índice o la pluma del instrumento o la señal de salida para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos, ascendente y descendente.

- Resolución

Es la menor diferencia de valor que el instrumento puede distinguir. En los instrumentos analógicos interviene el operador según donde observe la posición de la aguja, su error de paralaje en la lectura efectuada y la distancia entre los valores marcados en la escala.

- Ruido

Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseada que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados.



2.6.4 Sensores

- Introducción

En este apartado se toman las definiciones de los libros de Antonio Creus Solé y Tony R. Kuphaldt [31] [32], donde se menciona que un transductor es un elemento que convierte una magnitud física en otra y de allí un sensor es un tipo de transductor que convierte la magnitud a medir en una característica eléctrica, en la figura 2.5 se muestra el esquema básico de un sensor.

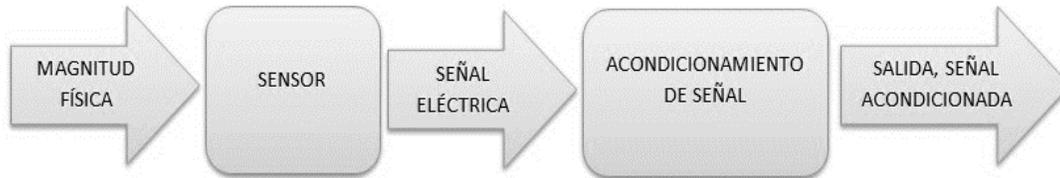


Fig. 2.5 Esquema básico de un sensor

- Clasificación de sensores

De acuerdo con su aplicación, un sensor puede estar formado por materiales metálicos, no metálicos, orgánicos o inorgánicos, y por fluidos, gases, plasmas o semiconductores. Al usar características especiales de esos materiales, los sensores convierten la cantidad o propiedad medida en una salida analógica o digital.

- Sensores según requerimientos de fuente de energía

Pasivos o Auto generativos. Generan directamente una señal eléctrica en respuesta a un estímulo externo sin la necesidad de una fuente de energía externa. Toman energía del estímulo. Termocuplas, piezoeléctricos, etc.

Activos o Modulantes. Requieren fuente de energía externa o una señal de excitación para poder funcionar. Termistor, Inductor, etc.



- Sensores según naturaleza de la señal de salida

Analógicos. La salida es un valor de tensión o corriente comprendida en un rango de valores:

-10 - 10V

4 - 20mA

Temperatura, desplazamiento, intensidad lumínica, etc.

Digitales. La salida toma la forma de escalones o estados discretos. Pulsador, encoder, final de carrera, etc.

- Sensores según variable física de medida

Mecánicos – Eléctricos – Magnéticos – Térmicos – Acústicos – Ultrasónicos – Ópticos – Químicos

Radiación – Láser

2.7 Instrumentación virtual

2.7.1 Definición y antecedentes de la instrumentación virtual

Algunas veces la realización de una medición requiere la intervención de varios instrumentos, unos generan estímulos sobre el dispositivo que se pretende medir y otros recogen la respuesta a estos estímulos. Este conjunto de instrumentos que hace posible la realización de la medición recibe el nombre de sistema de instrumentación. Todo sistema de instrumentación consta de instrumentos, un sistema de interconexión de los mismos y un controlador inteligente que gestiona el funcionamiento de todo el sistema y da las órdenes para que una medición se realice correctamente.

El concepto de instrumentación virtual nace a partir del uso de la computadora personal PC, como una forma de reemplazar equipos físicos por software, permite a los usuarios interactuar con la computadora como si estuviesen utilizando un instrumento real. El usuario manipula un instrumento que no es real, se ejecuta en una computadora, tiene sus características definidas por software, pero realiza las mismas funciones que un equipo real.



La idea es sustituir y ampliar elementos "hardware" por otros "software", y para ello se emplea un procesador que ejecute un programa específico. Este programa se comunica con los dispositivos para configurarlos y leer sus medidas. En algunas ocasiones el usuario final del sistema de instrumentación sólo ve la representación gráfica de los indicadores y botones de control virtuales en la pantalla del ordenador.

El concepto de instrumentación virtual implica: adquisición de señales, el procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y despliegue de los datos e información relacionados con la medición de una o varias señales, interface gráfica hombre-máquina, visualización, monitoreo y supervisión remota del proceso, la comunicación con otros equipos, etc.

Un sistema de instrumentación virtual está enfocado a los instrumentos encargados de medir señales, registrar datos y decidir las acciones de control. Evidentemente, se requiere de una etapa de actuación, que conforma la interface entre la computadora y el sistema a controlar y requiere drivers de potencia o transductores de señal especiales. Además, existen otras etapas auxiliares que no intervienen en el proceso de medida, como es el caso del subsistema de alimentación.

Los inicios de la instrumentación controlable desde una computadora, y de hecho de los sistemas de instrumentación, se sitúan a mediados de los años 60 cuando Hewlett Packard, desarrolló su bus para instrumentación HP-IB (Hewlett Packard Interface Bus) que permitía conectar su gama de instrumentos programables a una PC. Esta interface ganó rápidamente gran popularidad y en 1975 fue aceptada como un estándar: el IEEE488.

Desde aquellos días hasta ahora el estándar ha sufrido varias modificaciones y el bus GPIB (acrónimo de General Purpose Interface Bus, por el que se le conoce habitualmente) se ha convertido en uno de los más populares en el campo de la instrumentación programable. La instrumentación virtual es un concepto introducido por la compañía National Instruments en el año 2001, los cuales crearon un software que le permitía a la computadora realizar mediciones. Basado en el significado del término "virtual" (existencia aparente), al utilizar la PC como "instrumento" es el usuario mismo quién, a través del software, define su funcionalidad y "apariencia" (mediante herramientas informáticas), cambiando el despiece mecánico por un despiece informático. Por ello que se dice que se "virtualiza" el instrumento, ya que su funcionalidad puede ser definida una y otra vez por el usuario y no por el fabricante [33].



2.7.2 Composición de un instrumento virtual

En base a las características de una computadora PC, como plataforma digital que pueden resumirse como:

- Bajo costo relativo
- Alto poder de calculo
- Capacidad de almacenamiento
- Calidad de gráficos
- Arquitectura abierta

Se ha producido su incorporación en forma definitiva como unidad central alrededor de la cual se desarrollan las distintas aplicaciones que forman el sistema de medición. Esto generó un nuevo concepto en la instrumentación electrónica denominado Instrumentación Virtual [33].

2.7.3 LabVIEW

1) Definición del entorno LabVIEW

LabVIEW (acrónimo de Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico. Recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido, pues acelera la productividad. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico [34].

Este programa fue creado por National Instruments (1976) para funcionar sobre máquinas MAC, salió al mercado por primera vez en 1986. Ahora está disponible para las plataformas Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux. La última versión es la 2013, con la increíble demostración de poderse usar simultáneamente para el diseño del firmware de un instrumento RF de última generación, a la programación de alto nivel del mismo instrumento, todo ello con código abierto [35].

2) Fundamentos del entorno de LabVIEW

Los programas de LabVIEW son llamados instrumentos virtuales o VIs ya que su apariencia y operación generalmente imitan a los instrumentos físicos, como osciloscopios y multímetros. LabVIEW contiene



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

una extensa variedad de herramientas para adquirir, analizar, visualizar y almacenar datos, así como herramientas para ayudar a solucionar problemas en el código que escriba. Cuando crea un nuevo VI aparecerán dos ventanas; la ventana del panel frontal y el diagrama de bloques.

- Panel Frontal

Cuando abre un VI nuevo o existente, aparece la ventana del panel frontal del VI. La ventana del panel frontal es la interfaz de usuario para el VI. La Figura 2.6 muestra un ejemplo de una ventana del panel frontal.

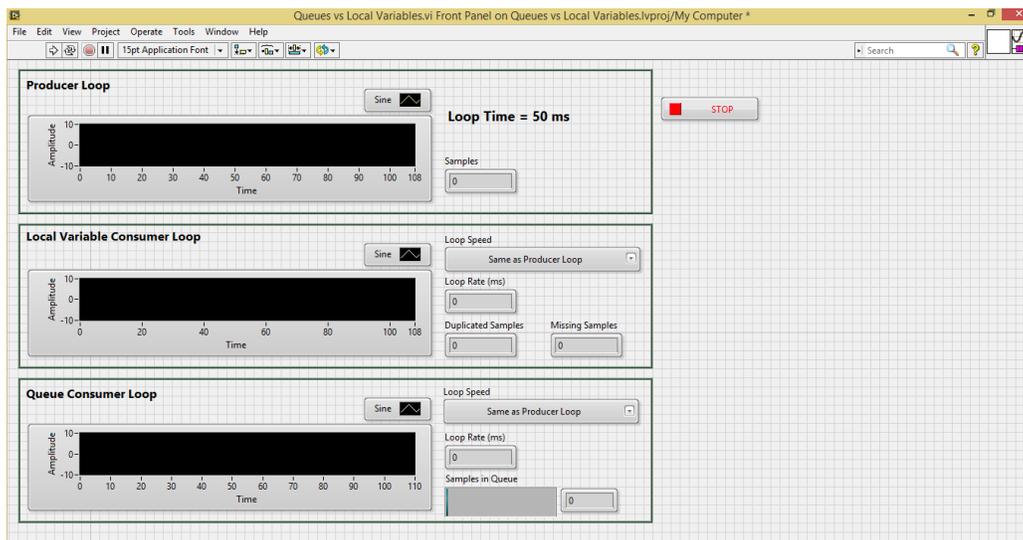


Fig. 2.6 Ejemplo de un panel frontal

- Paleta de Controles

La paleta de Controles contiene los controles e indicadores que utiliza para crear el panel frontal. Puede tener acceso a la paleta de Controles de la ventana del panel frontal al seleccionar View» Controls Palette o al dar clic con botón derecho en cualquier espacio en blanco en la ventana del panel frontal. La paleta de Controles está dividida en varias categorías; puede exponer algunas o todas estas categorías para cumplir con sus necesidades. La Figura 2.7 muestra la paleta de Controles con todas las categorías expuestas y la categoría Moderna expandida.

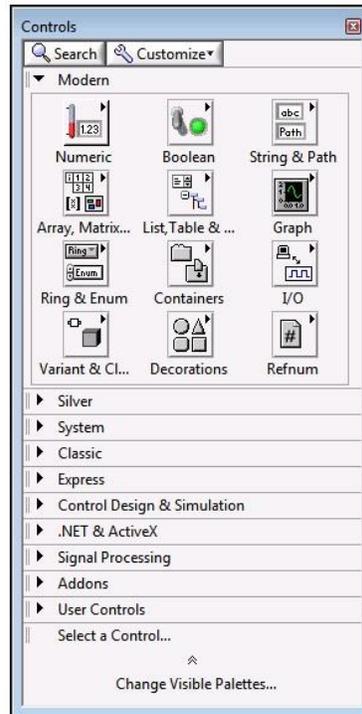


Fig. 2.7 Paleta de Controles

- Diagrama de Bloques

Los objetos del diagrama de bloques incluyen terminales, subVIs, funciones, constantes, estructuras y cables, los cuales transfieren datos junto con otros objetos del diagrama de bloques. En la figura 2.8 se muestra un diagrama de bloques y su panel frontal correspondiente.

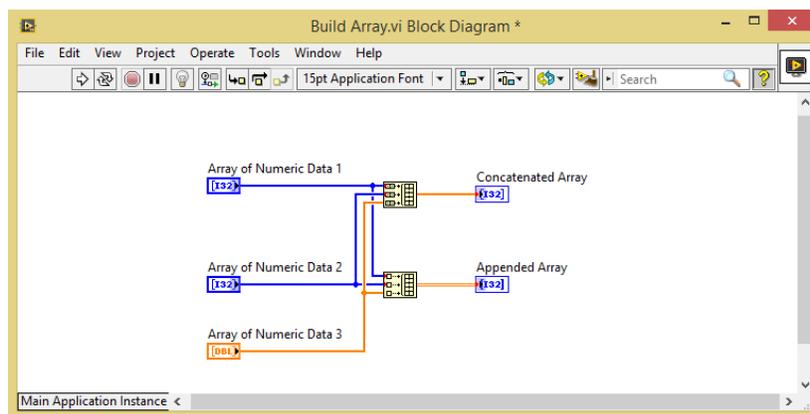


Fig. 2.8 Diagrama de bloques



- Paleta de Funciones

La Paleta de funciones contiene los VI's, funciones y constantes que se utilizan para crear el diagrama de bloques. Tienen acceso a la Paleta de funciones desde el diagrama de bloques al seleccionar View» Functions Palette. La paleta de Funciones está dividida en varias categorías; se puede mostrar y esconder categorías para cumplir con sus necesidades [36]. La Figura 2.9 muestra la Paleta de funciones con todas las categorías expuestas y la categoría de Programación expandida.

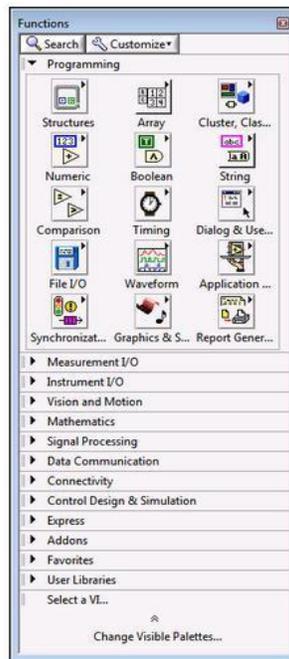


Fig. 2.9 Paleta de funciones

3) Herramientas comunes

- Seleccionar una Herramienta

Se puede crear, modificar y depurar VI's usando las herramientas que proporciona LabVIEW. Una herramienta es un modo de operación especial del cursor del mouse. El modo de operación del cursor corresponde al ícono de la herramienta seleccionada. LabVIEW escoge qué herramienta se debe seleccionar de acuerdo a la ubicación actual del cursor. En la figura 2.10 se muestra la ventana de la paleta de herramientas.



Fig. 2.10 Paleta de herramientas

- Ventanas de Diálogo de Propiedades

Los objetos en la ventana del panel frontal también tienen ventanas de diálogo de propiedades que se pueden usar para cambiar la apariencia o el comportamiento de los objetos. Haga clic con botón derecho en un objeto y seleccione "Properties" en el menú de acceso directo para tener acceso a la ventana de diálogo de un objeto. La Figura 2.11 muestra la ventana de diálogo de propiedades para un medidor. Las opciones disponibles en la ventana de diálogo de propiedades de un objeto son similares a las opciones disponibles en el menú de acceso directo de ese objeto [37].

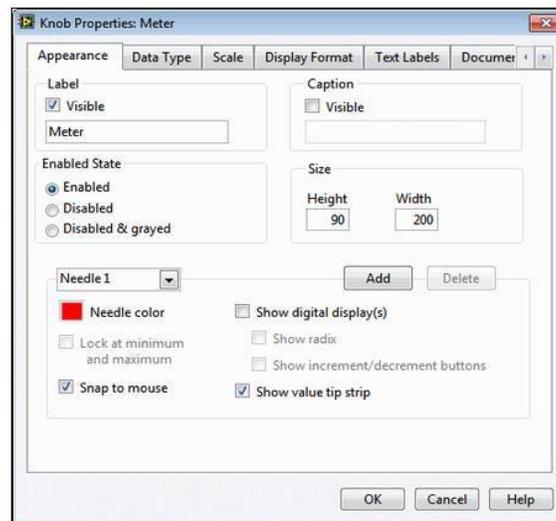


Fig. 2.11 Ventana de dialogo de propiedades de un medidor



4) Herramientas de depuración

El software NI LabVIEW contiene potentes herramientas de depuración para ayudar a identificar áreas problemáticas en su código, así se puede realizar los cambios pertinentes. Es posible que encuentre dos tipos generales de bugs de software: aquellos que no permiten que el programa se ejecute y aquellos que generan malos resultados o comportamiento incorrecto. Si LabVIEW no puede ejecutar un VI, le informará al cambiar la flecha de ejecución por un ícono roto y la ventana de Lista de Errores mostrará las razones específicas por las que el VI está roto. El segundo tipo de bug generalmente es más difícil de rastrear, pero LabVIEW tiene varias herramientas que le permiten visualizar su código conforme se ejecuta, lo cual hace el proceso más fácil [38]. En la tabla 2.1 se muestran las herramientas de depuración.

Tabla 2.1 Herramientas de depuración

	Si un VI no se ejecuta, es un VI roto o no ejecutable. El botón Run aparece roto cuando el VI que está creando o editando contiene errores.
	El botón Highlight Execution para mostrar una animación de la ejecución del diagrama de bloques cuando ejecute el VI. Note el flujo de datos a través del diagrama de bloques.
	El botón Retain Wire Values para guardar los valores del cable en cada punto en el flujo de ejecución para que cuando coloque una sonda de prueba en el cable pueda retener inmediatamente los valores más recientes de los datos que pasaron a través del cable.
	Haga clic en el botón Step Into para abrir un nodo y hacer pausa. Cuando hace clic en el botón Step Into otra vez, ejecuta la primera acción y hace pausa en la siguiente acción del subVI o estructura.
	El botón de Advertencia aparece si un VI incluye una advertencia y si colocó una marca en la casilla Show Warnings en la ventana Error List. Una advertencia indica que hay un problema potencial con el diagrama de bloques, pero no detiene al VI.
	la herramienta de Sonda de Prueba para verificar los valores intermedios en un cable mientras un VI se ejecuta.

5) Estructuras de datos

En el entorno LabVIEW se pueden utilizar variedad de tipos de datos los cuales tendrán comportamientos y manejo dentro de la programación muy diferentes, así como los VI's que controlan sus funciones. En la tabla 2.2 se muestran los tipos de datos básicos.



Tabla 2.2 Datos básicos en LabVIEW

	Tipo de Datos de Cadenas de Caracteres.	Una cadena de caracteres es una secuencia de caracteres ASCII visibles y no visibles.
	Tipo de Datos Numéricos	LabVIEW representa datos numéricos como números de punto flotante, números de punto fijo, enteros, enteros sin signo y números complejos. La precisión Doble y Sencilla, así como los datos numéricos Complejos son representados en LabVIEW con el color naranja. Todos los datos numéricos son representados con el color azul.
	Tipo de Datos Booleanos	LabVIEW almacena datos Booleanos como valores de 8 bits. Un Booleano puede usarse en LabVIEW para representar 0 o 1, o un TRUE o FALSE. Si el valor de 8 bits es cero, el valor Booleano es FALSE. Cualquier valor que no sea cero representa a TRUE.
	Tipo de Datos Dinámicos	La mayoría de los Express VIs aceptan y/o regresan los tipos de datos dinámico, los cuales aparecen como una terminal de color azul oscuro.

Al usar el Convert to Dynamic Data VI y el Convert from Dynamic Data VI, se puede convertir datos de tipo booleano y numéricos de punto flotante en los siguientes tipos de datos:

- Arreglo 1D de formas de onda
- Arreglo 1D de escalar
- Arreglo 1D de escala – el valor más reciente
- Arreglo 1D de escalar – un solo canal
- Arreglo 2D de escalar – las columnas son canales
- Arreglo 2D de escalar – las filas son canales
- Escalar Simple
- Una sola forma de onda
- Arreglos

Algunas veces es benéfico agrupar datos relacionados entre sí. Los arreglos y clusters son para agrupar datos relacionados en LabVIEW. Los arreglos combinan el mismo tipo de datos en una estructura de datos y los clusters combinan datos de múltiples tipos de datos en una estructura de datos.

- Clusters

Los clusters agrupan elementos de datos de diferentes tipos. Un ejemplo de un cluster, es el cluster de error de LabVIEW, el cual combina un valor Booleano, un valor numérico y uno de cadena de caracteres. Un cluster es similar a un registro o a una estructura en lenguajes de programación basados en texto. Construir varios elementos de datos en clusters elimina el desorden de cables en el diagrama de bloques



y reduce el número de terminales del panel conector que los sub VI's necesitan. El panel conector tiene, a lo más, 28 terminales. Si su panel frontal contiene más de 28 controles e indicadores que quiera pasar a otro VI, agrupe algunos de ellos en un cluster y asigne el cluster a una terminal en el panel conector. La mayoría de los clusters en el diagrama de bloques tienen un patrón de cable rosa y terminal de tipos de datos. Los clusters de error tienen un patrón de cable amarillo obscuro y terminal de tipo de datos. Los clusters de valores numéricos, algunas veces conocidos como puntos, tienen un patrón de cable café y terminal de tipo de datos. Puede cablear clusters numéricos cafés a funciones Numéricas, como Suma o Raíz Cuadrada, para realizar la misma operación simultáneamente en todos los elementos del cluster [39].

6) Estructuras de ejecución

Las estructuras de ejecución contienen secciones de código gráfico y controlan cómo y dónde el código dentro se ejecuta. Las estructuras de ejecución más comunes son Ciclos While, Ciclos For y Estructuras de Casos los cuales puede usar para ejecutar la misma sección del código varias veces o para ejecutar una sección diferente del código basada en alguna condición [40].

- Ciclos While. Similar a un Ciclo Do o a un Ciclo Repeat-Until en lenguajes de programación basados en texto.
- Ciclos For. Un Ciclo For ejecuta un sub-diagrama un número de veces establecido.
- Estructuras de Casos. Una estructura de Casos tiene dos o más sub-diagramas o casos. Solamente un sub-diagrama es visible a la vez y la estructura ejecuta solamente un caso a la vez. Un valor de entrada determina cual sub-diagrama se ejecuta.
- Flat Sequence. Consta de uno o más sub-diagramas o casos, que se ejecutan secuencialmente. Se utiliza esta estructura de secuencia plana para asegurar que un sub-diagrama se realiza antes o después de otro sub-diagrama.

El flujo de datos para la estructura de secuencia plana difiere de flujo de datos para otras estructuras. Los capítulos en una estructura de secuencia plana se ejecutan de izquierda a derecha y cuando todos los valores de datos conectados a un marco están disponibles. Esto significa que la entrada de una trama puede depender de la salida de otro marco.



Capítulo 3 Desarrollo, construcción e implementación de la instrumentación

3.1 Plataforma de pruebas instrumentada

En esta sección se explican las características de la plataforma experimental la cual se llevó a cabo en el "Laboratorio de Vibraciones y Rotodinámica" del IPN en la Sección de Estudios de Postgrado e Investigación de la ESIME Zacatenco, bajo la supervisión del jefe de este laboratorio Dr. Julio Cesar Gómez Mancilla. En la figura 3.1 se muestra la plataforma experimental en la cual se realizaron las pruebas, mejor conocido como Machine Fault Simulator.

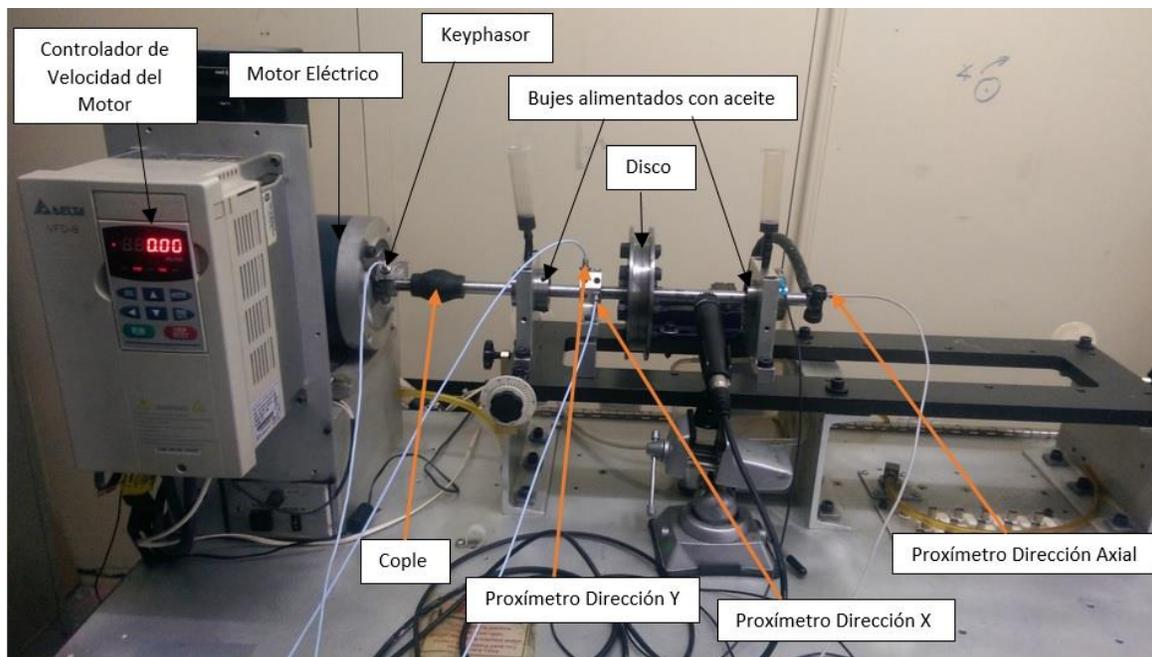


Fig. 3.1 Plataforma experimental instrumentada

En el Laboratorio de Vibraciones y Rotodinámica se cuenta con instrumentos y equipos de pruebas especializados. En esta plataforma se utilizaron dos equipos de adquisición de datos, el primero es el sistema ADRE de GE-Bently Nevada, el cual es un equipo especializado para el análisis de vibraciones, el cual cuenta con varias ventanas de post-proceso, pero no se tiene acceso a los datos que se adquieren, por lo cual no se pueden manipular si se requieren para otro proceso y sólo cuenta con ocho



entradas de sensores de su misma marca, lo cual lo hace un equipo muy cerrado en cuanto a su funcionalidad. Por otro lado, se cuenta en el laboratorio con la plataforma de National Instruments que ofrece tanto hardware como software, a escalas desde el diseño hasta pruebas avanzadas y desde sistemas pequeños hasta grandes sistemas. Ofrece integración sin precedentes con software legado existente, IP y hardware al aprovechar las últimas tecnologías de cómputo. LabVIEW ofrece herramientas para resolver los problemas de hoy en día y la capacidad para la futura innovación, más rápido y de manera más eficiente. Teniendo como uno de sus lemas desplegar software al hardware adecuado, por esta razón se decidió trabajar con esta plataforma ya que es escalable y modulable tanto hardware como software, a continuación, se describen los sistemas ya mencionados.

➤ Sistema de Adquisición de datos (DAIU) y software ADRE® para Windows®

El ADRE® por sus siglas en inglés Automated Diagnostics for Rotating Equipment es un sistema de Diagnóstico Automatizado para Equipo Rotatorio fabricado por la empresa Bently Nevada® y que consta de una unidad "interface" de adquisición de datos 208-P DAUI (208-P Data Acquisition Interface Unit) y del software (programa computacional) ADRE® para Windows®. Tiene capacidad de hasta 8 canales, es portátil y permite obtener una gran gama de gráficas que facilitan de manera considerable el análisis y diagnóstico de vibraciones en maquinaria rotatoria.

Software ADRE® para Windows®. Este Software permite obtener los gráficos siguientes:

- Análisis de amplitud vs. frecuencia (Espectro).
- Análisis de amplitud vs. frecuencia vs. tiempo (Diagrama de Cascada).
- Análisis de amplitud/fase vs. velocidad angular (Diagrama de Bode).
- Análisis de amplitud vs. fase (Diagrama de Nyquist).
- Análisis de amplitud vs. tiempo (Waveform, TimeBase).
- Análisis de los patrones de Lissajous (Órbita).
- Análisis de la línea de centros del eje (Center Line).
- Análisis de los vectores tabulados.

Las ventajas que tiene es que es un software especializado y está diseñado para lo que se requiere, pero sus entradas son limitadas y no se tiene acceso a los datos, sólo se puede ver el post-proceso. En la figura 3.2 se muestra esta plataforma.



Fig. 3.2 Sistema ADRE

➤ National Instruments (NI), LabVIEW

El software LabVIEW es ideal para cualquier sistema de medidas y control y el corazón de la plataforma de diseño de NI. Al integrar todas las herramientas que los ingenieros y científicos necesitan para construir una amplia variedad de aplicaciones en mucho menos tiempo, NI LabVIEW es un entorno de desarrollo para resolver problemas, productividad acelerada y constante innovación.

Combina la potencia del software LabVIEW con hardware modular y reconfigurable para resolver la creciente complejidad involucrada de proporcionar sistemas de medida y control a tiempo y dentro del presupuesto. Más adelante se profundizará en el área de NI LabVIEW, ya que es el software utilizado para el programa realizado [61].

3.2 Hardware

En esta sección se describen los componentes de la plataforma de instrumentación y su funcionamiento. Se limita a explicar las características principales de cada componente, así como el papel que desempeña en la plataforma, teniendo en los Anexos 1 a 6 los enlaces para la consulta de las hojas de datos de los componentes. Cabe mencionar que los componentes utilizados no requieren de una tarjeta de adquisición de datos específica para funcionar, con ello se logra que la plataforma sea amigable con casi cualquier tipo de sensor y actuador ya que se logran acondicionar de manera correcta sin tener



problemas en la interpretación de los transductores ya que la tarjeta que se utiliza es de entradas analógicas y es de uso general.

3.2.1 Tipos de sensores y plataformas utilizadas

Para lograr el objetivo principal se seleccionó con detalle cada elemento. En esta sección se detallan las características de cada elemento que se utilizó, explicando su función y el motivo de su elección para la plataforma (Las fichas técnicas de cada sensor están ubicadas en anexos).

1) Control de velocidad y acondicionador de proxímetros

El control de velocidad y acondicionador de proxímetros (Fig. 3.3), son complementos del rotor kit y de los proxímetros respectivamente, su principal función es acondicionar la señal para poderla adquirir de manera correcta en el software, aunque en este caso se les utiliza para el sistema del Machine Fault Simulator y por lo tanto el controlador de velocidad se utilizó únicamente como fuente de poder para el acondicionador de señales de proxímetros. La razón de esto es porque el sistema Machine Fault Simulator tiene su propio controlador de velocidad. Este conjunto proporciona el voltaje y corriente de alimentación necesaria para su correcto funcionamiento.

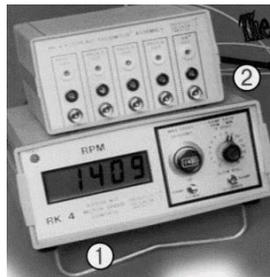


Fig. 3.3 (1) Controlador de velocidad, (2) Acondicionador de señales de proxímetros

2) Proxímetros

El proxímetro es un dispositivo electrónico (Fig. 3.4) que desempeña dos funciones básicas:

- Genera una señal de radiofrecuencia (RF) mediante un circuito oscilador.
- Prepara la señal de RF para extraer datos utilizables mediante un circuito demodulador.



Fig. 3.4 Sensor de proximidad de la serie 3300 XL

En la plataforma experimental se utilizaron 3 proxímetros, dos para un plano de medición y uno para el indicador de velocidad dentro del programa. Las especificaciones del proxímetro utilizado son las siguientes (Anexo 1):

Intervalo Lineal:

1,5 mm (60 mils). Rango lineal comienza en aproximadamente 0,25 mm (10 mils) de objetivo y es 0,25 a 1,75 mm (10 a 70 milésimas de pulgada) (aproximadamente -1 a -13 Vdc).

Respuesta Frecuente:

0 a 10 kHz: 0, -3 dB típico, con un máximo de 305 metros (1.000 pies) de cableado de campo.

Diámetro Del Eje:

Mínimo (configuración estándar XY sonda): 30 mm (1,2 pulgadas), Mínima (sondas de proximidad XY compensa axialmente por 23 mm (0,9 in)): 20 mm (0,8 pulg). Mediciones en diámetros de eje menores a 30 mm (1,2 pulgadas) por lo general requieren una estrecha separación de vibración radial o transductores de posición axial.

3) Acelerómetro Tri-axial

El acelerómetro utilizado en las pruebas fue el acelerómetro Dytran Model #3023A, el cual cuenta con la misma tecnología que las tarjetas de adquisición de National Instruments, IEPE, con la que se puede prescindir de acondicionador de señal (Fig. 3.5). Sus principales características son las siguientes (Anexo 2):

- 10 mV/g sensitivity
- 500g range



- 1.5 to 10,000 Hz frequency range (+15/-5%)
- 4-pin 1/4-28 radial connector
- Adhesive mount
- 3 grams
- Titanium
- Hermetic
- Lightweight
- Triaxial
- IEPE

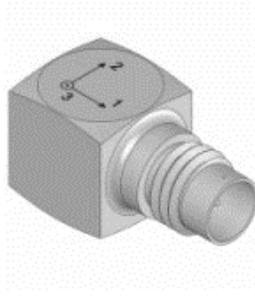


Fig. 3.5 Acelerómetro Triaxial Dytran

4) Micrófono Shure SM57

El SM57 de Shure es un micrófono dinámico unidireccional, tiene un patrón polar cardioide extremadamente eficaz que aísla la fuente de sonido principal y a la vez minimiza el ruido de fondo. Sus principales características son (Anexo 3):

- Respuesta de frecuencia modificada para una reproducción instrumental nítida y una rica captación de voces.
- Reproducción de calidad profesional para microfonía de batería, percusión y amplificación de instrumentos
- Patrón polar cardioide uniforme que aísla la fuente de sonido principal y reduce el ruido de fondo no deseado.
- Sistema de montura anti-vibratoria neumática que reduce el ruido de manejo.
- Extremadamente duradero en las condiciones de uso más exigentes
- Respuesta de frecuencia: 40 to 15,000 Hz



Fig. 3.6 Micrófono Shure

5) Chasis cDAQ-9178 y módulos utilizados

➤ Chasis cDAQ-9178

Para la adquisición de datos con el hardware de National Instruments es necesario un Chasis de este tipo en el cual se insertan las tarjetas de adquisición de datos que se denominan de la serie C y su interface es por USB. En la figura 3.8 se muestra la NI cDAQ-9178 Chasis NI CompactDAQ USB. Sus principales características son (Anexo 4):

- Más de 50 módulos de E/S intercambiables en vivo con acondicionamiento de señales integrado.
- Cuatro contadores/temporizadores de 32 bits de uso general integrados al chasis (acceso a través de módulo digital).
- Ejecuta simultáneamente hasta 7 operaciones de E/S analógica temporizada por hardware, E/S digital o de contador/temporizador.
- Conexiones BNC integradas para relojes y disparos externos (hasta 1 MHz).
- Compatible con el software NI-DAQmx y la generación automática de código usando el DAQ Assistant.

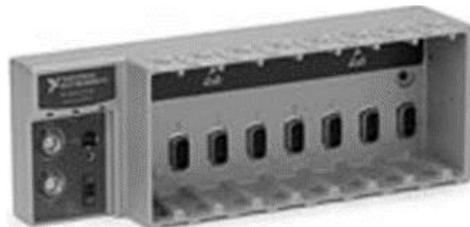


Fig. 3.8 Chasis cDAQ-9178



➤ Módulo NI 9234

Este módulo cuenta con 4 canales para entradas analógicas con tecnología IEPE, la cual evita el uso de acondicionamiento de señal para sensores con esta misma tecnología, como son los acelerómetros tri-axiales usados en la prueba, a este mismo módulo se conectó el micrófono. Sus principales características son (Anexo 5):

- Máxima velocidad de muestreo de 51.2 kS/s por canal; entrada de ± 5 V
- Resolución de 24 bits; rango dinámico de 102 dB; filtros anti-aliasing
- Acoplamiento de AC/DC seleccionable por software; acoplado en AC (0.5 Hz)
- Acondicionamiento de señales IEPE seleccionable por software (0 ó 2 mA)
- Compatibilidad con sensores inteligentes TEDS
- Rango de operación de -40 °C a 70 °C, 5 g de vibración, 50 g de impacto



Fig. 3.9 Módulo NI 9234

➤ Módulo NI 9232

Cuenta con 3 canales para entradas analógicas con tecnología IEPE y AC/DC de ± 30 V, 102.4 kS/s/canal, la cual se utilizó para tres proximetros usados en la prueba, un par del primer plano de medición y el otro para el indicador de velocidad denominado keyphasor. A continuación, sus características principales (Anexo 6):

- 3 canales, entrada analógica simultánea de 102.4 kS/S por canal; ancho de banda de 41 kHz
- Entrada de ± 30 V, resolución de 24 bits, rango dinámico de 99 dB
- Acoplamiento de AC/DC seleccionable por software; acoplado en AC (0.1 Hz)
- Acondicionamiento de señales IEPE seleccionable por software (0 ó 4 mA); detección abierta/en corto IEPE
- Compatibilidad con sensores inteligentes TEDS
- Rango de operación de -40 °C a 70 °C, 5 g de vibración, 50 g de impacto

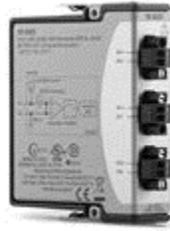


Fig. 3.10 Módulo NI 9232

3.3 Capacidades del software

El software está programado de manera que se pueda agregar cualquier módulo para futuras ampliaciones. El tipo de programación que se emplea es de flujo de datos. LabVIEW constituye un revolucionario sistema de programación gráfica para aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación de datos. Las ventajas que proporciona el empleo de LabVIEW se resumen en las siguientes:

- Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
- El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

También se aplicó LabVIEW ya que es un entorno de programación destinado al desarrollo de aplicaciones, similar a los sistemas de desarrollo comerciales que utilizan el lenguaje C o BASIC. Sin embargo, LabVIEW se diferencia de dichos programas en un importante aspecto, los citados lenguajes de programación se basan en líneas de texto para crear el código fuente del programa, mientras que



LabVIEW emplea la programación gráfica o lenguaje G para crear programas basados en diagramas de bloques.

Para el empleo de LabVIEW no se requiere gran experiencia en programación, ya que se emplean iconos, términos e ideas familiares a científicos e ingenieros, y se apoya sobre símbolos gráficos en lugar de lenguaje escrito para construir las aplicaciones. Por ello resulta mucho más intuitivo que el resto de lenguajes de programación convencionales. LabVIEW posee extensas librerías de funciones y subrutinas. Además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación, LabVIEW incluye librerías específicas para la adquisición de datos, control de instrumentación VXI, GPIB y comunicación serie, análisis presentación y guardado de datos. LabVIEW también proporciona potentes herramientas que facilitan la depuración de los programas.

Los programas desarrollados mediante LabVIEW se denominan Instrumentos Virtuales (VI's), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Sin embargo, son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales.

Los VI's tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros VI's. Todos los VI's tienen un panel frontal y un diagrama de bloques. Las paletas contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los VI's.

El siguiente sistema de adquisición de datos, emula las características principales del sistema ADRE de Bently Nevada, con la ventaja de que se pueden tomar los datos para ciertos post-procesos, como es el caso de este sistema, el cual usa los datos para post-procesarlos con MATLAB. Se detalla cuáles son estos post-procesos y cómo funcionan.

Hablar del tiempo de retardo de cada sistema es hablar de diversos factores. Primero, nuestro sensor hace una medición, esta medición debe llegar a nuestra pantalla, y depende tanto del sistema, de la programación como del equipo de cómputo que se esté utilizando. Cada sistema tiene un tiempo de retardo similar, $4.0 \mu\text{S}$ para el ADRE y $3.4 \mu\text{S}$ para el LabVIEW, esto tomando en cuenta solamente sus equipos. Esta diferencia se puede hacer un poco más amplia si se toma en cuenta que ADRE obliga a utilizar una computadora COMPAQ con Windows 98, mientras LabVIEW tiene una gran variedad de opciones, se utiliza en estas pruebas una laptop Acer con Windows 8 y procesador i7. El tiempo "real" de retardo hasta la salida del programa solo pudo ser calculado en LabVIEW siendo 52 msec en una toma de datos, sin post-proceso de LLE y/o filtros en código de MATLAB.



3.4 Panel Frontal

El panel frontal, es la interface donde el usuario interactúa directamente en el funcionamiento del programa y monitoreo de sensores. Funciona en tiempo real para monitoreo de condición de máquinas rotativas o si se desea abrir un archivo para analizarlo con más detenimiento.

3.4.1 Configuración

La ventana de configuración cuenta con 5 pestañas, Configuración General, Buffer, Gráfica RPM vs Tiempo, Filtro Smoothing + Integración de Señal y LLE (Largest Lyapunov Exponent).

Configuración general:

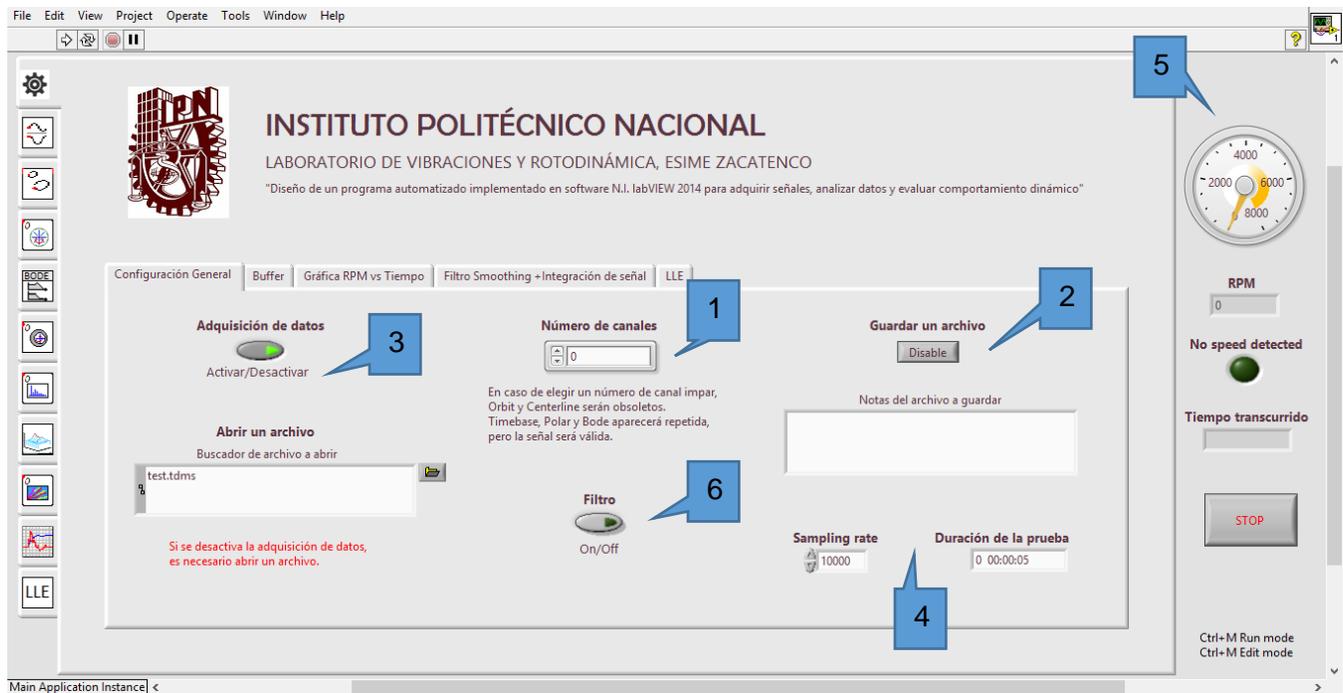


Fig. 3.11 Panel frontal del software, ventana de Configuración general

- 1) Número de canales. En esta parte de la configuración se elige el número de sensores/canales que se van a habilitar, este control va desde 1 a 10 canales disponibles, con la opción de que si fueran necesarios más canales se pueden agregar fácilmente desde el diagrama de bloques. En caso de elegir un número de canal impar, las gráficas de órbitas y centerline no serán funcionales,



ya que para generar ese tipo de gráficas son necesarios por lo menos dos sensores. Timebase, polar y bode aparecerán repetidas, esto es, los gráficos mencionados muestran una gráfica por cada sensor, por lo que la señal proveniente de ese sensor se genera dos veces, pero la señal, aunque repetida, es correcta.

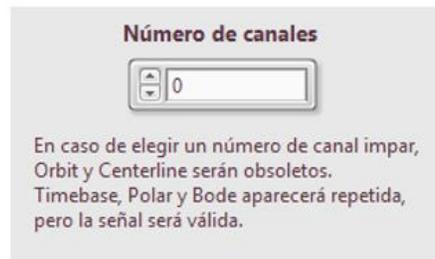


Fig. 3.12 Control para seleccionar el número de canales a utilizar

- 2) Configuración del archivo a guardar. Tiene la opción de habilitarse si desea guardar algún lapso de monitoreo, dando la oportunidad de elegir la ubicación y nombre del archivo, así como anotaciones extras de condiciones de la prueba, ya sea para abrirse en LabVIEW y examinarse después o para utilizar los datos para cierto post-procesamiento de señal en otro programa.



Fig. 3.13 Configuración del archivo a guardar

LabVIEW da la opción de guardar el archivo en diferentes formatos, siendo los recomendados TDMS o de texto, mediante la siguiente ventana de configuración (Esta ventana de configuración no se puede manipular desde el panel frontal).



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

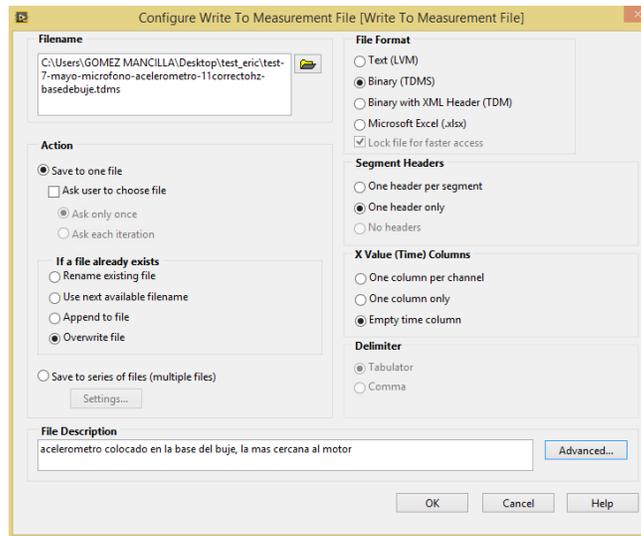


Fig. 3.14 Ventana de configuración para el guardado de archivos

- 3) Habilita la adquisición de datos, si es deshabilitado deberá abrir un archivo. Si se requiere hacer una toma de datos en tiempo real es necesario mantener encendido este botón, de lo contrario se desplegará una ventana para buscar algún archivo y examinar nuevamente los gráficos establecidos.



Fig. 3.15 Control para activar/desactivar la adquisición de datos en tiempo real y buscador de archivos

- 4) En esta parte del panel frontal existen dos controles, uno permite elegir "Sampling Rate" que se utilizará durante la adquisición de datos. El otro control permite definir la duración de la prueba, para que el programa se detenga de forma automática una vez cumplido el tiempo. Si se desea detener el programa antes de que se cumpla el tiempo definido, sólo se debe presionar el botón de STOP que se encuentra del lado derecho del panel frontal.



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"



Fig. 3.16 Control para duración de la prueba y Sampling rate

- 5) El panel del lado derecho siempre será visible sin importar que cambie de ventana, se muestra una serie de indicadores que señalan las RPM y el tiempo transcurrido de la prueba, así como el botón para detener la adquisición de datos.



Fig. 3.17 Indicadores y botón de STOP

En la parte central aparece un led de color verde que cambiará a color rojo si no detecta velocidad; en la parte inferior aparece una nota para cambiar el programa a "Edit mode", que permite hacer cambios tanto de programación como algunas propiedades de gráficos.

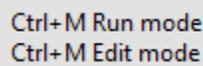


Fig. 3.18 Nota



- 6) En la parte inferior izquierda se encuentran los controles para activar o desactivar un filtro de señales. Si se elige un filtro, se debe configurar desde el diagrama de bloques. Esta configuración permite elegir entre 5 tipos de filtrado distintos: Lowpass, Highpass, Bandpass, Bandstop y Smoothing.



Fig. 3.19 Control para activar/desactivar el filtro

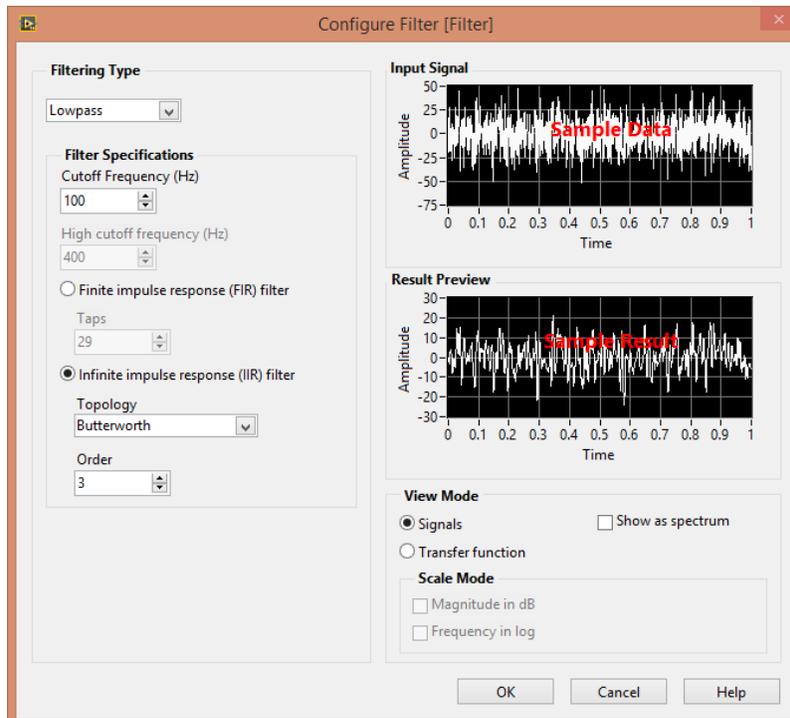


Fig. 3.20 Ventana de configuración del filtro en diagrama de bloques



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

Buffer:

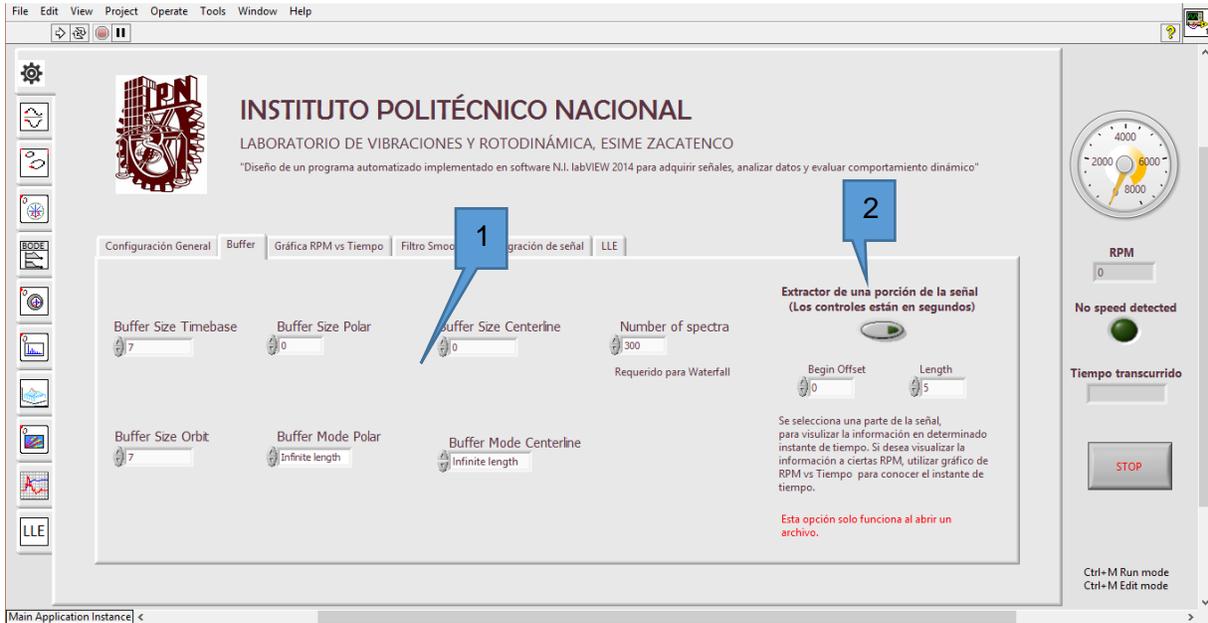


Fig. 3.21 Panel frontal mostrando la configuración de Buffer

- 1) En esta parte de la pestaña se puede cambiar el “buffer” para diferentes aplicaciones, esto se refiere al número de ciclos mostrados en los diferentes gráficos.



Fig. 3.22 Controles para manipular el Buffer de ciertos gráficos

- 2) Extractor de una porción de la señal. Estos controles sólo son utilizados cuando se abre algún archivo, no para adquisición de datos en tiempo real. Una vez activado funciona para visualizar la información de los diferentes gráficos en cierto instante de tiempo o a ciertas RPM. Para utilizar de una forma más fácil, se usa como apoyo el gráfico de RPM vs Tiempo (que es la tercera



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

pestaña de la ventana de configuración) para visualizar esta información, y aplicar la extracción de la señal en el tiempo requerido. El control para la extracción de la señal está en segundos.



Fig. 3.23 Controles para efectuar la extracción de la señal

Gráfica RPM vs Tiempo:

Esta gráfica se colocó principalmente para usar su información cuando se quiera abrir un archivo, y a la vez usar el extractor de señal. Esto es, si se requiere información de los gráficos a ciertas RPM, esta gráfica permite saber en qué instante de tiempo ocurrió esa velocidad y así aplicar el extractor de la señal (el cual se aplica en segundos).

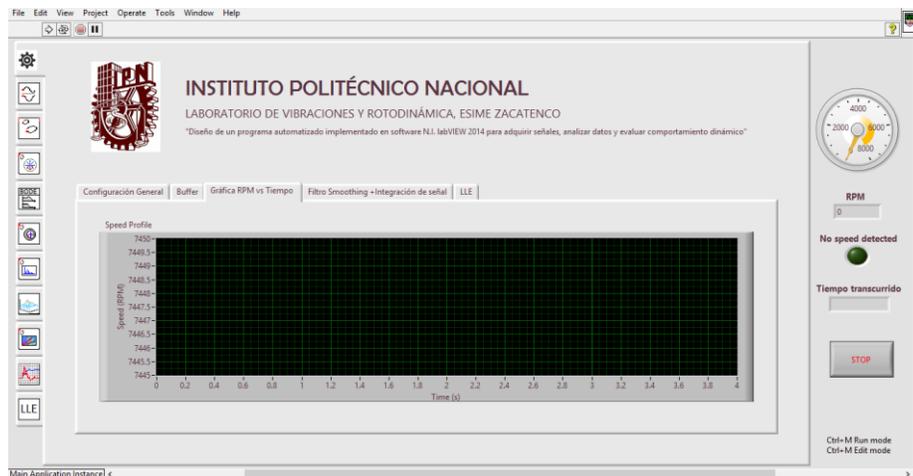


Fig. 3.24 Panel frontal mostrando la configuración de gráfica RPM vs Tiempo



Integración de la señal:

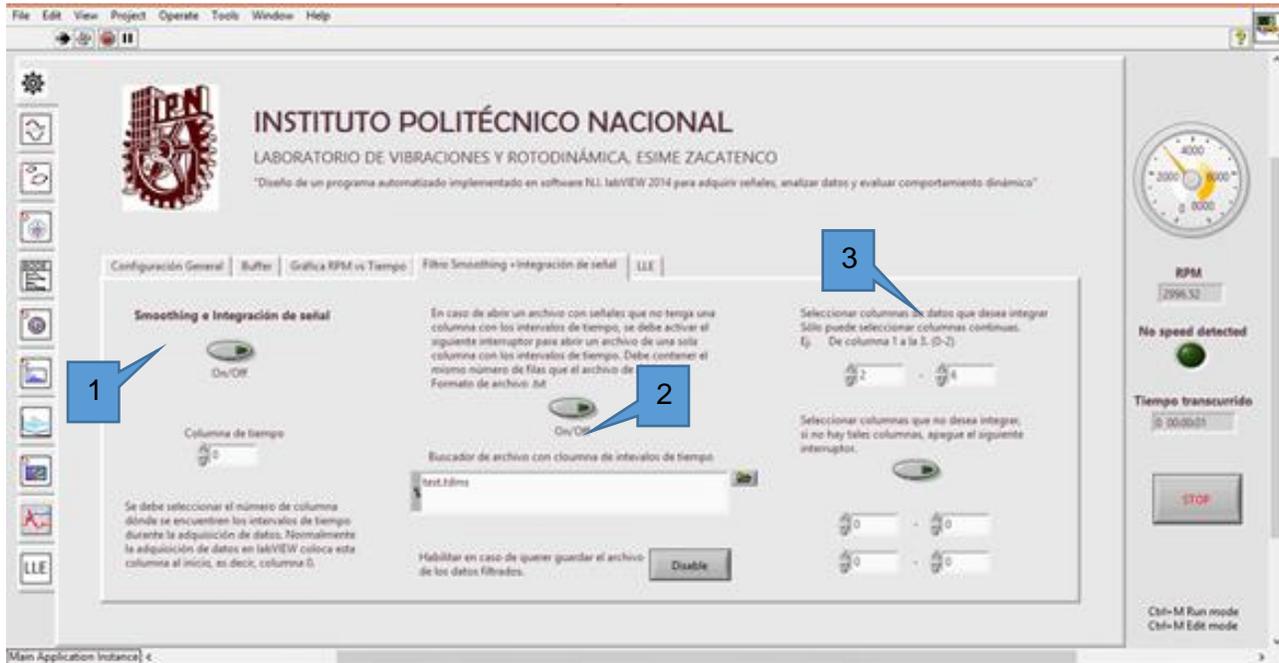


Fig. 3.25 Panel frontal mostrando la configuración de integración de señal

- 1) Esta primera parte del panel es para activar la integración de la señal, esto funciona tanto para adquisición de datos en tiempo real como para abrir un archivo. El control que se encuentra en la parte de abajo, llamado columna de tiempo, es para especificar qué número de columna es la de tiempo, LabVIEW normalmente la coloca en la posición 0.
- 2) En caso de abrir un archivo con señales que no tenga una columna con los intervalos de tiempo, se debe activar el siguiente interruptor para abrir un archivo de una sola columna con los intervalos de tiempo. Debe contener el mismo número de filas que el archivo de datos. Formato de archivo .txt
- 3) Los controles superiores son para seleccionar el número de columna o columnas a la cual se le quiere aplicar este post-proceso. Los controles inferiores sirven para especificar las columnas que no se desean post-procesar, en caso de que no haya ninguna, se debe apagar el interruptor central.



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

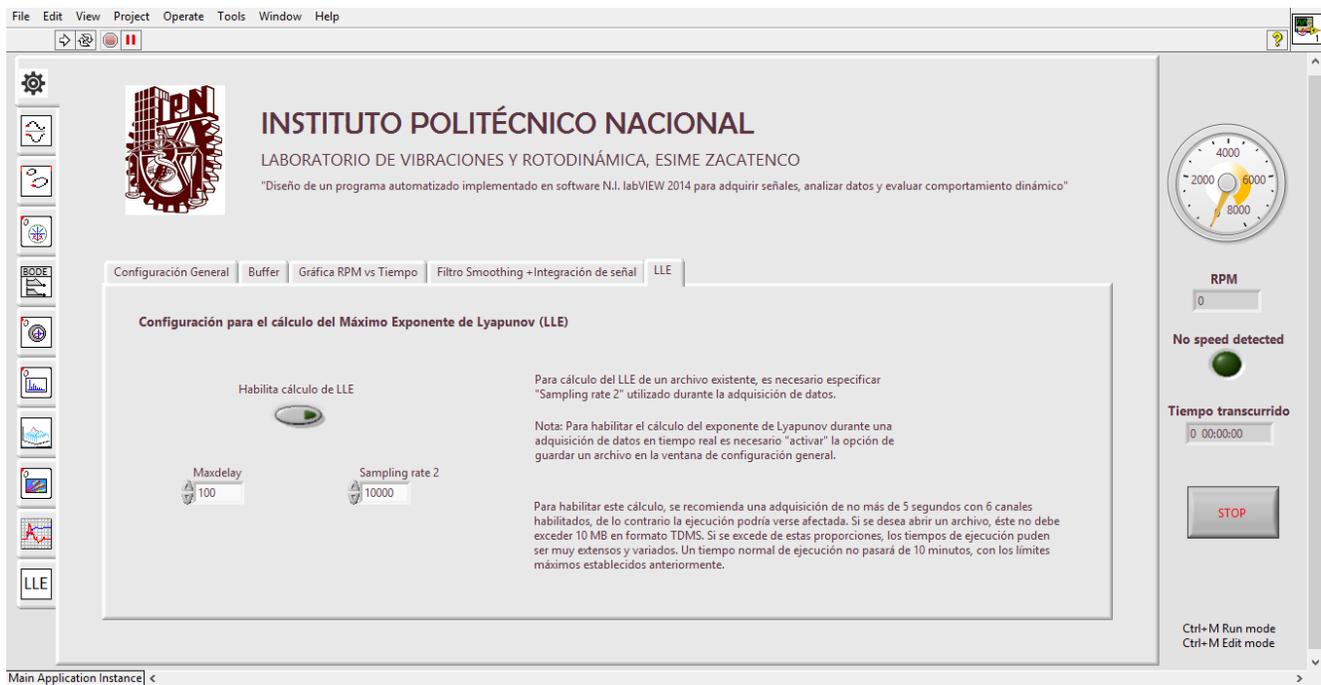


Fig. 3.26 Panel frontal mostrando la configuración de LLE

Programación para el cálculo del máximo exponente de Lyapunov (LLE). Para habilitar esta función durante la adquisición de datos en tiempo real, en necesario, además de colocar el botón en ON, habilitar la opción de guardar un archivo (visto en la ventana de configuración general), ya que el cálculo del LLE se efectúa mediante el ingreso de ese archivo a un código en lenguaje de programación de Matlab, que a su vez se encuentra en una estructura dentro del programa efectuado en LabVIEW que permite leer diferentes lenguajes de programación.

Por otro lado, si se requiere efectuar dicho cálculo a una toma de datos (sin toma de datos en tiempo real), es necesario especificar Sampling Rate que se usó en la prueba.

A continuación, se mencionan los diferentes gráficos que muestra el programa, las diferentes ventanas se seleccionan mediante el menú que se encuentra en el lado izquierdo del programa y cada uno se identifica con una imagen distintiva.

3.4.2 Análisis de amplitud vs. tiempo (Timebase)

Muestra la amplitud de vibración de una o más revoluciones de un eje como una función del tiempo. Mientras que una gráfica de órbita muestra la imagen completa del eje de rotación, la gráfica de timebase



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

le permite obtener una imagen más clara de lo que adquiere un transductor individual en términos de amplitud de vibración.

En la siguiente figura, cada punto representa la posición de impulso de disparo, durante una prueba con el eje ya balanceado, a una velocidad de giro de 3655 rpm y generada por adquisición de señales de dos proxímetros colocados ortogonalmente.

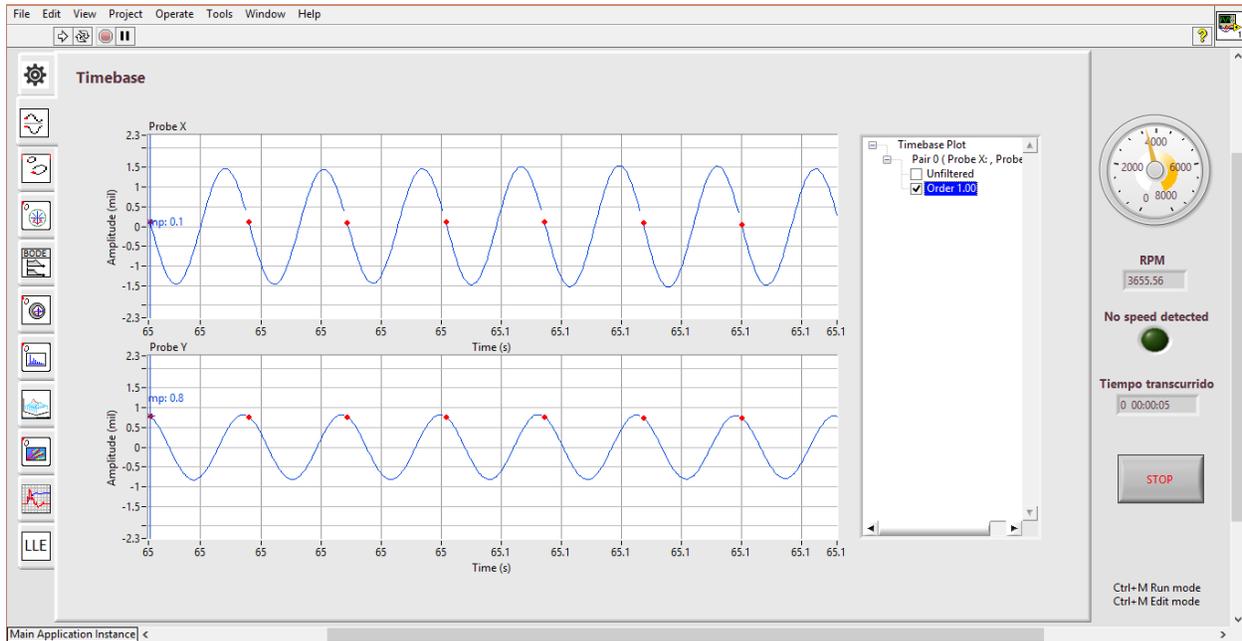


Fig. 3.27 Panel frontal mostrando la ventana de Timebase

El acceso a su configuración está en el diagrama de bloques del programa, donde se puede configurar el número de canales a utilizar, su orientación angular y permite elegir el número de orden del filtro, la ventana es la siguiente:

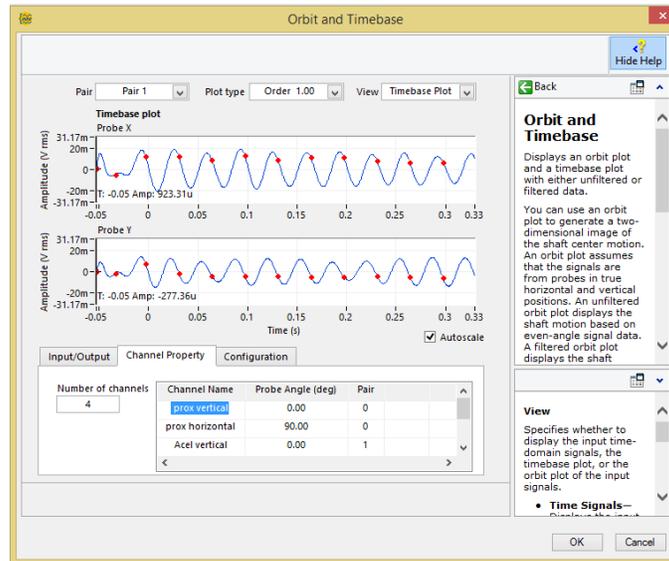


Fig. 3.28 Ventana de configuración de Timebase en diagrama de bloques

3.4.3 Análisis de los patrones de Lissajous (Órbita)

Una gráfica de órbita genera una imagen bidimensional del movimiento del centro del eje. Una órbita no filtrada muestra el movimiento del eje en base a datos de la señal incluso de ángulo. La gráfica no filtrada muestra el movimiento directo del centro del eje y muestra todos los órdenes. Una órbita filtrada muestra el movimiento del eje en base a datos de la señal del vector. La gráfica filtrada muestra el movimiento sincrónico de un orden en particular.

Las sondas de proximidad X y Y, que son dos sondas del mismo tipo se montan con 90 grados de separación. Si no se utilizan dos sondas montadas ortogonalmente, la órbita podría parecer sesgada. La figura siguiente muestra el panel frontal de una órbita con las mismas características de operación que la mostrada en timebase.

En matemáticas, la curva de Lissajous, también conocida como figura de Lissajous o curva de Bowditch, es la gráfica del sistema de ecuaciones paramétricas correspondiente a la superposición de dos movimientos armónicos simples en direcciones perpendiculares:

$$x(t) = A \cos(\omega_x t - \delta_x)$$

$$y(t) = B \cos(\omega_y t - \delta_y),$$



En ocasiones se escribe de la siguiente forma

$$x(t) = a \sin(\omega t + \delta)$$

$$y(t) = b \sin t.$$

Ec. 3.2

En mecánica clásica, la trayectoria de un movimiento armónico complejo bidimensional es una curva de Lissajous. La apariencia de la figura es muy sensible a la relación ω_x/ω_y , esto es, la relación entre las frecuencias de los movimientos en x e y. Para un valor de 1, la figura es una elipse, con los casos especiales del círculo ($A = B$, $\delta = \pi/2$ radianes) y de las rectas ($\delta = 0$) incluidos. Otra de las figuras simples de Lissajous es la parábola ($\omega_x/\omega_y = 2$, $\delta = \pi/2$). Otros valores de esta relación producen curvas más complicadas, las cuales sólo son cerradas si ω_x/ω_y es un número racional, esto es, si ω_x y ω_y son conmensurables. En el caso de que el cociente de frecuencia no sea un racional la curva además de no ser cerrada es un conjunto denso sobre un rectángulo, lo cual significa que la curva pasa arbitrariamente cerca de cualquier punto de dicho rectángulo.

En el caso de que el cociente sí sea un número racional, entonces existirán dos números naturales, n_x y n_y , tales que

$$\frac{\omega_x}{\omega_y} = \frac{n_x}{n_y} = \frac{T_y}{T_x}$$

Ec. 3.3

y, obviamente, el periodo del movimiento resultante es el valor de T

$$T = n_x T_x = n_y T_y$$

Ec.3.4

obtenido utilizando los valores más pequeños que satisfagan la relación (fracción irreducible).

La apariencia de estas curvas a menudo sugiere un nudo de tres dimensiones u otros tipos de nudos, incluyendo los conocidos como nudos de Lissajous, proyección en el plano de las figuras de Lissajous.



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

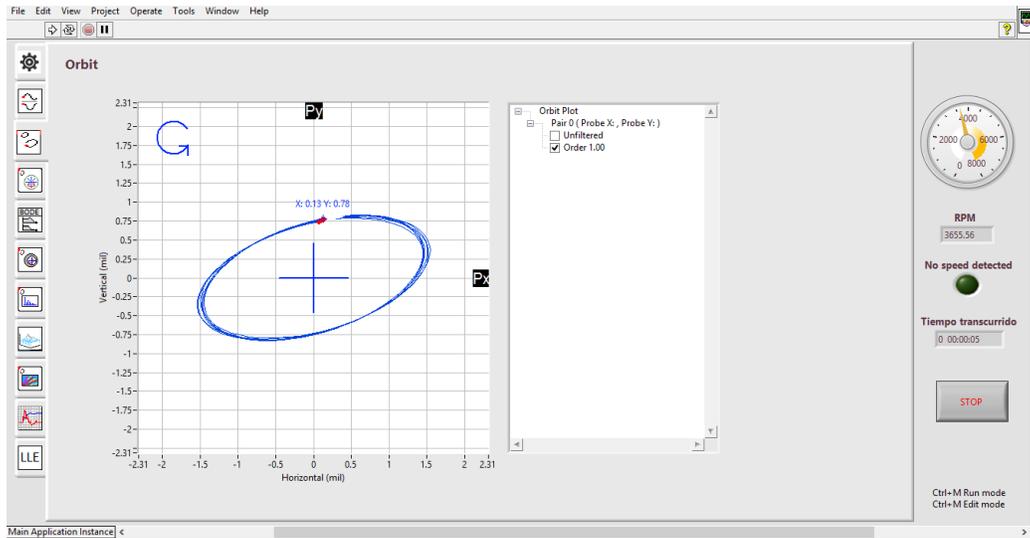


Fig. 3.29 Panel frontal mostrando la ventana de Orbit con orden 1

La configuración específica del bloque encargado de generar las órbitas, es la ventana mostrada en la siguiente figura, al cual se puede acceder desde el diagrama de bloques y comprarte la configuración con la gráfica de timebase.

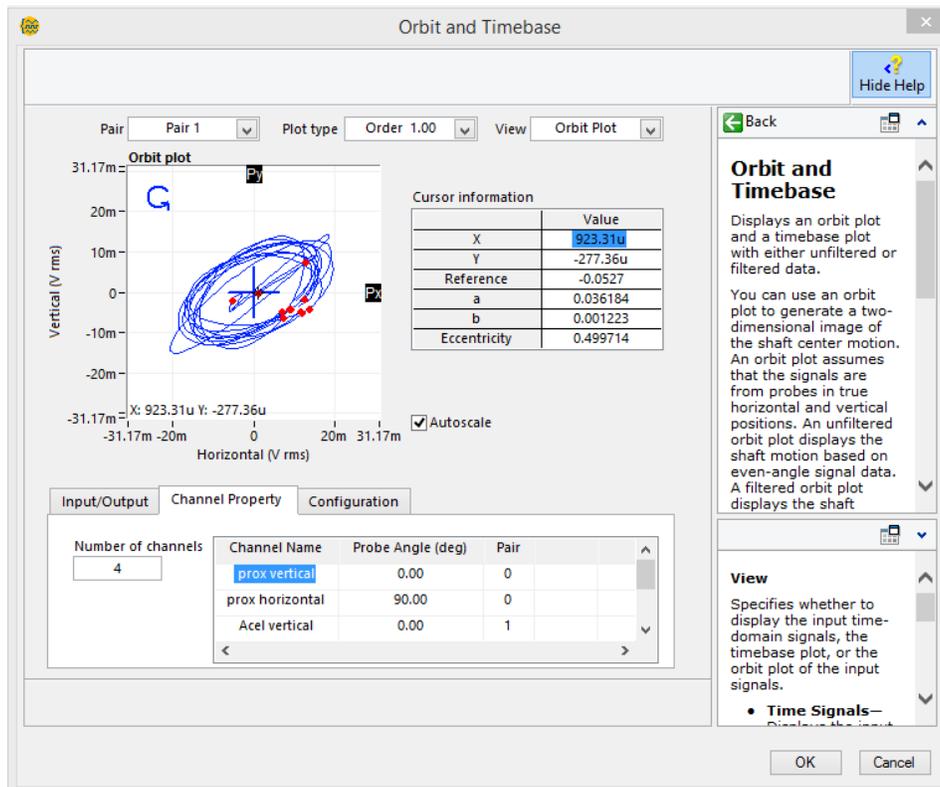


Fig. 3.30 Ventana de configuración de Orbit en diagrama de bloques



3.4.4 Análisis de amplitud vs. fase (Diagrama de Nyquist) Polar

El diagrama Polar muestra valores de amplitud filtrada y retardo en ángulo de fase en función de la velocidad o el tiempo en coordenadas polares. La gráfica utiliza señales en fase y cuadratura recogidas durante la puesta en marcha de la máquina o de desaceleración.

El diagrama Polar muestra la amplitud en una escala de círculos concéntricos, donde la distancia desde el centro determina la magnitud de la amplitud. Las principales marcas a lo largo de la circunferencia del círculo y etiquetas en los cuadrantes ayudan a identificar el valor del conjunto de datos, debido al corto tiempo de adquisición de datos, la gráfica se ve como en la figura 3.31.

La operación básica al aplicar el criterio de Nyquist es un Mapeo del plano S al plano F(s). Este documento presenta el criterio de estabilidad de Nyquist y sus fundamentos matemáticos. Sea el sistema de lazo cerrado que se ve en la Fig. 3.30.1. La función transferencia de lazo cerrado es:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) * H(s)} \quad \text{Ec. 3.5}$$

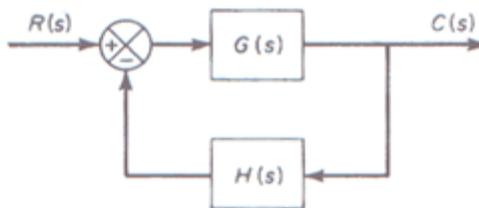


Fig. 3.30.1 Sistema de lazo cerrado

Se tendrá estabilidad cuando todas las raíces de la ecuación característica

$$1 + G(S)H(S) = 0 \quad \text{Ec. 3.6}$$

estén en el semiplano izquierdo s. El criterio de estabilidad de Nyquist relaciona la respuesta de frecuencia de lazo abierto $G(j\omega) H(j\omega)$ a la cantidad de ceros y polos de $1 + G(s) H(s)$ que hay en el semiplano derecho s. Este criterio debido a H. Nyquist es útil en ingeniería de control porque se puede determinar gráficamente de las curvas de respuesta de lazo abierto la estabilidad absoluta del sistema de lazo cerrado, sin necesidad de determinar los polos de lazo cerrado. Se pueden utilizar para el análisis de estabilidad las curvas de respuesta de frecuencia de lazo abierto obtenida analíticamente



o experimentalmente. Esto es muy conveniente porque al diseñar un sistema de control frecuentemente sucede que para algunos componentes no se conoce la expresión matemática y solo se dispone de datos de su característica de respuesta de frecuencia.

El criterio de estabilidad de Nyquist está basado en un teorema de la teoría de las variables complejas. Para entender el criterio primero se han de tratar los con tornos de transformación en el plano complejo.

Se supone que la función transferencia de lazo abierto $G(s)H(s)$ es representable como una relación de polinomios en s . Para un sistema físicamente realizable, el grado del polinomio denominador de la función transferencia de lazo cerrado, debe ser mayor o igual al del polinomio numerador. Esto significa que el límite de $G(s)H(s)$ es cero o una constante para cualquier sistema físicamente construible, al tender s hacia infinito.

Estudio preliminar

La ecuación característica del sistema que se ve en la Fig. 3.30.1 es

$$F(s) = 1 + G(s)H(s) = 0 \quad \text{Ec. 3.7}$$

Se ha de demostrar que a un camino cerrado continuo dado en el plano s que no pasa por ningún punto singular, corresponde una curva cerrada en el plano $F(s)$.

La cantidad y sentido de lazos o rodeos alrededor del origen en el plano $F(s)$ por una curva cerrada, juega un papel importante en lo que sigue, pues más adelante se ha de relacionar la cantidad y sentido de lazos o rodeos con la estabilidad del sistema.

Sea, por ejemplo, la siguiente función transferencia de lazo abierto:

$$G(s) * H(s) = \frac{6}{(s+1)*(s+2)} \quad \text{Ec. 3.8}$$

La ecuación característica es:

$$F(s) = 1 + G(s) * H(s) = 1 + \frac{6}{(s+1)*(s+2)} = \frac{(s+1.5+2.4j)*(s+1.5-2.4j)}{(s+1)*(s+2)} = 0 \quad \text{Ec. 3.9}$$

La función $F(s)$ es analítica en cualquier parte del plano s , excepto en sus puntos singulares. Para cada punto de análisis en el plano s , corresponde un punto en el plano $F(s)$. Por ejemplo, Si $s = 1 + 2j$, entonces $F(s)$ es:



$$F(1+2j) = 1 + \frac{6}{(2+2j)(3+2j)} = 1.12 - 5.77j$$

Ec. 3.10

Entonces el punto $s = 1 + 2j$ en el plano s se transforma en el punto $1.12 - 5.77j$ en el plano $F(s)$.

Entonces, como se indicó antes, para un trayecto cerrado continuo dado en el plano s , que no atraviesa ningún punto singular, corresponde una curva cerrada en el plano $F(s)$.

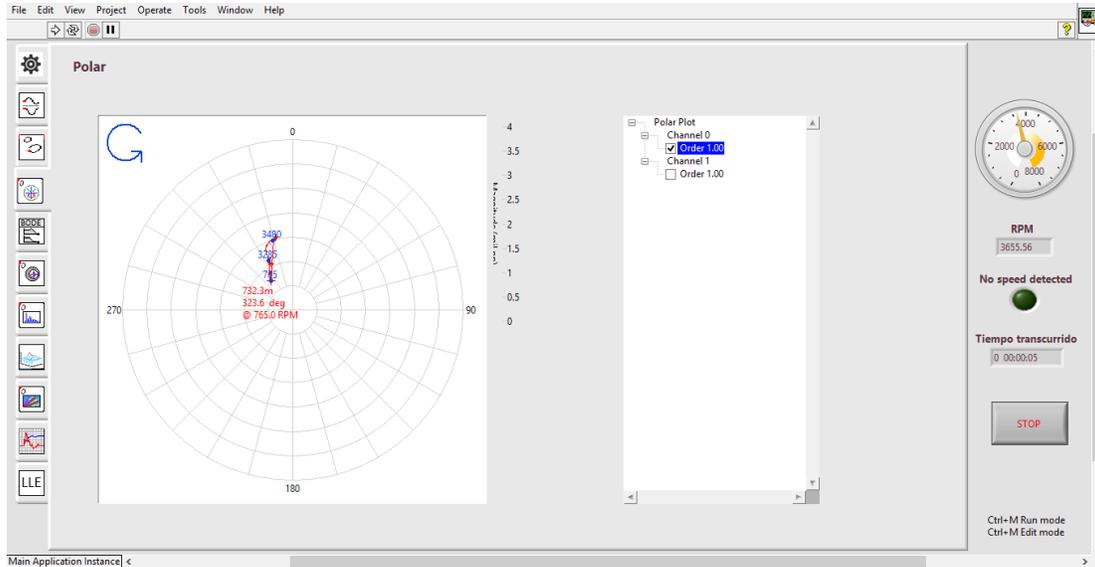


Fig. 3.31 Panel frontal mostrando la ventana de Polar

Al igual que las órbitas, se accede a su ventana de configuración desde el diagrama de bloques y en ella permite configurar el número de canales y su orientación angular, así como las unidades en radianes o grados, debido a que comparte la ventana de configuración con el diagrama de bode, brinda opciones como la de elegir amplitud respecto de velocidad, tiempo o cierto número de RPM, la ventana de configuración de muestra a continuación.

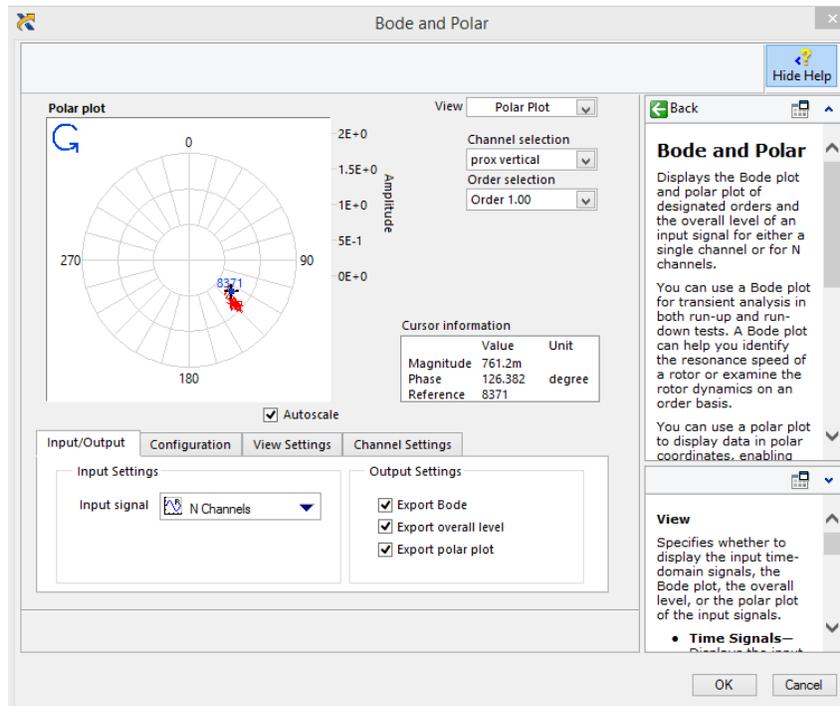


Fig. 3.32 Ventana de configuración de Polar en diagrama de bloques

3.4.5 Análisis de amplitud/fase vs. velocidad angular (Diagrama de Bode)

Bode plot muestra de forma sincronizada el cambio de la amplitud filtrada y el ángulo de fase como función de la velocidad de rotación del eje. La gráfica también muestra la amplitud directa (vibración total) en el cursor de información de amplitud.

Puede utilizar un diagrama de Bode para el análisis de transitorios, tanto en carrera de incremento de velocidad como también en decremento. Un diagrama de Bode ayuda a identificar la velocidad de resonancia de un rotor. En la Fig. 3.33 se muestra un diagrama de bode solo con una pequeña muestra de datos al borde de 3655 rpm y en mismas condiciones mencionadas en Timebase.

El diagrama de bode consta de dos trazados:

- Diagrama del logaritmo del módulo de una función de transferencia sinusoidal.
- Diagrama del ángulo de fase.

Ambos representados en función de la frecuencia en escala logarítmica.



Representación de la amplitud logarítmica de $G(j\omega)$ o logaritmo de la magnitud de $G(j\omega)$

$$L_m = 20 \log_{10} |G(j\omega)| \quad < \text{dB} > \quad \text{Ec. 3.11}$$

Ventajas de usar diagrama logarítmico:

- Multiplicación de amplitudes \rightarrow adición
- Se dispone de un método simple para trazar una curva aproximada del log de la amplitud

Forma general de una función de transferencia:

$$G(j\omega) = \frac{K(T_a j\omega + 1)(T_b j\omega + 1) \dots e^{-j\omega t}}{(j\omega)^n (T_1 j\omega + 1) \left[1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} j\omega + \frac{1}{\omega_n^2} (j\omega)^2 \right]}$$

Ec. 3.12

Magnitud

$$20 \log_{10} |G(j\omega)| = 20 \log K + 20 \log |T_a j\omega + 1| + 20 \log |T_b j\omega + 1| + \dots$$

$$\dots - 20 n \log |(j\omega)| - 20 \log |T_1 j\omega + 1| - 20 \log \left[1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} j\omega + \frac{1}{\omega_n^2} (j\omega)^2 \right]$$

Ec. 3.13

Angulo de fase

$$\angle G(j\omega) = \angle K + \angle(T_a j\omega + 1) + \angle(T_b j\omega + 1) \dots - n \angle j\omega - \angle(T_1 j\omega + 1) -$$

$$- \angle \left(1 + \frac{2\zeta}{\omega_n} j\omega + \frac{1}{\omega_n^2} (j\omega)^2 \right) + \angle -\omega T$$

Ec. 3.14



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

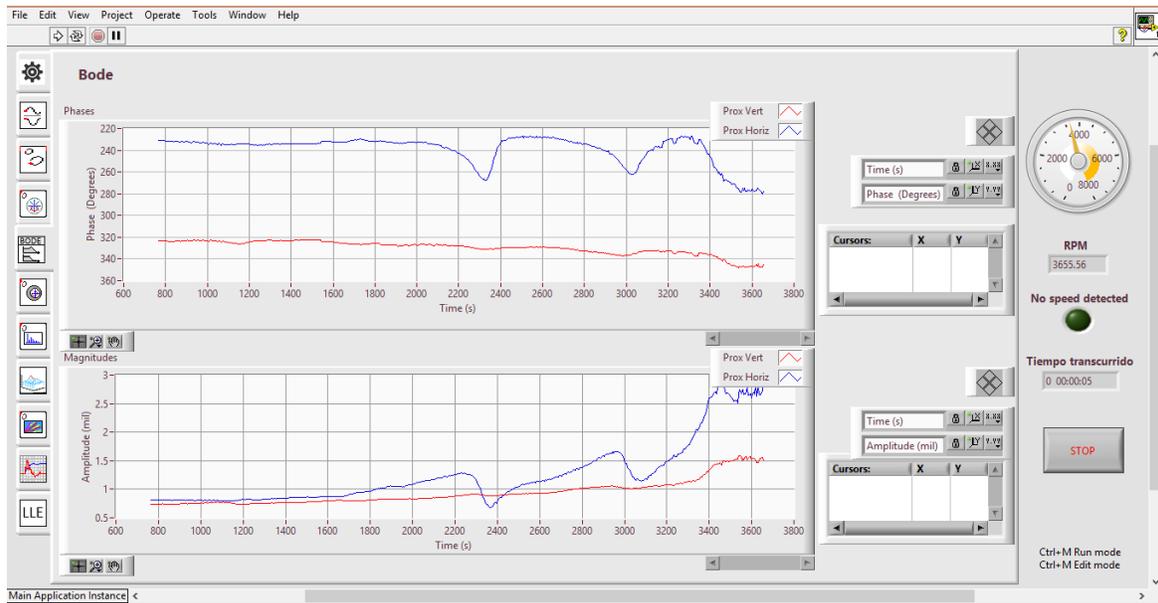


Fig. 3.33 Panel frontal mostrando la ventana de Bode

Comparte su ventana de configuración con el gráfico polar, y al elegir en la parte superior derecha la opción de Polar Plot se ve la siguiente ventana:

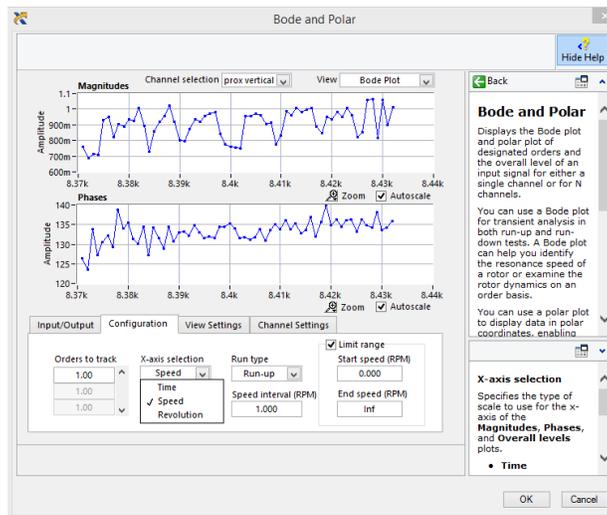


Fig. 3.34 Ventana de configuración de Bode en diagrama de bloques



La imagen inferior muestra la ventana de configuración de Centerline, donde se pueden configurar los canales, su dirección y la referencia.

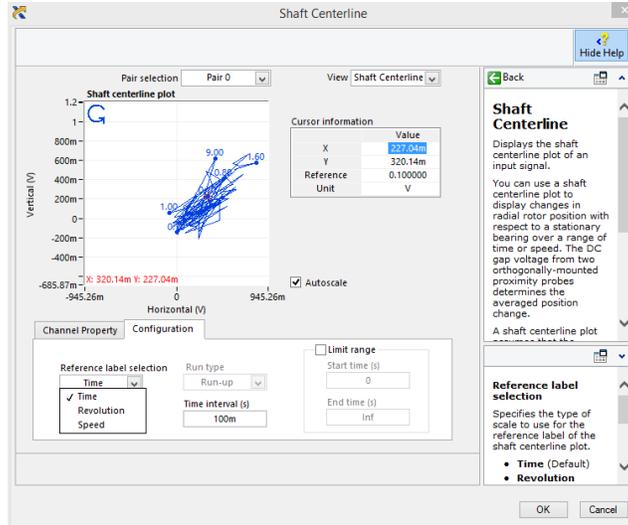


Fig. 3.37 Ventana de configuración de Centerline en diagrama de bloques

3.4.7 Análisis de amplitud vs. frecuencia (Espectro)

Spectrum plot muestra la amplitud de cada frecuencia discreta en una muestra de forma de onda. Una forma de onda se hace pasar a través de una transformada rápida de Fourier que resulta en una presentación en el dominio de la frecuencia, que es similar a la de un analizador de espectro. El eje horizontal puede tener unidades de Hertz u órdenes de la velocidad de rotación del eje.

Matemáticamente el análisis espectral está relacionado con una herramienta llamada transformada de Fourier o análisis de Fourier. Dada una señal o fenómeno ondulatorio de amplitud $s(t)$ esta se puede escribir matemáticamente como la siguiente combinación lineal generalizada:

$$s(t) = \int_{\mathbb{R}} A(\nu) e^{-2\pi i \nu t} d\nu$$

Ec. 3.15

Es decir, la señal puede ser concebida como la transformada de Fourier de la amplitud $A=A(\nu)$. Ese análisis puede llevarse a cabo para pequeños intervalos de tiempo, o menos frecuentemente para



intervalos largos, o incluso puede realizarse el análisis espectral de una función determinista (tal como $\frac{\sin(t)}{t}$). Además, la transformada de Fourier de una función no sólo permite hacer una descomposición espectral de los formantes de una onda o señal oscilatoria, sino que con el espectro generado por el análisis de Fourier incluso se puede reconstruir (sintetizar) la función original mediante la transformada inversa. Para poder hacer eso, la transformada no solamente contiene información sobre la intensidad de determinada frecuencia, sino también sobre su fase. Esta información se puede representar como un vector bidimensional o como un número complejo. En las representaciones gráficas, frecuentemente sólo se representa el módulo al cuadrado de ese número, y el gráfico resultante se conoce como espectro de potencia o densidad espectral de potencia (SP):

$$SP_{\nu} \propto |A(\nu)|^2 \quad \text{Ec. 3.16}$$

La FFT inversa

Resulta que todo algoritmo que se implemente para calcular la FFT discreta con modificaciones simples en sus entradas, puede ser utilizado para el cálculo de la inversa. La ecuación de la directa:

$$F(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \cdot e^{-j2\pi\mu x / N} \quad \text{Ec. 3.17}$$

Y

$$f(x) = \sum_{\mu=0}^{N-1} F(\mu) \cdot e^{j2\pi\mu x / N} \quad \text{Ec. 3.18}$$

para la inversa, permiten el siguiente procedimiento:

-Tomando la ecuación (3.18) en su conjugada y dividiendo ambos lados por N, resulta

$$\frac{1}{N} f^*(x) = \frac{1}{N} \sum_{\mu=0}^{N-1} F^*(\mu) \cdot e^{-j2\pi\mu x / N} \quad \text{Ec. 3.19}$$

al comparar se aprecia que el lado derecho tiene la misma forma que la ecuación (3.17). Entonces, usando $F^*(\mu)$ como entrada para el algoritmo empleado en el cálculo de la FFT directa, el resultado que se obtiene es $f^*(x)/N$.



Al resultado obtenido se le conjuga (se obtiene su complejo conjugado) y se multiplica por N, resultando la inversa deseada (f) x. Para el caso bidimensional corresponde lo siguiente:

$$f^*(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{\mu=0}^{N-1} \sum_{\nu=0}^{N-1} F^*(\mu, \nu) \cdot e^{-j2\pi(\mu x + \nu y)/N}$$

Ec. 3.20

Entonces, aplicando $F^*(\mu, \nu)$, a un algoritmo desarrollado para el cálculo de la transformada directa, el resultado obtenido será $f^*(x, y)$; tomando el complejo conjugado de este resultado se obtendrá $f(x, y)$. Naturalmente, si $f(x)$ o $f(x, y)$ son reales, la operación de complejo conjugado es innecesaria.

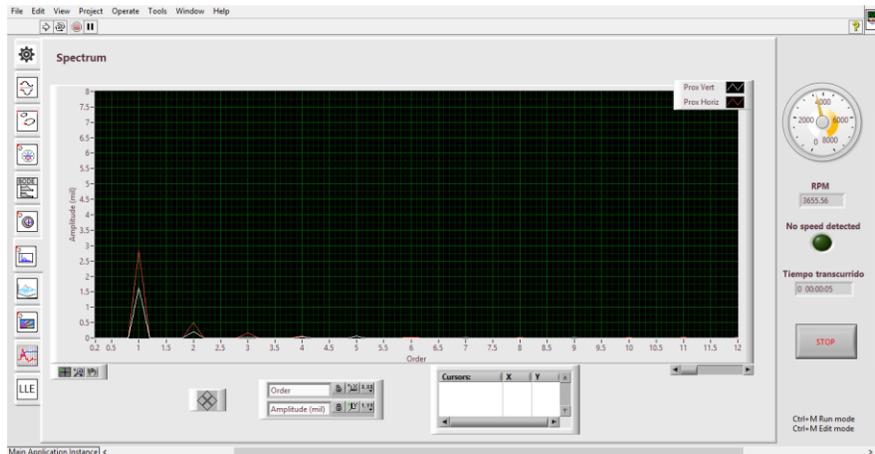


Fig. 3.38 Panel frontal mostrando la ventana de Spectrum

La siguiente figura muestra la ventana de configuración del Spectrum, donde se puede seleccionar multi-canal o uno sólo, además del orden mostrado y escala.



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

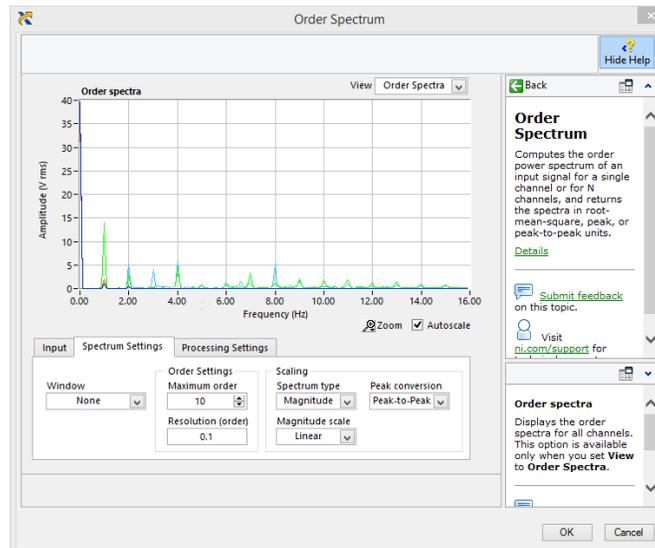


Fig. 3.39 Ventana de configuración de Spectrum en diagrama de bloques

3.4.8 Análisis de amplitud vs. frecuencia vs. tiempo (Diagrama de Cascada)

Muestra una serie de espectros como función del tiempo. Cada espectro traza la amplitud en una muestra de forma de onda como función de la frecuencia. Cada forma de onda asíncrona se hace pasar a través de una transformada rápida de Fourier resultante en una presentación de dominio de frecuencia similar a la de un analizador de espectro.

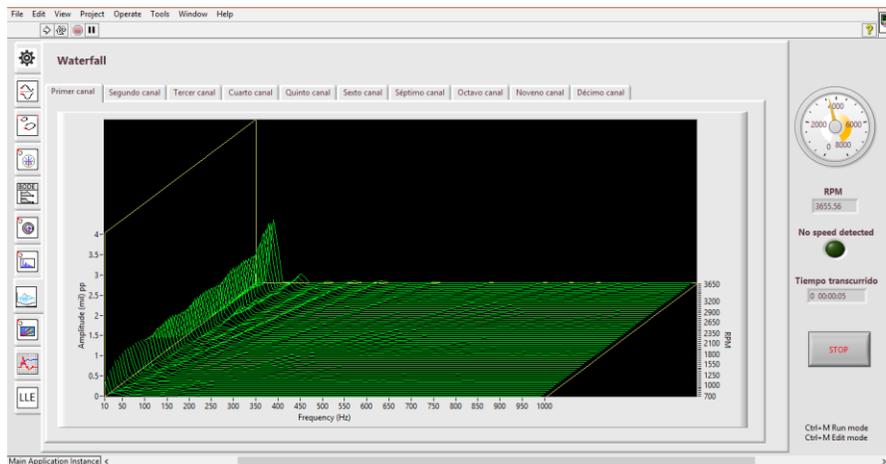


Fig. 3.40 Panel frontal mostrando la ventana de Waterfall



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

La ventana de configuración de la gráfica waterfall es compartida con la gráfica de colormap, comparable con la gráfica de cascade del sistema ADRE, ya que esta ventana permite cambiar los conceptos de cada eje de la gráfica, tal como se puede observar en el menú desplegado de la siguiente imagen.

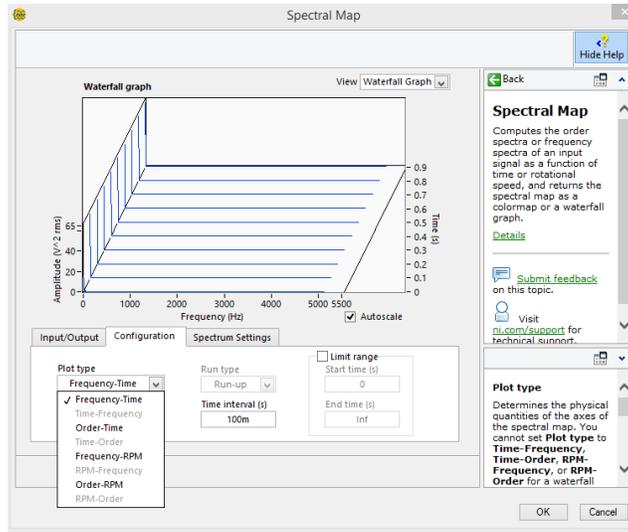


Fig. 3.41 Ventana de configuración de Waterfall en diagrama de bloques

3.4.9 Análisis de amplitud vs. frecuencia vs. tiempo (Colormap)

Calcula el orden o la frecuencia del espectro de una señal de entrada como una función del tiempo o velocidad de rotación, y devuelve el mapa espectral como un mapa de colores o un gráfico de cascada. La ventana de configuración es la misma ventana del gráfico Waterfall.

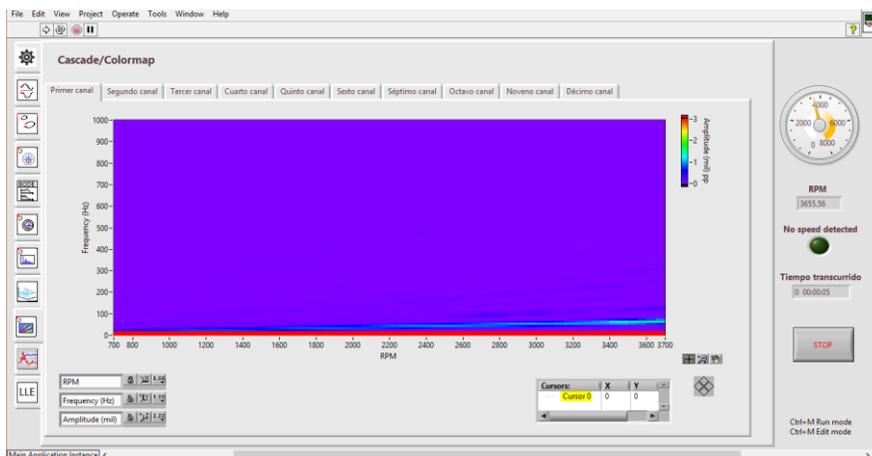


Fig. 3.42 Panel frontal mostrando la ventana de Cascade/Colormap



3.4.10 Señales vs Tiempo

Esta ventana muestra un gráfico donde aparecerán todas las señales usadas en la prueba, esto es acelerómetros, proximetros y micrófono/sonómetro, su amplitud en función del tiempo, cada uno con sus unidades correspondientes. Las señales son las mostradas en la siguiente imagen, es necesario mencionar que los sensores utilizados son proximetros, por lo cual las amplitudes muestran los cambios de voltaje durante la prueba.

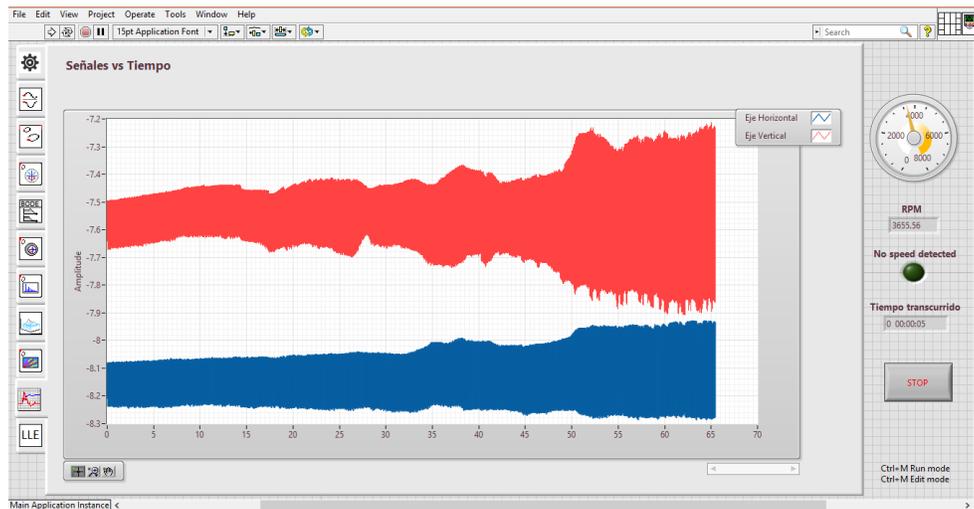


Fig. 3.43 Panel frontal mostrando la ventana de Señales vs Tiempo

3.4.11 Lyapunov

Los exponentes de Lyapunov merecen un lugar especial, en esta tesis se agregaron los códigos en MATLAB para el cálculo de los siguientes parámetros no lineales, incluyendo LLE, dichos códigos fuente son parte del trabajo de tesis del alumno de doctorado M. C. Erick Eduardo Huesca Lazcano, también alumno del Dr. Julio Cesar Gómez Mancilla. LLE determinan la razón de dependencia de un sistema en las condiciones iniciales considerando la divergencia o convergencia de órbitas cercanas. Un sistema de m dimensiones tiene m posibles exponentes de Lyapunov; la existencia de LLE's positivos define direcciones inestables. La rutina *lyapmax.exe* implementa el algoritmo de Wolf; los parámetros de entrada son τ y m , entonces el LLE es calculado de:

$$\lambda_{\infty} = \frac{1}{T} \log \frac{\|\delta x(t+T)\|}{\|\delta x(t)\|} \quad \text{Ec. 3.21}$$



Cálculos numéricos implícitos calculan el crecimiento de la perturbación experimental δx basado en el sistema Jacobiano J ,

$$\frac{d\delta x}{dt} = J(x)\delta x \quad \text{Ec. 3.22}$$

Tiempo de retardo (τ). Para calcular el tiempo de retardo, el método de la información mutua (Mutual Information MI) permite resultados satisfactorios, al igual que otros métodos (i. e., auto correlación) no incluido en este trabajo. Del estado $x_{t+\tau}$ La ecuación para información mutua es:

$$I(\tau) = -\sum_{h=1}^j \sum_{k=1}^j P_{h,k}(x_t, x_{t+\tau}) \ln \left[\frac{P_{h,k}(x_t, x_{t+\tau})}{P_h(x_t)P_k(x_{t+\tau})} \right] \quad \text{Ec. 3.23}$$

Donde $P(x_t)$ y $P(x_{t+\tau})$ son las probabilidades de que una variable asuma un cierto valor dentro de h -ésimo y el k -ésimo contenedores, respectivamente. $P(x_t, x_{t+\tau})$ es la probabilidad de unión de que x_t esté en el contenedor h y $x_{t+\tau}$ en el contenedor k . Si variables x_t y $x_{t+\tau}$ son completamente independientes, esto significa que esas variables no están correlacionadas, e $I(\tau) = 0$.

Dimensión Embebida (m). Principalmente es proporcionado un espacio Euclidiano con una dimensión suficientemente grande, tal que, la dinámica del sistema pueda ser desplegada sin ambigüedad. El método False Nearest Neighbour (FNN) es un algoritmo eficiente que determina la dimensión embebida mínima (m). El número de "vecinos" cambia a lo largo del camino de la señal,

$$r_D^2 = \sum_{k=0}^{m-1} [x_{n+kt} - x_{n+kt}^r]^2 \quad \text{Ec. 3.24}$$

Añadiendo el tiempo de retardo adecuado, se transforma m a $m+1$, creando un nuevo sistema de coordenadas, si las distancias cambian de una a otra dimensión son llamadas "falsos vecinos".

El método previo es implementado en *fnn.exe*. Las entradas son τ y la mínima y máxima dimensión embebida para los que el FNN es determinado.

La ventana donde se muestran los datos referentes al cálculo del máximo exponente de Lyapunov (LLE) contiene distintas pestañas que se muestran a continuación:



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

1. En esta pestaña se muestra la tabla de datos adquiridos, la cual describe la adquisición hecha por cada sensor, dando una columna por cada uno de ellos. También muestra el cálculo de Tau, Time Step, Mutual Information y Delays.

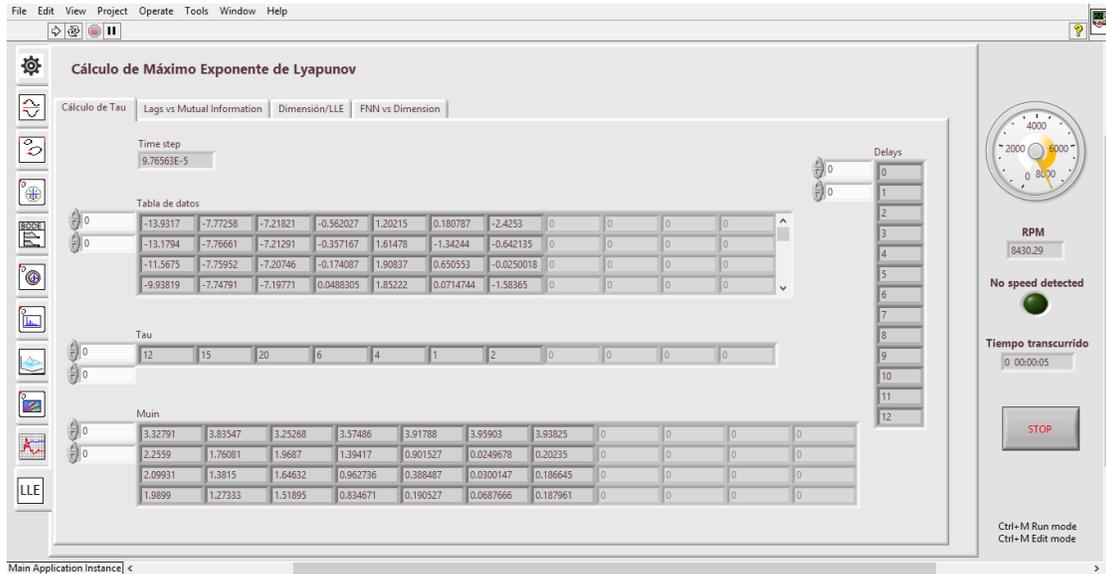


Fig. 3.44 Panel frontal mostrando la ventana de Cálculo de Tau

2. La segunda ventana es una gráfica donde los valores del eje x están dados por Delays y el eje y, está dado por Mutual Information.

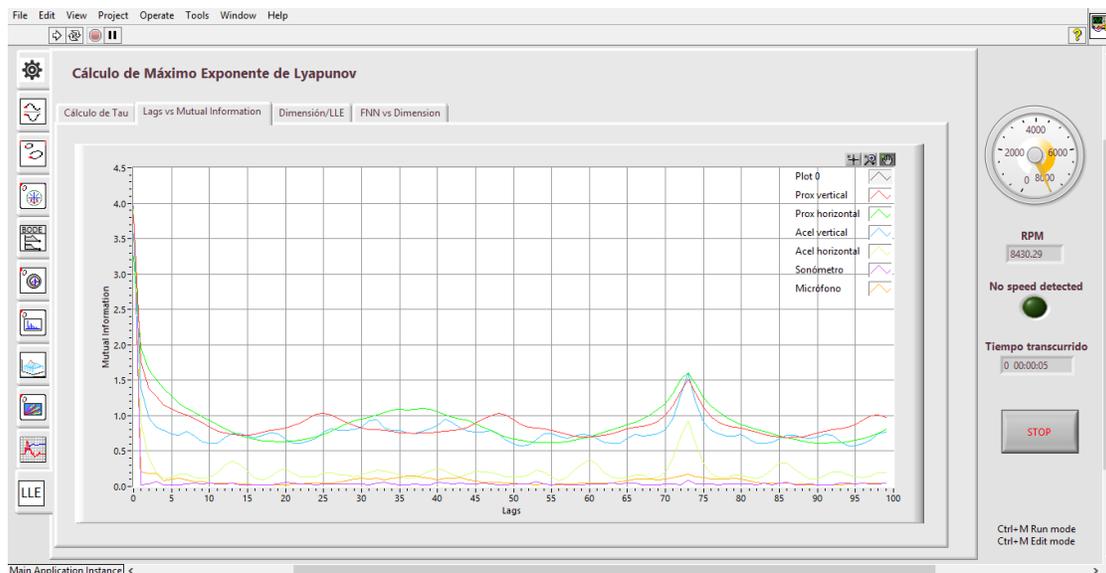


Fig. 3.45 Panel frontal mostrando la ventana de Lags vs Mutual Information



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

3. La tercera pestaña muestra el cálculo de dimensión, por el método de False Nearest Neighbour (FNN) y el Máximo Exponente de Lyapunov.

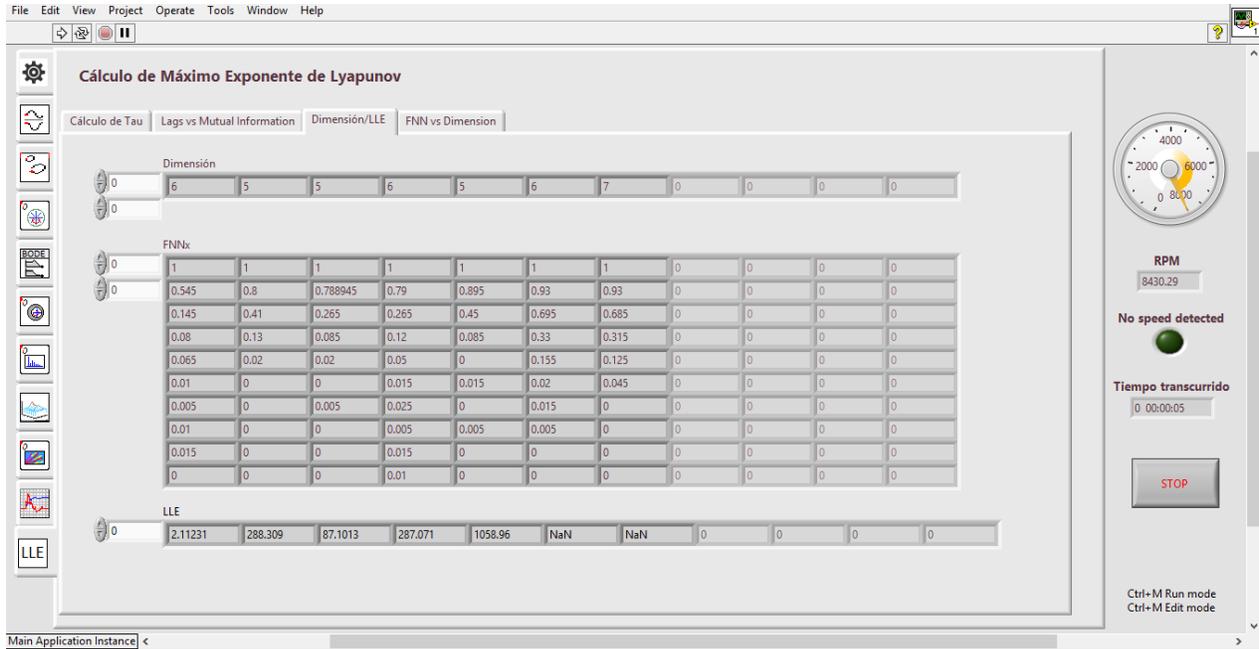


Fig. 3.46 Panel frontal mostrando la ventana de Dimensión/LLE

4. La cuarta ventana es una gráfica donde aparece FNN vs Dimensión.

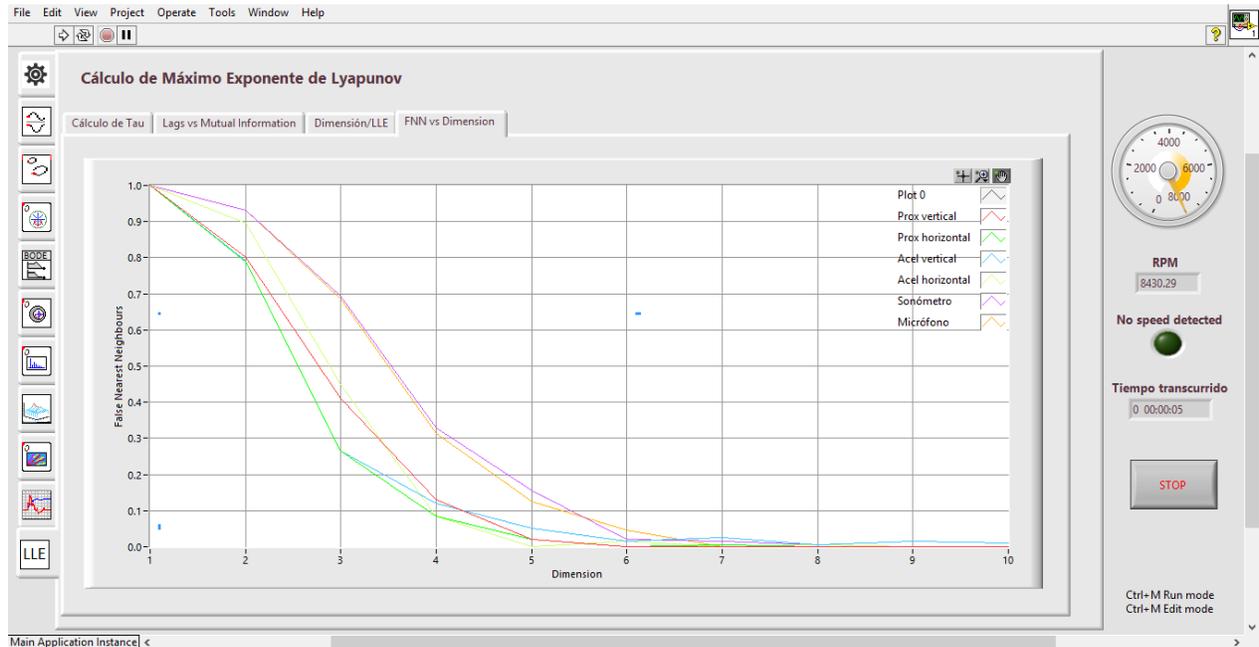


Fig. 3.47 Panel frontal mostrando la ventana de FNN vs Dimensión



3.5 Diagrama de bloques

La programación se realizó por medio de subVI's. El software de LabVIEW contiene en su módulo de sound and vibration las herramientas necesarias para facilitar la programación referente a este trabajo. El diagrama de bloques se dividió en 3 imágenes para poder apreciar el código completo de forma legible. En la siguiente figura se ven las distintas partes que configuran el programa, las cuales se explicarán por separado a continuación:

➤ Primera parte del diagrama de bloques:

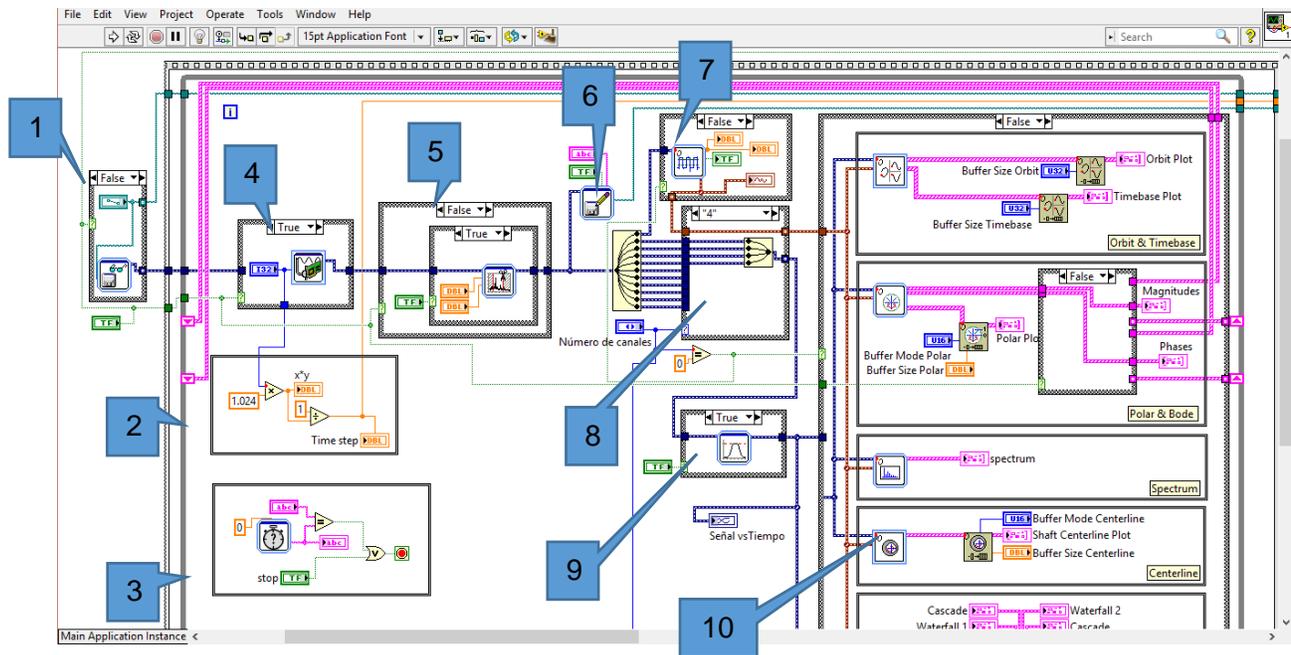


Fig. 3.48 Primera parte del diagrama de bloques

- 1) Esta parte del código consta de una estructura de casos, la cual permite abrir un archivo existente para generar las gráficas correspondientes. Consta de dos casos, verdadero y falso, el controlador que permite elegir que caso utilizar está ligado a la estructura de casos del punto 4. Esto es, cuando la estructura de casos 1 sea verdadera, también la estructura de casos 4 lo será. Esto permite activar la apertura de archivos existentes mientras que la adquisición de datos es desactivada y viceversa.

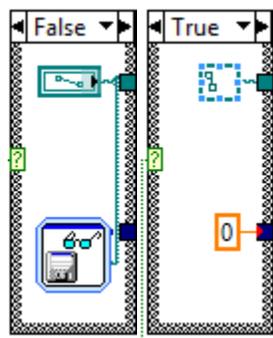


Fig. 3.49 Ampliación del buscador de archivos en diagrama de bloques

- 2) En esta parte del código se calcula el Time step, que es uno de los parámetros necesarios para el cálculo del LLE y que depende del número de muestras adquiridas por segundo (Number of samples).

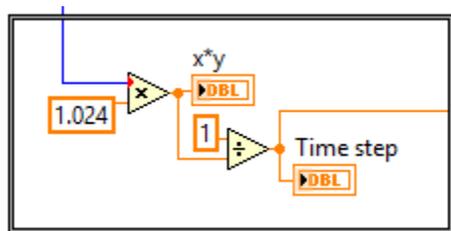


Fig. 3.50 Ampliación del código para cálculo de Time step en diagrama de bloques

- 3) Este código permite controlar el tiempo de adquisición de la prueba, funciona mediante la comparación de variables tipo "String", por lo que se debe respetar el formato establecido en el panel frontal.

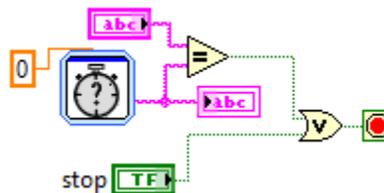


Fig. 3.51 Ampliación del código para duración de prueba en diagrama de bloques

- 4) Estructura de casos que controla la adquisición de datos, la cual se desactiva de forma automática en caso de abrir un archivo. En la ventana de configuración del adquisidor de datos, se puede configurar tanto el número de canales como el tipo de sensor y ubicación en el chasis



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

donde se insertan los módulos. Las diferentes configuraciones se pueden ver en la siguiente imagen:

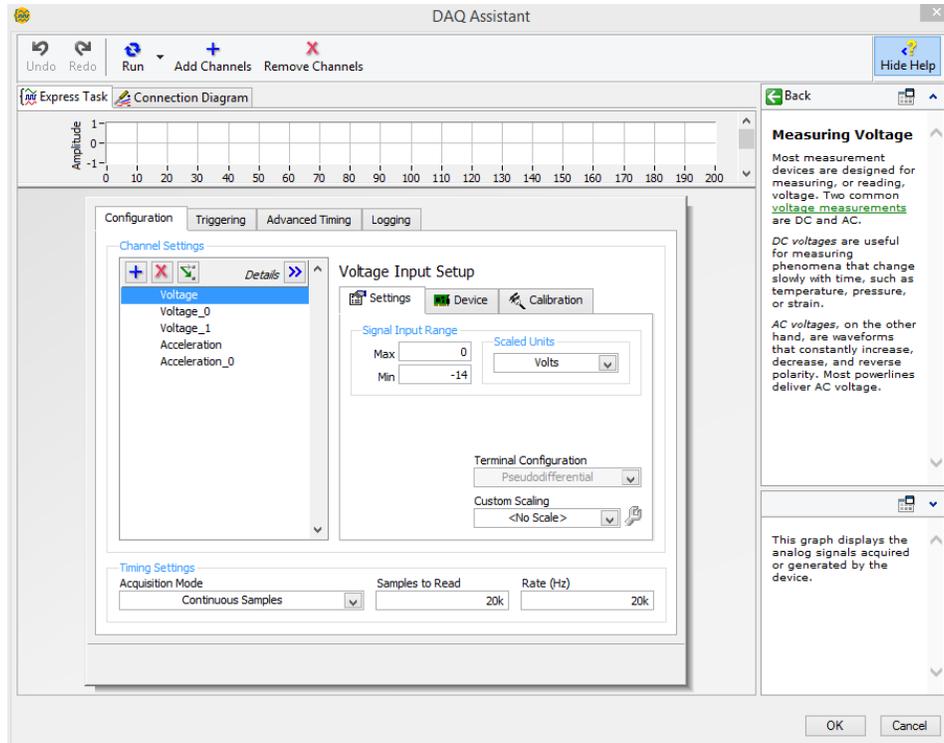


Fig. 3.52 Ventana de configuración de canales en diagrama de bloques

- 5) Esta parte del código permite extraer una porción de la señal, ya sea para analizar datos y gráficos en cierto instante de tiempo o a ciertas condiciones de velocidad (RPM). Esta herramienta solo puede ser activada cuando se abre un archivo, no se podrá utilizar durante adquisición de datos en tiempo real.
- 6) Este bloque es para guardar un archivo durante una adquisición de datos en tiempo real, la ventana de configuración se mostró anteriormente. Una vez terminada la adquisición de datos, estos son enviados de forma automática a los diferentes post-procesos que se activaron.
- 7) Este bloque permite conocer las RPM del sistema (tacómetro), es llamado Keyphasor, el cual brinda una referencia en la medición.
- 8) Este diagrama de casos es el encargado de seleccionar el número de canales del sistema, este diagrama tiene el control en el panel frontal.
- 9) El diagrama de casos permite activar o desactivar el filtro de señales, su ventana de configuración también fue mostrada durante su explicación en el panel frontal.



10) En esta sección se efectúan las gráficas mencionadas al inicio de este capítulo. Para acceder a la ventana de configuración de cada bloque (que se mostró anteriormente), solo es necesario dar doble clic sobre uno de ellos. Los cuatro subVI's que pertenecen a este bloque son multicanal, por lo que solo es necesario un bloque sin importar el número de canales que se conecten, cada bloque tiene un indicador gráfico y sus respectivos controles.

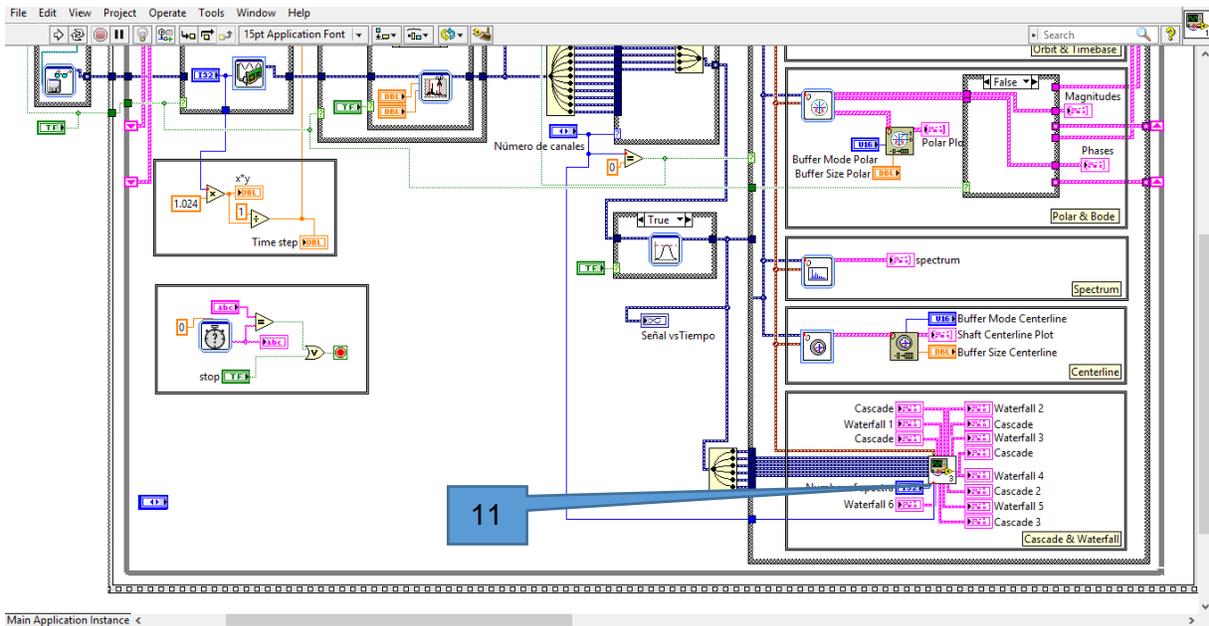


Fig. 3.53 Continuación de la primera parte del diagrama de bloques, se muestra un subVI

11) Esta parte del código es un subVI creado para mostrar los gráficos de waterfall y cascade, ya que estas herramientas no son multicanal, por lo que hay que colocar una de ellas por canal. Este subVI es para evitar el amontonamiento de cables y herramientas repetitivas.



➤ Segunda parte del diagrama de bloques:

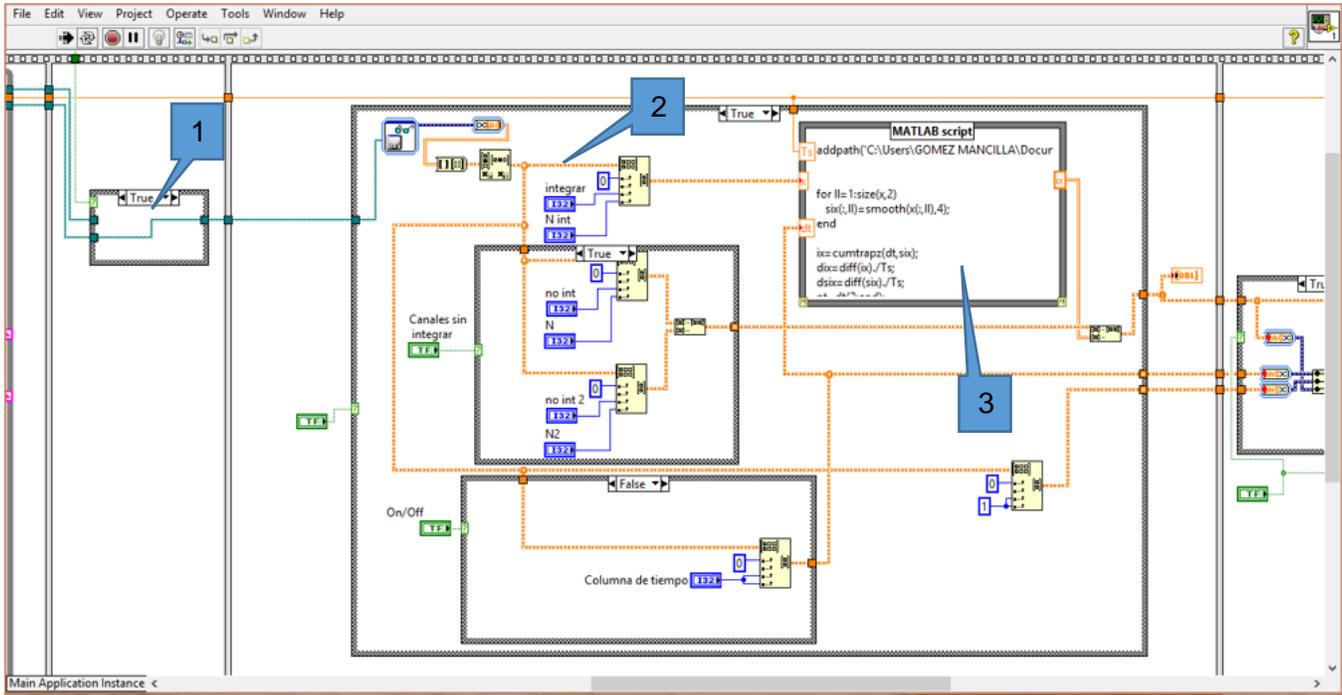


Fig. 3.54 Segunda parte del código de programación en diagrama de bloques

- 1) La estructura de casos señalada es para elegir el archivo que se va a post-procesar, es decir, si proviene de un archivo guardado o de una adquisición de datos en tiempo real. El programa a su vez está en una estructura llamada Flat Sequence, la cual es usada para dar un orden estricto de ejecución al programa y va de izquierda a derecha. Esto es, primero se ejecuta el código que está en las casillas de la izquierda, hasta que estos terminen de ejecutarse, podrán ejecutarse los demás.
- 2) El código que se encuentra señalado en la parte central es para la elección de columnas. Esto es para seleccionar las columnas que se quieren post-procesar con Integración, Derivación y Smoothing.

Una vez obtenidos los datos crudos por medio del sistema de adquisición descrito en los párrafos anteriores, lo primero que se tiene que hacer es remover la componente de DC de cada una de las señales adquiridas, esto con el fin de analizar solamente las vibraciones del sistema a estudiar.



Los datos resultantes tendrán la siguiente forma:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & \cdots & x_{Nk} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.25}$$

El subíndice k representa el número de canales o sensores a analizar, en general el procedimiento que a continuación se describe se aplica a cada canal, por lo tanto por simplicidad se supone que la señal utilizada en adelante tiene la siguiente forma:

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_N] \quad \text{Ec. 3.26}$$

- 3) En esta parte se coloca una estructura llamada Script Node, que permite leer código de MATLAB dentro de LabVIEW. La interacción entre los programas se da de forma automática. Esta estructura permite agregar el número de entradas y salidas que se deseen. Para utilizar este código, se requiere un número de muestras mínimo, que es de 10^m , donde m es la dimensión del sistema.

Filtrado

El siguiente procesamiento de los datos, el filtrado, es opcional y se deja a consideración del usuario.

En primer lugar se integra la señal de forma numérica utilizando el algoritmo de integración numérica trapezoidal, y una vez hecho esto se filtra la serie de datos resultante utilizando la función "smooth" de matlab que se describe a continuación.

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1 \\ y_2 &= \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \\ y_3 &= \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5}{5} \\ y_4 &= \frac{x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6}{5} \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.27}$$



➤ Tercera parte del diagrama de bloques:

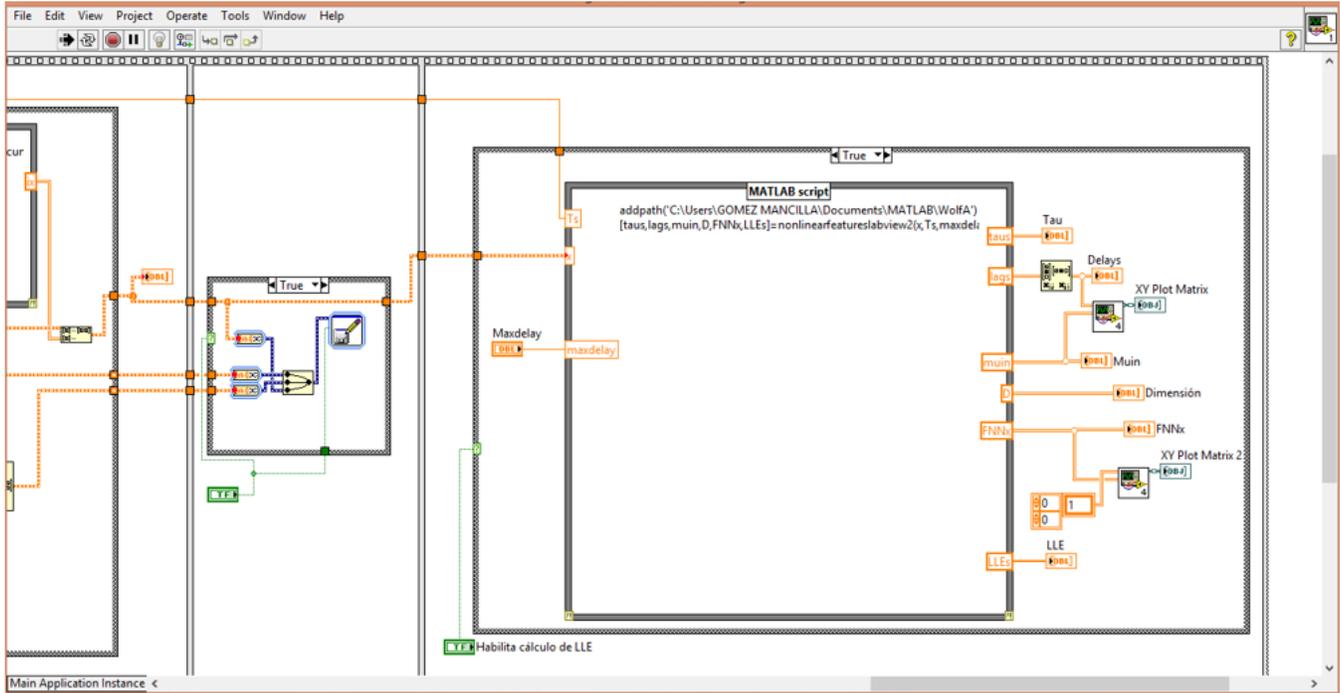


Fig. 3.55 Tercera parte del código de programación en diagrama de bloques

En esta parte del código aparece nuevamente el Script Node, ya que para el post-proceso del Máximo Exponente de Lyapunov (siglas en inglés LLE) se utiliza un código escrito en MATLAB. Los dos post-procesos se pueden activar o desactivar a voluntad y funcionan para un archivo o para datos adquiridos en tiempo real. Las salidas son las tablas de datos mostradas en el panel frontal en la ventana de LLE.

Parámetros característicos lineales

Una vez que se ha filtrado la señal, si así se decidió, se obtienen los parámetros lineales, los cuales se almacenarán en una matriz de parámetros característicos. Esta matriz se ampliará con los parámetros característicos no lineales descritos en los siguientes párrafos.

Obtención del retardo por medio de la información mutua

Un retardo adecuado debe cumplir dos criterios, en primer lugar debe ser lo suficientemente grande de tal manera que la información medida de la variable x en el tiempo $t+\tau$ sea relevante y significativamente diferente de la información que ya se conoce en el tiempo t . Solo así será posible obtener la información acerca de la otras variables que influencia a la variable medida para poder reconstruir de manera satisfactoria el espacio de fase con un elección razonable de m . En general un



retardo pequeño puede ser compensado con una dimensión mayor. Por esta razón, el teorema original de embebimiento está formulado con respecto a m y no dice nada acerca de τ . En segundo lugar, τ no debe ser tan grande que el valor típico en donde el sistema pierde memoria de su estado inicial, si τ es seleccionado demasiado grande el espacio reconstruido se observará más o menos aleatorio dado que consista de puntos no correlacionados.

Obtención de la dimensión por medio del algoritmo: vecinos falsos cercanos

La idea básica consiste en buscar puntos dentro de un conjunto de datos que sean vecinos en un espacio embebido, pero que no deberían serlo dado que su evolución temporal futura es demasiado diferente. Suponiendo que la dimensión de embebimiento correcta para algún conjunto de datos es m_0 . Ahora se estudia el mismo conjunto de datos en un espacio embebido de menor dimensión $m < m_0$. La transición de m_0 a m es una proyección, al eliminar ciertos ejes del sistema de coordenadas.

Para calcular la fracción de vecinos falsos cercanos, el siguiente algoritmo es utilizado. Dado un punto particular $p(t)$ en el espacio de dimensión m , primero se debe encontrar un vecino $p(i)$, tal que, $\|p(i) - p(t)\| < \varepsilon$, en donde ε es una constante no más que la desviación estándar del conjunto de datos y $\|\dots\|$ es la norma euclídea. Por lo tanto, es posible calcular la distancia normalizada R_i entre $(m+1)^{ta}$ coordenada de puntos $p(t)$ y $p(i)$ de acuerdo a la ecuación:

$$R_i = \frac{|x_{i+m\tau} - x_{t+m\tau}|}{\|p(i) - p(t)\|} \quad \text{Ec.3.28}$$

Si R_i es mayor que un umbral preestablecido R_{umbral} entonces $p(t)$ es marcado de tal forma que tiene un vecino falso cercano. La ecuación (3.28) tiene que ser empleada en toda la serie de datos y para varios $m = 1, 2, \dots$ hasta que la fracción de puntos para la relación $R_i < R_{umbral}$ sea despreciable.

Exponentes de Lyapunov

Los exponentes de Lyapunov indican la tasa de divergencia de trayectorias cercanas. Para sistemas unidimensionales el exponente de Lyapunov es simplemente el promedio $\left| \frac{df}{dx} \right|$. El número de exponentes de Lyapunov de un sistema dinámico es igual al número de dimensiones del espacio de fase. Si todos los puntos de la vecindad de una trayectoria convergen hacia la misma órbita, el atractor puede ser un punto fijo o un ciclo límite, sin embargo, si el atractor es extraño, cualesquiera dos



trayectorias $x(t) = f(x_0)$ y $x(t) + \delta x(t) = f(x_0 + \delta x_0)$ que empiezan muy cerca una de otra se separan exponencialmente. Alan Wolf [71] propone un algoritmo para calcular los exponentes de Lyapunov a partir de una serie escalar de datos de una serie temporal. La idea general es seguir dos trayectorias cercanas y calcular su tasa de separación promedio logarítmica. Basado en este método Sprott publica un procedimiento para el cálculo del LLE.

Este procedimiento puede ser brevemente descrito como sigue:

1. Empezar con cualquier condición inicial en la región de atracción. Una mejor elección sería empezar con un punto conocido sobre el atractor, en cuyo caso el paso 2 puede ser omitido.
2. Iterar hasta que la órbita este sobre el atractor. Esto requiere algo de juicio o previo conocimiento de el sistema bajo estudio. Para la mayoría de los sistemas, es seguro iterar solo unas pocas cientos de veces y asumir que es suficiente.
3. Seleccionar un punto cercano con una separación de d_0 . Una selección apropiada de d_0 es aquella que sea 1000 veces mayor que la precisión de punto flotante que esta siendo usado. Por ejemplo, en el caso de punto flotante de doble precisión (el mínimo recomendado para tales cálculos), la precisión es calculada como $2^{-52} = 2.22 \times 10^{-16}$. Por lo tanto, un valor de $d_0 = 10^{-12}$ será suficiente.
4. Avanzar las dos órbitas una iteración y calcular la nueva separación d_1 . La nueva separación es la distancia entre los nuevos puntos en el espacio fase. Entonces, para un sistema 2-dimensional con variables x y y , la separación será $d = [(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2]^{\frac{1}{2}}$, donde los subíndices (a y b) denotan las dos órbitas respectivamente.
5. Evaluar $\log \left| \frac{d_1}{d_0} \right|$ en cualquier base conveniente. Por convención, el logaritmo natural es usado, pero el logaritmo base-2 es a menudo citado en bits por iteración.
6. Reajustar una órbita de tal manera que su separación sea d_0 en la misma dirección que d_1 . Esto es probablemente la parte más difícil y propensa a errores.
7. Repetir los pasos 4-7 varias veces y calcular el promedio del paso 5. Lo mejor es descartar los primeros valores obtenidos para estar seguros que las órbitas se han orientado a lo largo de la dirección de la máxima expansión. Si el sistema es un flujo continuo que consiste de ecuaciones diferenciales ordinarias, el procedimiento es exactamente el mismo excepto que el resultado de el exponentes debe ser derivado por el paso de iteración.

El código que se utiliza en Matlab fue convertido desde el lenguaje fortran por Taehyeun Park, The Cooper Union, EE'15 en septiembre de 1014.



Capítulo 4 Pruebas experimentales

4.1 Cálculo de frecuencias naturales y modos de vibración del eje

Para calcular la frecuencia natural del eje y observar los modos de vibración del mismo, se utilizó el programa del M. en C. Rafael García Illescas y del Dr. Julio César Gómez Mancilla que calcula las frecuencias naturales y los modos de vibración de ejes mediante un método energético, a continuación, se muestran los valores que se registraron y los resultados arrojados por el programa.

Frecuencias Naturales y Modos de Vibración de un Eje Mediante Método Energético

Calculando Viga Simplemente Apoyada

Material Del Eje

Módulo de Elasticidad (Pa), $E = <169e9>$

Relación de Poisson = $<0.3>$

Densidad (kg/m^3), $\text{dens} = <7860>$

Diámetro (m), (0.01 RortorKit, 0.015875 MFS, 0.0254 Eje grueso) $d = .015875$

Longitud total (m), $L = .29$

Eje Con Un Disco

Posición del disco (m), $x_m = .13$

¿El disco contribuye a la rigidez del eje? $<n>$

Masa del disco (kg), $m_d = 3.91$

Diámetro (exterior) del disco 1 $dd = .16$

Ancho del disco 1 $hd1 = .02836$

$J_{\text{disco1 rot flex}} (Jd1) = 0.0065628 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$



Idisco1 rot tors (I_{d1}) = 0.012603 kg*m²

Masa del eje, m_e = 0.45 kg

Centro de gravedad del eje solo (sin masas) = 0.145 m

Centro de gravedad del eje con masas = 0.13154 m

Frecuencias Naturales (Por Fórmula) De Viga Integra Simple Y Sin Disco

Viga Simplemente Apoyada

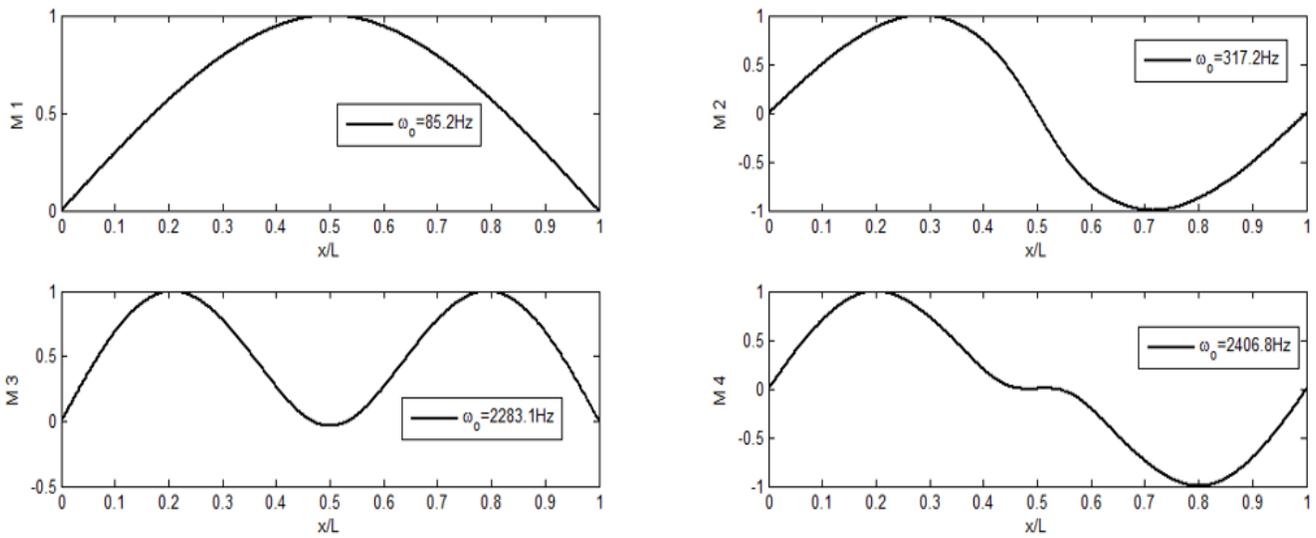


Fig. 4.1 Primeros cuatro modos de vibración

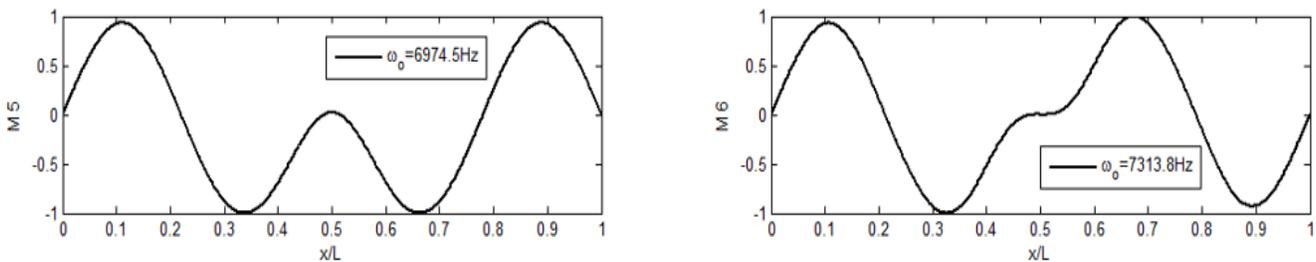


Fig. 4.2 Modos de vibración cinco y seis



4.2 Alineamiento del eje

El des-alineamiento es la segunda causa de vibración en las máquinas rotatorias. El defecto se manifiesta a la frecuencia de rotación y también puede manifestarse en el segundo y tercer armónico de la frecuencia de rotación. Se caracteriza porque la amplitud en la dirección axial es mayor que la radial.

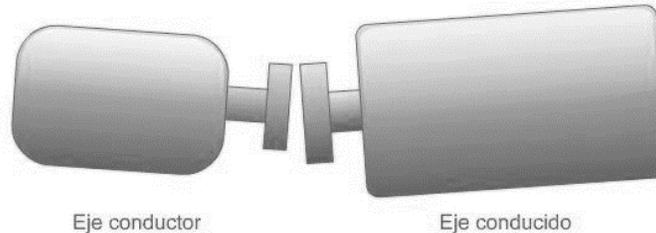


Fig. 4.3 Máquina Desalineada

Se dice que dos piezas o componentes de máquina se encuentran desalineadas cuando los ejes de la parte conductora (motriz) y conducida no tienen la misma línea de centros. El des-alineamiento puede ser paralelo, angular o una combinación de ambos. [23]

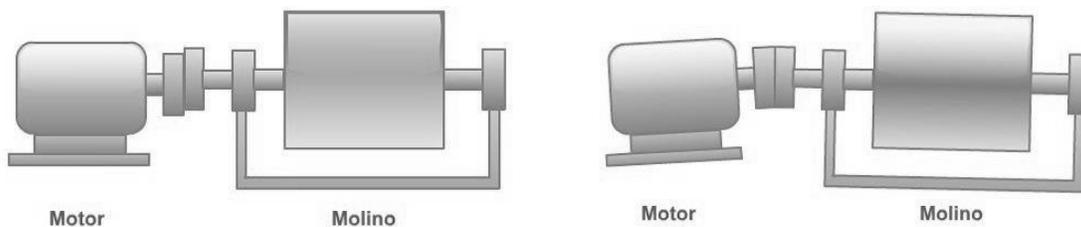


Fig. 4.4 Desalineamiento Paralelo (Izq.) / Desalineamiento Angular (Der.)

Algunas veces los ejes no se encuentran desalineados, pero el acople se encuentra torcido, debido a esfuerzos de trabajo o por fallas de construcción. Un acople torcido llevará inevitablemente a sufrir problemas de desalineamiento.

La falta de alineamiento, aún con acoplamientos flexibles, produce fuerzas tanto radiales como axiales que a su vez producen vibraciones radiales y axiales. **Nota:** Uno de los indicios más importantes de problemas debidos a falta de alineamiento y a ejes torcidos es la presencia de una elevada vibración en ambos sentidos, radial y axial. En general, cada vez que la amplitud de la vibración axial sea mayor que la mitad de la lectura radial más alta, hay un buen motivo de sospechar la existencia de un problema de desalineamiento o eje torcido.



Los tres tipos básicos de falta de alineamiento en el acoplamiento son: angular, en paralelo y una combinación de ambos. Una falta de alineamiento angular sujeta principalmente los ejes de las máquinas accionadoras y accionada a vibración axial igual a la velocidad de rotación (rpm) del eje.

La falta de alineamiento en paralelo produce principalmente vibración radial con una frecuencia igual al doble de la velocidad de rotación del eje y normalmente es mayor la componente vertical que la horizontal. [68]

En este caso el alineamiento se corrigió, en la medida de lo permitido, con un sistema de láser.

El sistema es llamado Easy-Láser Alignment Tool, el cual consta de las siguientes partes:



Fig. 4.5 Partes del sistema de alineación láser

- 1) Display unit: Es operada con baterías, cuenta con una entrada de contactos Push/Pull para la unidad de medida, una entrada para impresora, cuatro botones que permiten ajustar las unidades y las distancias requeridas y una pantalla donde muestra la información deseada.
- 2) Cables Push/Pull: Son dos cables para conectar las dos unidades de medida en serie a la unidad de Display.
- 3) Unidades de medida con detector: Cuenta con un diodo láser, un detector, dos ampolletas para nivelación, perillas de bloqueo, perillas de ajuste del láser, dos contactos Push/Pull y dos orificios



para colocar las barras de la base. Son dos unidades, una marcada con la letra "S" y la otra con "M" (Stationary y Movable machine).

- 4) Dos cadenas: Tienen una perilla de ajuste, estas son las que se colocan en el contorno del eje, si el eje tiene un diámetro muy grande, el equipo cuenta con unas extensiones de cadena.
- 5) Bases con varillas: Estas se sujetan con ayuda de la cadena una vez que está tensa, se colocan las unidades de medida a través de las varillas gracias a los orificios que tienen en sus extremos y se ajustan a la misma altura e inclinación.

El equipo está diseñado para medir el desalineamiento entre dos ejes o flechas, por lo que un cople debe quedar entre las dos unidades de medida, como se muestra en la siguiente figura:



Fig. 4.6 Sistema de alineación láser montado en la plataforma experimental

Una vez que está instalado el láser, el procedimiento que se indica es el siguiente:

- I. Indicar las unidades en las que se desea trabajar.
- II. Indicar las distancias que se muestran en la figura 4.7:

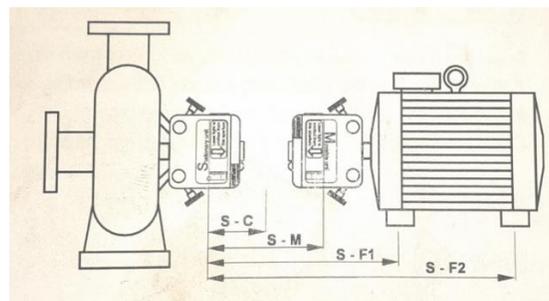


Fig. 4.7 Distancias solicitadas por el sistema de alineación láser



Tabla 4.1 Distancias para alineación con láser

Distancia	Valor
S – C	80 mm
S – M	97 mm
S – F1	195 mm
S – F2	275 mm

- III. Girar el eje en tres posiciones angulares distintas, cada posición debe tener por lo menos 40° entre ellas, pulsando el botón verde en cada una de las posiciones para registrar los valores. Vale la pena mencionar que se recomienda dar una separación de 60° entre cada posición, para mejores resultados. (Figura 4.8)

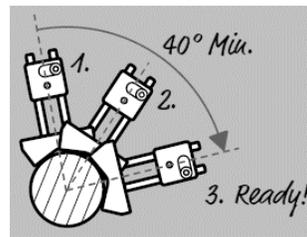


Fig. 4.8 Posiciones que se deben realizar para medición láser

- IV. Revisar los resultados en el "Display" y comparar con los valores de la tabla 4.2 para conocer el grado y tipo de desalineamiento, y así aplicar las correcciones en caso de ser necesario. La figura 4.9 muestra el significado de los valores mostrados en el "display".

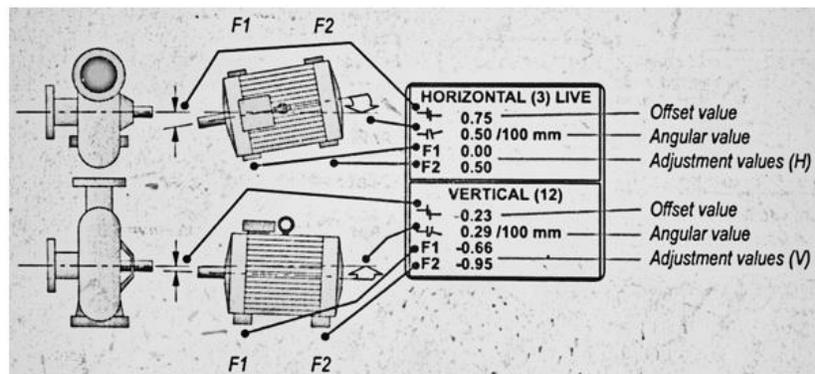


Fig. 4.9 Significado de los valores descritos por el sistema de alineación láser



Tabla 4.2 Tolerancias para alineación

		Excelente		Aceptable	
Offset					
Rpm		Mils	Mm	Mils	Mm
0000-1000		3,0	0,07	5,0	0,13
1000-2000		2,0	0,05	4,0	0,10
2000-3000		1,5	0,03	3,0	0,07
3000-4000		1,0	0,02	2,0	0,04
4000-5000		0,5	0,01	1,5	0,03
5000-6000		<0,5	<0,01	<1,5	<0,03
Error Angular					
Rpm		Mils/”	Mm/100	Mils/”	Mm/100
0000-1000		0,6	0,06	1,0	0,10
1000-2000		0,5	0,05	0,8	0,08
2000-3000		0,4	0,04	0,7	0,07
3000-4000		0,3	0,03	0,6	0,06
4000-5000		0,2	0,02	0,5	0,05
5000-6000		0,1	0,01	0,4	0,04



Tablas de mediciones antes y después de alineamiento con láser, arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 4.3 Mediciones obtenidas con sistema láser antes de alineación

	Horizontal	Vertical
Desplazamiento	0.03 mm	0.02 mm
Angular	0.14 mm/100	0.09 mm/100

Tabla 4.4 Mediciones obtenidas con sistema láser después de alineación

	Horizontal	Vertical
Desplazamiento	0.01 mm	0.01 mm
Angular	0.04 mm/100	0.02 mm/100

Ese desalineamiento angular es lo suficientemente bajo como para que el cople flexible que se utilizó absorba parte de la mal-función y poder operar a velocidades superiores a las sugeridas por el sistema de alineación láser.

4.3 Balanceo del eje

Es la causa más común de vibración en las máquinas rotatorias. Su detección mediante el empleo del análisis de señales es posible, ya que se manifiesta a la frecuencia fundamental de rotación de la máquina. Se recomienda medir en la dirección axial y radial. En la dirección radial su amplitud es aproximadamente dos veces mayor que en la dirección axial.

La mayoría de los propulsores principales experimentan problemas vibratorios debido al desequilibrio inherente en los motores. El desequilibrio puede deberse al diseño defectuoso o a una fabricación deficiente. Las ruedas de algunas locomotoras pueden alzarse más de un centímetro de la vía a altas velocidades debido al desequilibrio [3].

Se dice que una pieza se encuentra desbalanceada cuando su centro de masa (centro de gravedad) no coincide con su centro geométrico. Esta condición es causada por una distribución desigual del peso del



rotor alrededor de su centro geométrico. El desbalance es una de las causas más frecuentes de vibración en la maquinaria rotativa (aproximadamente el 50% de los casos) [11].

En muchos casos, los indicativos para un desbalance son:

- La frecuencia de vibración se manifiesta a 1X de las rpm del equipo desbalanceado, las armónicas son bajas.
- La amplitud es proporcional a la cantidad de desbalance.
- La amplitud de la vibración es normalmente mayor en el sentido de medición radial que el axial.
- La amplitud de la vibración es mayor en sentido horizontal que vertical (equipos horizontales).
- El análisis de fase indica lecturas de fase estables.
- La fase se desplazará 90° si se desplaza el captador 90° [68].

El trazo orbital muestra un punto que representa la ocurrencia del pulso tacométrico. Como solamente se muestra un punto, se puede concluir que el trazo corresponde a una revolución de la flecha.

Causas de Desbalance

Un cierto grado de desbalance en cualquier tipo de máquina rotativa es inevitable. Los diseñadores de máquinas las especifican con tolerancias de diseño, maquinado y ensamblaje, tales tolerancias pueden producir algún tipo de desequilibrio o desbalance. Adicionalmente, se puede presentar desbalance debido a pequeñas variaciones dentro de la composición metalúrgica del rotor (inclusiones, poros, etc.). Aun cuando la mayoría de los rotores son balanceados por el fabricante después del proceso de manufactura y antes de ser utilizados cuando ya están armados en sus respectivas máquinas. El paso del tiempo y ciertas condiciones en el proceso de montaje, inciden en que la máquina vibre y que sus componentes deban ser re-equilibrados [69]. A continuación, se enlistan algunos causantes del desbalance en ejes:

- Ensamblaje incorrecto
- Depósito de material
- Desgaste
- Piezas rotas o faltantes
- Flexión de ejes [11]



Tipos de Desbalance

❖ Desbalance Estático

El desbalance de fuerza, mejor conocido como "desbalance estático", es una condición en la que la línea central de la masa es desplazada en forma paralela de la línea central del eje, como se observa en la Figura 4.10 [70]:

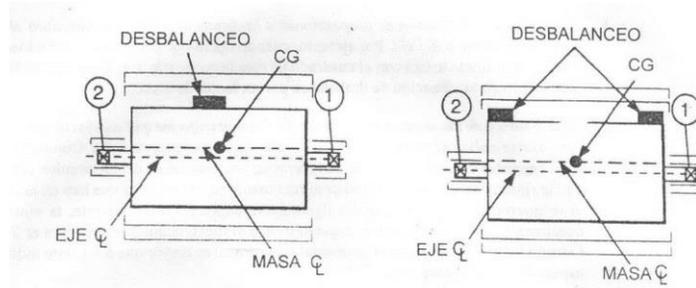


Fig. 4.10 Muestra el desbalance estático en uno y dos planos

❖ Desbalance Tipo Par

El desbalance tipo par es una condición en la que el eje de la línea central de la masa intersecta el eje de la línea central del eje en el centro de gravedad del rotor, como se observa en la Figura 4.11. Aquí se crea un par entre puntos de concentración de peso, iguales (o diferentes) en cada extremo del rotor, pero a 180° uno frente del otro.

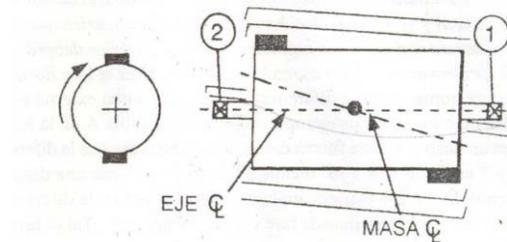


Fig. 4.11 Muestra del desbalance tipo par

Un desbalance de par considerable puede introducir una inestabilidad severa en el rotor y provocar un movimiento de vaivén (como un "sube y baja").



❖ Desbalance Tipo Dinámico

El desbalance dinámico es, con mucho, el tipo de desbalance más común si se le compara con cualquiera de los desbalances puros de fuerza o par, y se le define como "aquella condición en la que la línea central de la masa no intersecta ni es paralela al eje de la línea central de la flecha" como se muestra en la Figura 4.12.

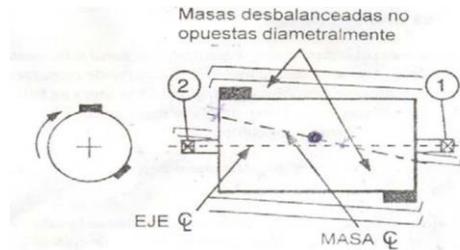


Fig. 4.12 Muestra el desbalance tipo dinámico. (Combinación del estático y par)

En esencia, el desbalance dinámico es una combinación de los desbalances de fuerza y de par. Requiere corrección en por lo menos dos planos perpendiculares al eje de la línea central de la flecha [70]. Para realizar el balanceo es necesario contar por lo menos con un sensor que indique las características del movimiento y una referencia puesta con anterioridad en el rotor que indique el ángulo de fase de la vibración [68].

El balanceo se realizó mediante un programa que se basa en el método de operador P, con el cual se necesita un sensor (proxímetro) que indique las amplitudes, una referencia angular (keyphasor) y varias masas de prueba y corrección.

El balanceo que se realizó fue en un plano, la ventana del programa es la de la figura 4.13.

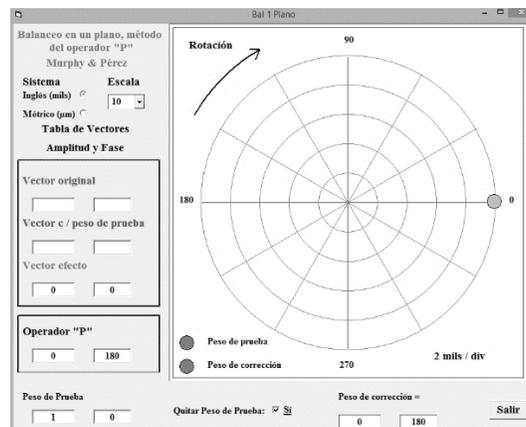


Fig. 4.13 Ventana del programa para balanceo en un plano, Murphy & Pérez



Donde se siguen las siguientes instrucciones:

- Se realiza una prueba a una velocidad pre-establecida, teniendo en cuenta la primera frecuencia natural del eje. Una vez realizada la prueba se toma la amplitud de orden 1x con su respectivo ángulo para que sea nuestro vector original.
- Se coloca un peso de prueba en el lado opuesto del ángulo de la mayor amplitud, para contrarrestar los efectos inerciales. Esta masa no debe ser muy grande, ya que podría llevar al sistema a amplitudes aún mayores. La masa utilizada en la prueba fue de 0,5 gramos.
- Se realiza una prueba con el peso extra montado sobre el disco, se lleva a la misma velocidad que en la primera prueba y se toma la amplitud y el ángulo para el vector con peso de prueba. En la parte inferior se introduce el peso de prueba y su ubicación angular. Una vez terminado con esto el programa calculará el vector efecto, donde preguntará si se desea conservar el peso de prueba.
- Se retira o se conserva el peso de prueba y se aplica el peso de corrección en la ubicación angular correspondiente.
- Se hace una prueba para comprobar los resultados, en caso de querer mejorar el balanceo debe aplicarse nuevamente el método, ya con los nuevos pesos en el disco.

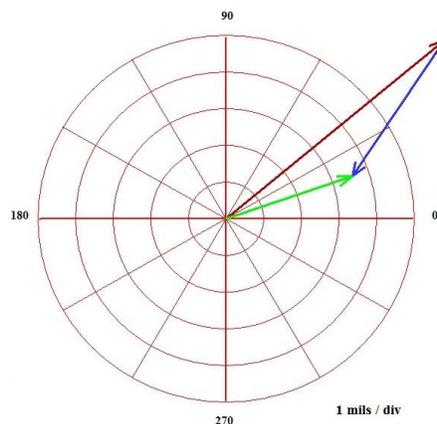


Fig. 4.14 Trazado de los vectores para colocación de masas de corrección



4.4 Pruebas realizadas y comparación de resultados con sistema ADRE

4.4.1 Condiciones de la prueba

Tabla 4.5 Valores de las condiciones de la plataforma experimental y RPM

Elemento	Valor
Diámetro del Eje	15.875 mm
Diámetro del Disco	160 mm
Distancia entre Apoyos	290 mm
Longitud Eje con Disco	450 mm
Espesor del Disco	28.36 mm
Masa del Disco	3.91 kg
Masa del Eje	0.45 kg
Masa Equivalente Eje con Disco	4.135 kg

4.4.2 Resultados del balanceo y comparación con sistema ADRE

A continuación, se muestra una comparativa entre las diferentes gráficas obtenidas con ambos sistemas, el sistema ADRE y el programa hecho en LabVIEW. La información mostrada corresponde a una prueba que llega hasta las 3655 RPM, después de realizar el balanceo. Los sensores utilizados fueron los proximetros. Las velocidades de muestreo y configuración de ambos sistemas fue la misma, hasta donde es posible configurar.

Tabla 4.6 Valores de las amplitudes antes y después del balanceo

Amplitudes originales (sin balanceo) Directas.	Amplitudes con eje balanceado (ADRE) Directas.	Amplitudes con eje balanceado (LabVIEW) Directas.
Eje Y = 8.34 mils pp Eje X = 6.18 mils pp	Eje Y = 1.85 mils pp Eje X = 2.97 mils pp	Eje Y = 1.55 mils pp Eje X = 2.82 mils pp



La velocidad en que las amplitudes resultaron ser de mayor magnitud fue a 3655 rpm = 61 Hz donde éstas llegaron a 8.34 milésimas de pulgada pico a pico en un ángulo de fase de 40° (Tabla 4.7). Por lo tanto, se realizó el proceso de balanceo considerando esos valores.

Tabla 4.7 Valores de amplitudes sin balancear a 3655 rpm (61 Hz.)

Sin Balancear (61 Hz.)		
Proxímetro	Amplitud	Fase
X	6.18mils	334°
Y	8.34mils	40°

El proceso de balanceo indica que teniendo la vibración original $V_0 = 8.34$ mils y su ángulo de fase $\theta_0 = 40^\circ$; se procede a colocar una masa de prueba en una ubicación de manera arbitraria del disco respecto al keyphasor, se decidió poner una masa de prueba $(m_e)_p = 0.5$ gr que se ubicó en donde se marcó $\alpha_p = 90^\circ$ en el disco y entonces se procedió a realizar otra prueba.

Tabla 4.8 Valores de amplitud con masa de 0.5 gr.

Masa= 0.5 gr Ubicación= 90°			
Velocidad	Proxímetro	Amplitud	Fase
61 Hz	X	3.87 mils	326°
	Y	3.55 mils	19°

De la Tabla 4.8 se obtiene que $V_1 = 3.55$ mils y $\theta_1 = 19^\circ$. Con los datos de la Tabla 4.7 y la Tabla 4.8 se crean dos vectores, con cuya resta se obtiene el vector V_x y su dirección θ_x . A continuación, se muestra el cálculo:

$$V_x = V_1 - V_0 \quad \text{Ec. 4.1}$$



Fuerzas en Y:

$$3.55\text{sen}19^\circ - 8.34\text{sen}40 = -4.20 \quad \text{Ec. 4.2}$$

Fuerzas en X:

$$3.55\text{cos}19^\circ - 8.34\text{cos}40 = -3.03 \quad \text{Ec. 4.3}$$

Valor Vector V_x :

$$V_x = \sqrt{(-4.20)^2 + (-3.03)^2} = 5.17 \text{ mils} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Valor del Angulo:

$$\theta_x = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{-4.20 \text{ mils}}{-3.03 \text{ mils}}\right) = 54.19^\circ + 180^\circ = 234.19^\circ \quad \text{Ec. 4.5}$$

Después se obtuvo el valor de la Masa de corrección $(m_e)_0$:

$$(m_e)_0 = (m_e)_p \frac{|V_0|}{|V_x|} \quad \text{Ec. 4.6}$$

$$(m_e)_0 = 0.5 \text{ gr} \frac{|8.34 \text{ mils}|}{|5.17 \text{ mils}|} = 0.80 \text{ gr} \quad \text{Ec. 4.7}$$

Se calcula el lugar en el disco donde se colocará la masa de corrección:

$$\alpha_0 = \theta_0 - \theta_x + \alpha_p$$

$$\alpha_0 = 40^\circ - 234.19^\circ + 90^\circ$$

$$\alpha_0 = 104.19^\circ \quad \text{Ec. 4.8}$$

Debido a que el disco tiene 32 agujeros dispuestos a cada 11.25° , de los cuales solo la mitad de ellos tienen rosca para introducir masas de balanceo, se decidió que la masa se colocaría en el agujero de 101.25° . Otra dificultad que se encontró, fue que no se tenían masas de 0.8 gr exactos, la más cercana a



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

Comparativa del diagrama Orbit en ambos sistemas, ADRE y LabVIEW. Las órbitas directas, dan amplitudes en ambos sistemas alrededor de 3.2 mil pp en eje X y de 1.82 para eje Y.

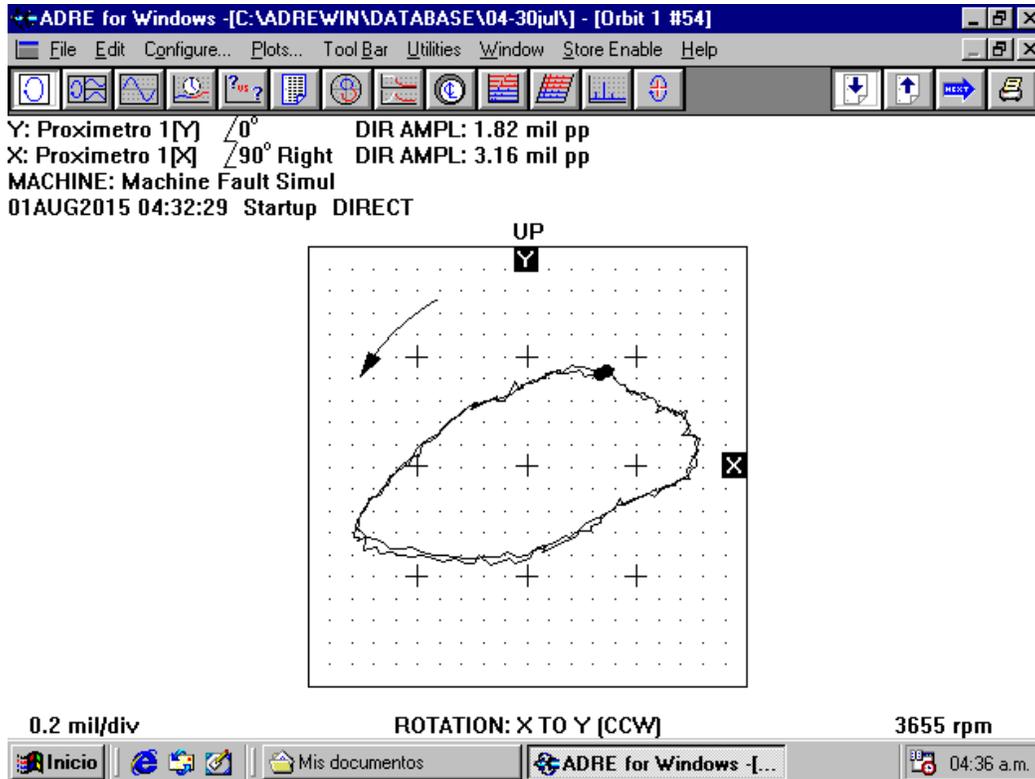


Fig. 4.17 Diagrama Orbit en sistema ADRE. Amplitudes: x=3.16 mil pp / y=1.82 mil pp

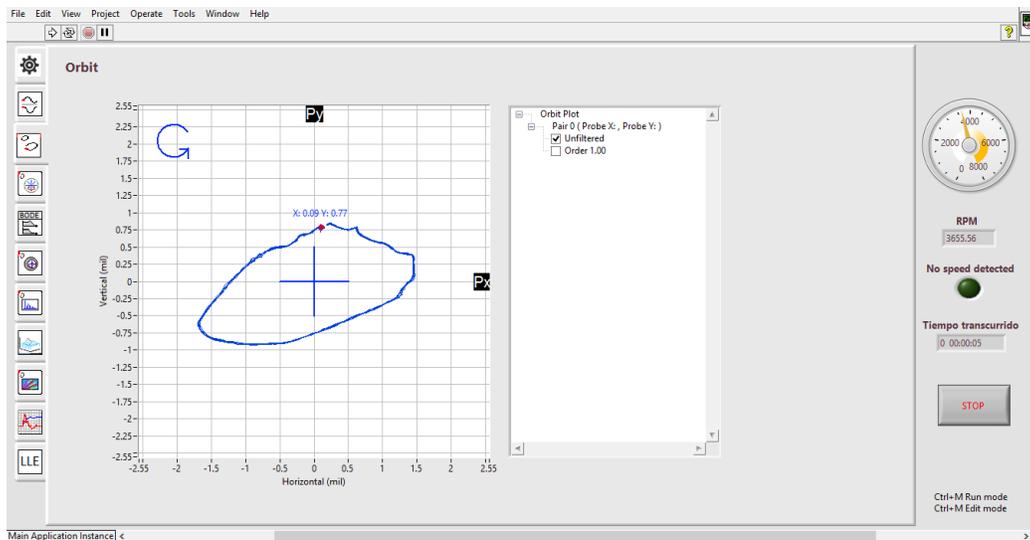


Fig. 4.18 Diagrama Orbit en sistema LabVIEW. Amplitudes: x=3.28 mil pp / y=1.86 mil pp



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

El gráfico Polar muestra el cambio de fase, que se mantiene en un mismo cuadrante pese a que las amplitudes aumentaron significativamente. Este gráfico se puede configurar para mostrar la información de acuerdo a la velocidad, ya sea ascendente o descendente, o al tiempo, en caso de pruebas a velocidad constante.

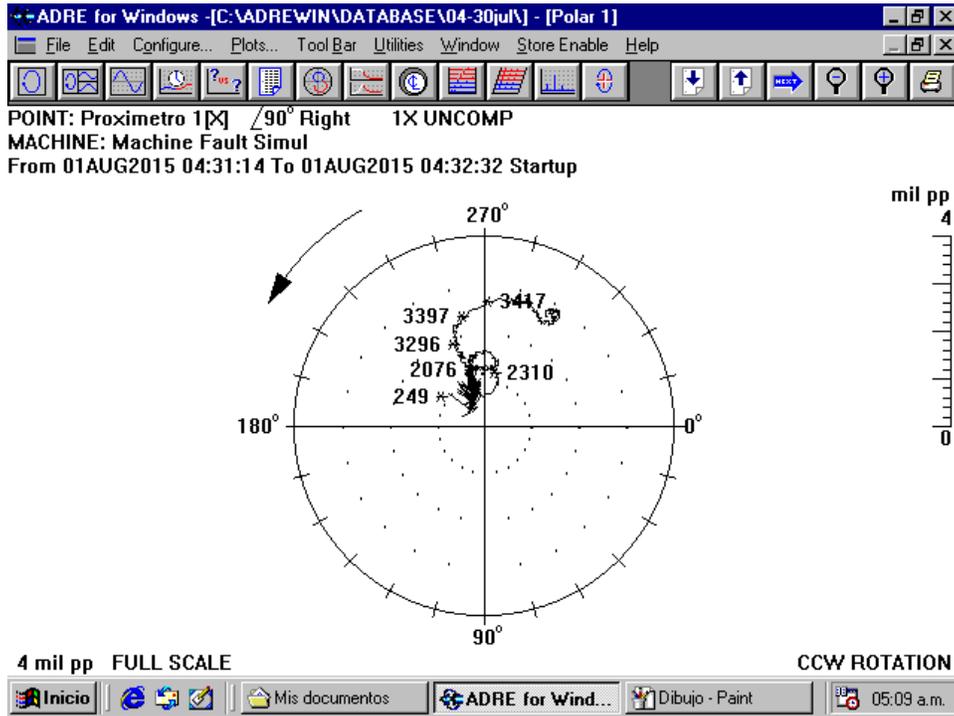


Fig. 4.19 Diagrama Polar en sistema ADRE. Eje X (90°), se observan amplitudes alrededor de 3 mil

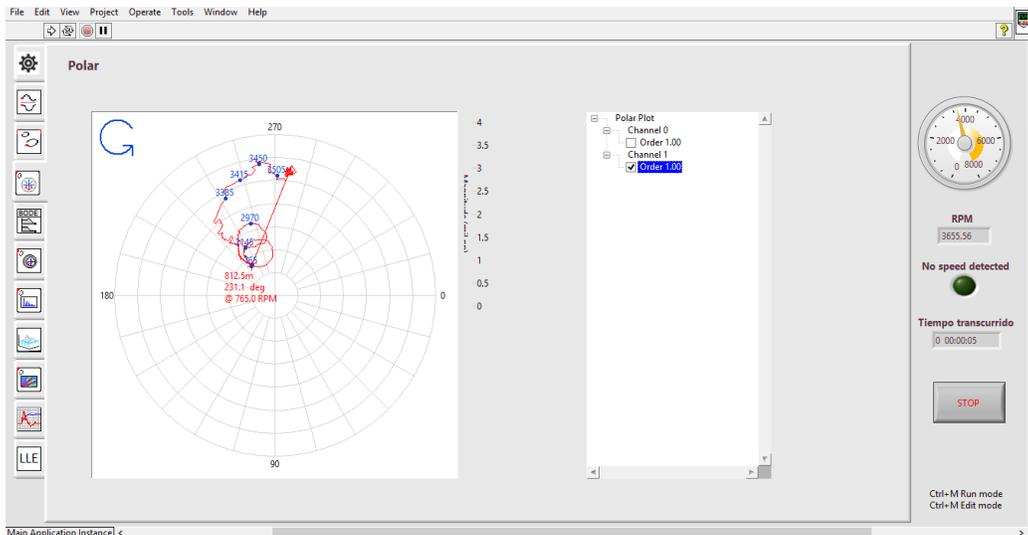


Fig. 4.20 Diagrama Polar en sistema LabVIEW. Eje X (90°), se observan amplitudes alrededor de 3 mil



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

La gráfica de Bode muestra como en 3655 RPM, que es donde las amplitudes aumentaban de forma significativa, llegando a captar hasta 8.37 mil pp., en el eje Y (0°), se atenuaron en gran medida gracias al balanceo realizado, obteniendo 1.85 mil pp., en el mismo sensor Y.

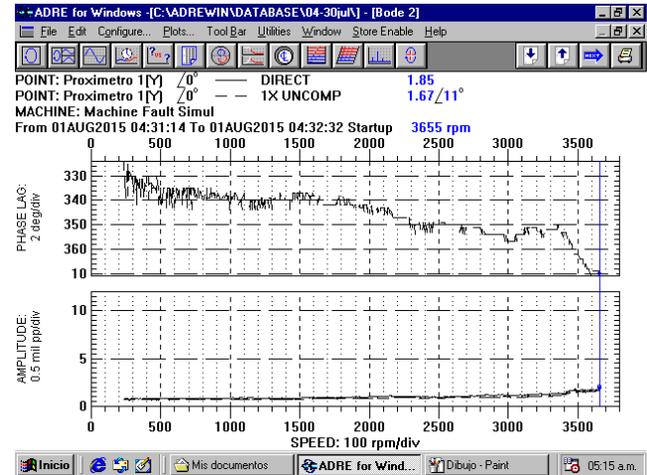
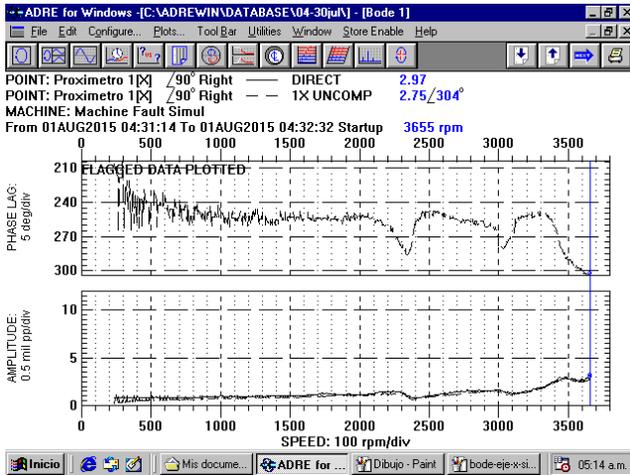


Fig. 4.21 Diagrama de Bode en sistema ADRE. Eje X=2.97 mil pp. (Izq.) / Eje Y=1.85 mil pp. (Der.)

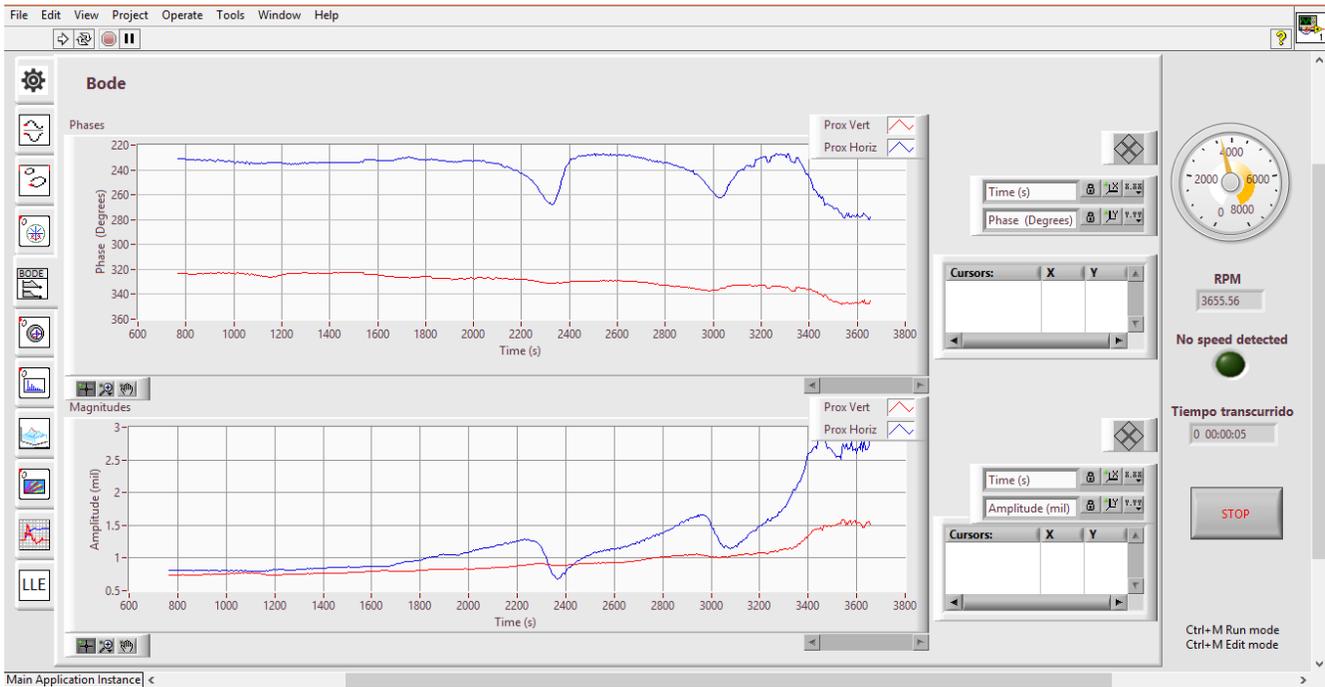


Fig. 4.22 Diagrama de Bode en sistema LabVIEW. Eje X=2.82 mil pp. (Azul) / Eje Y=1.55 mil pp. (Rojo)



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

El diagrama Centerline muestra las amplitudes más pequeñas, ya que es el cambio en la posición radial del rotor, respecto a una referencia fija. Al igual que el diagrama Polar, se puede tomar como referencia la velocidad de giro (RPM) o el tiempo, en caso de manejar una velocidad constante.

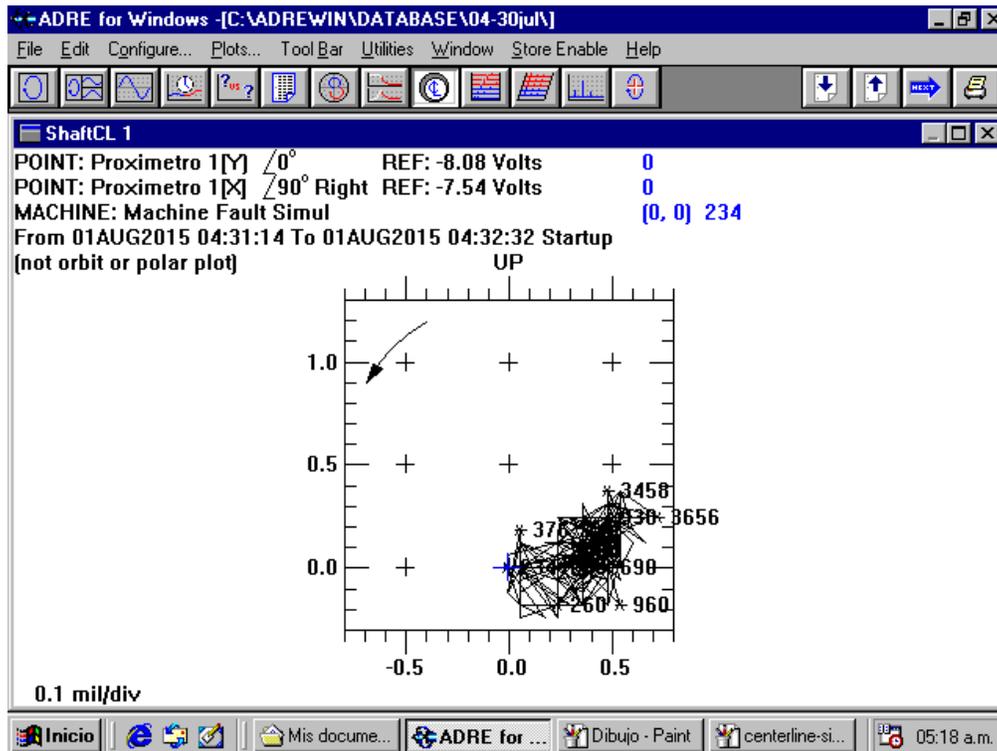


Fig. 4.23 Diagrama Centerline en sistema ADRE. Mediciones tomadas respecto a la velocidad de giro

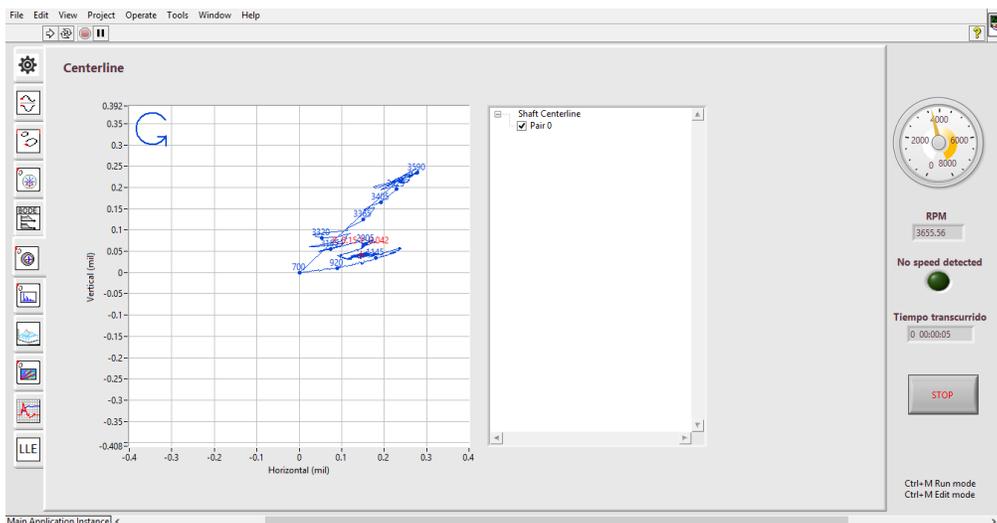


Fig. 4.24 Diagrama Centerline en sistema LabVIEW. Respecto a velocidad de giro.



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

Las amplitudes del espectro son similares en ambos sistemas de monitoreo. En este tipo de gráficas hay ciertos tipos de comportamiento para detectar mal-funciones como desalineamiento y desbalanceo, esto con observar las amplitudes de 1x, 2x, 3x, etc., son patrones establecidos que son respaldados por las demás gráficas obtenidas de este sistema.

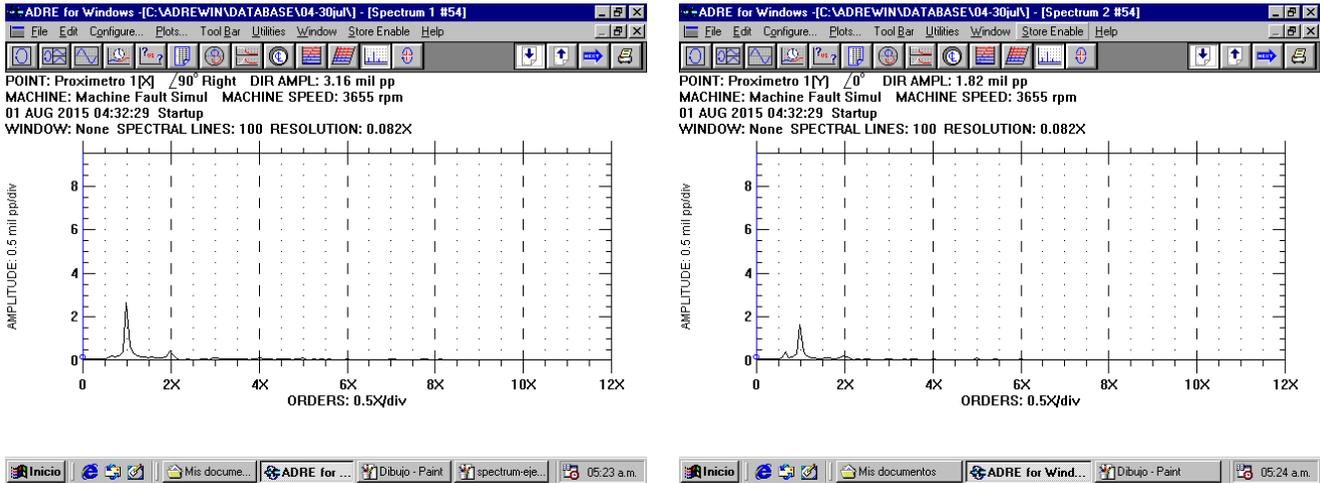


Fig. 4.25 Diagrama Spectrum en sistema ADRE. Eje X=3.16 mil pp. (Izq.) / Eje Y=1.82 mil pp. (Der.)

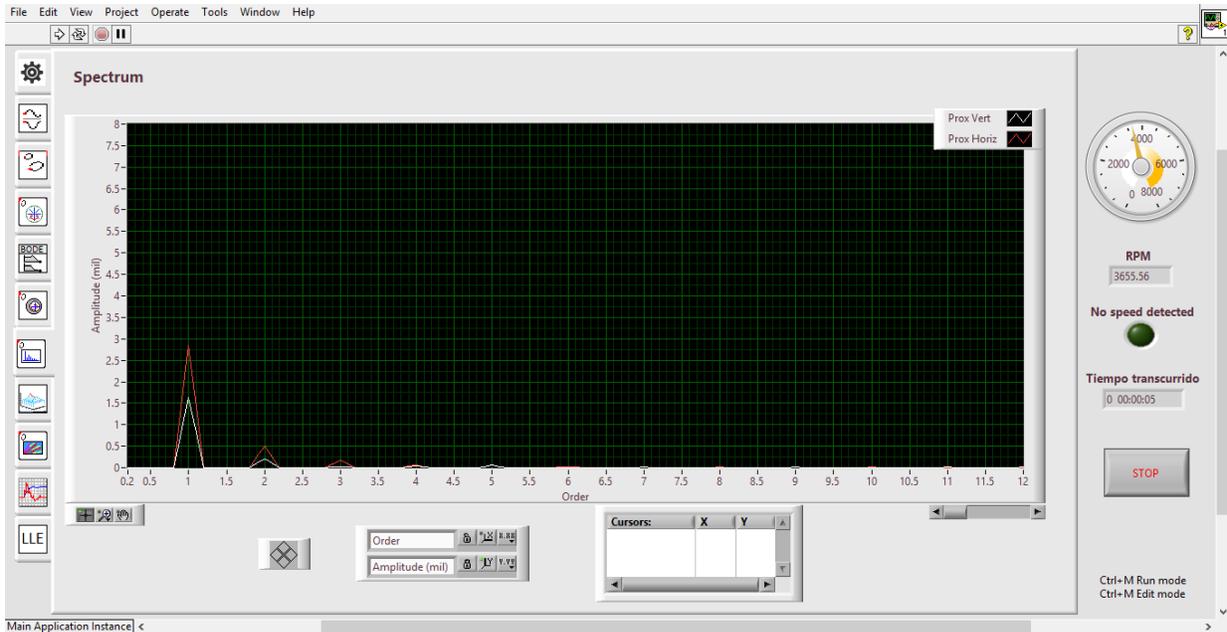


Fig. 4.26 Diagrama Spectrum en sistema LabVIEW. Eje X=2.82 mil pp. (Rojo) / Eje Y=1.55 mil pp. (Blanco)



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

Waterfall y Cascade muestran una serie de espectros de acuerdo a la velocidad y el tiempo, las gráficas dadas por el sistema ADRE tienen un eje horizontal en CPM, mientras tanto el sistema LabVIEW trabaja con Hz., por lo cual se ven un poco diferentes las gráficas.

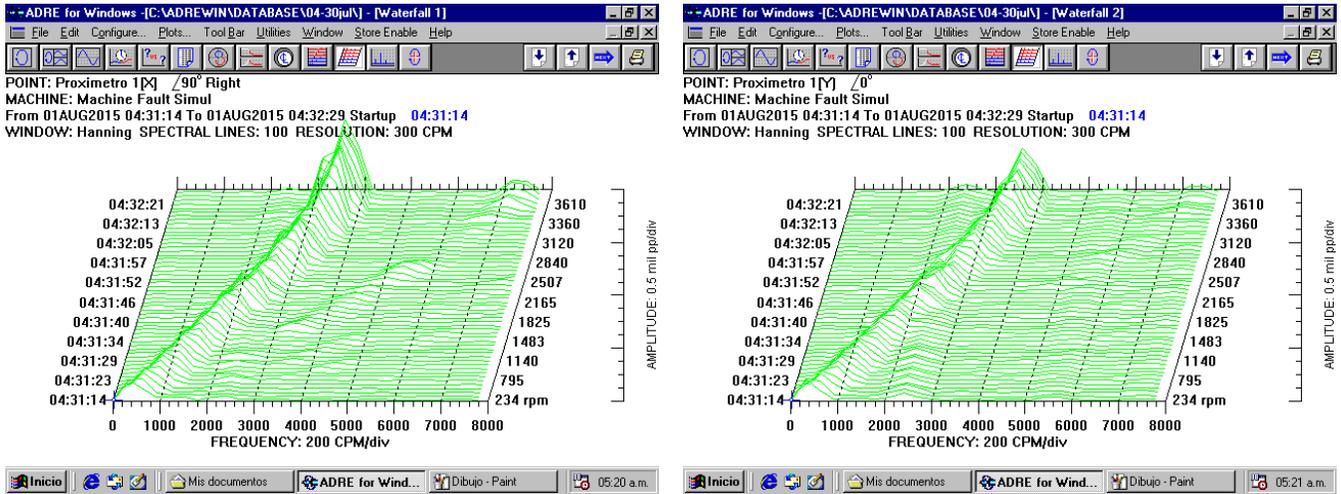


Fig. 4.27 Diagrama Waterfall en sistema ADRE. Eje X (Izq.) / Eje Y (Der.)

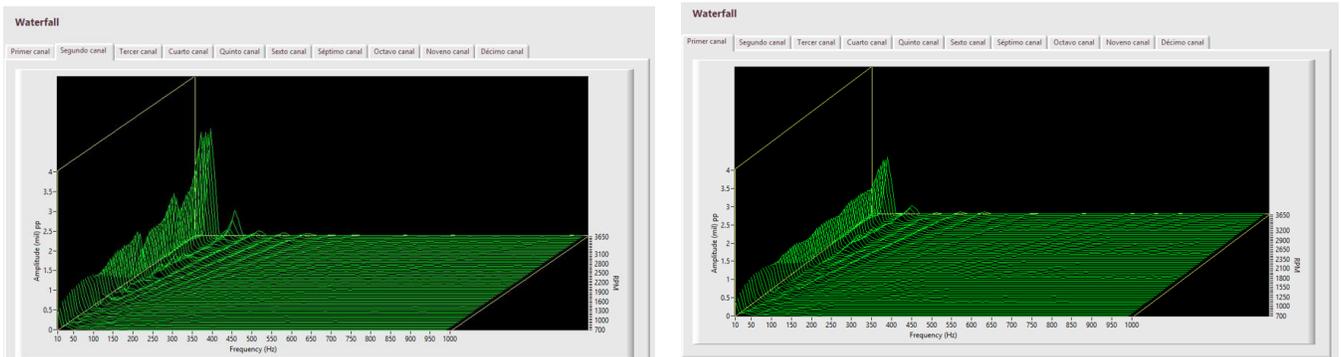


Fig. 4.28 Diagrama Waterfall en sistema LabVIEW. Eje X (Izq.) / Eje Y (Der.)



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

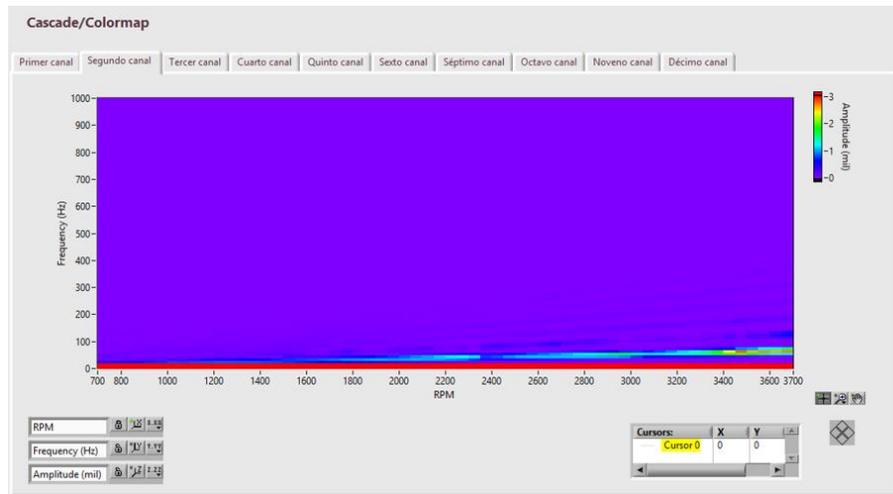


Fig. 4.29 Diagrama Colormap en sistema LabVIEW. Eje X. Una forma diferente y configurable de mostrar los resultados

4.4.3 Prueba de comparación entre Proxímetros, Acelerómetros y Micrófono

Se realizó una prueba en la misma plataforma experimental, cambiando únicamente la velocidad de operación, se trata de un incremento de velocidad que va de 11 a 50 Hz. (3000 RPM). Agregando un acelerómetro tri-axial y un micrófono, descritos anteriormente, para revisar la diferencia entre los resultados y definir cuál es el sensor más apropiado y confiable para ciertas pruebas.

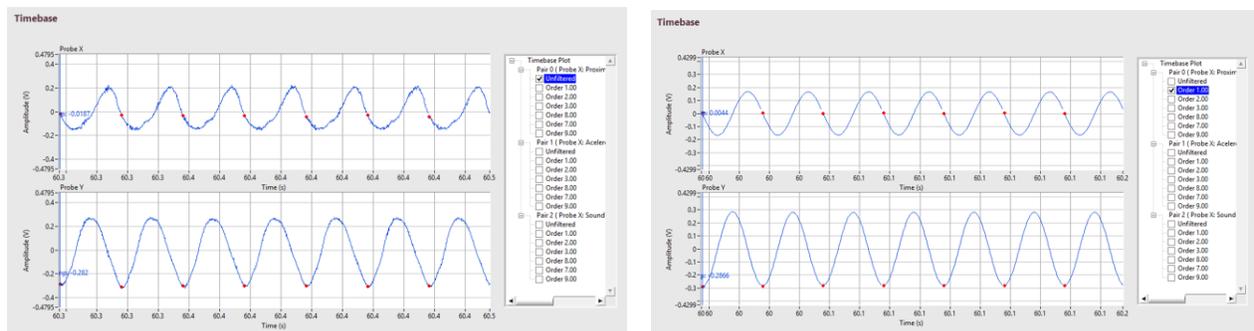


Fig. 4.30 Timebase de proxímetros, señal directa (Izq.) / Timebase de proxímetros, señal 1x (Der.)



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

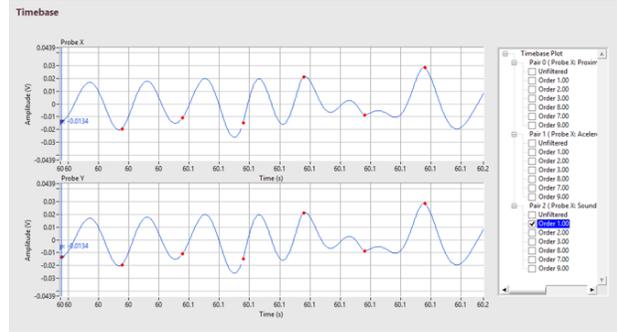
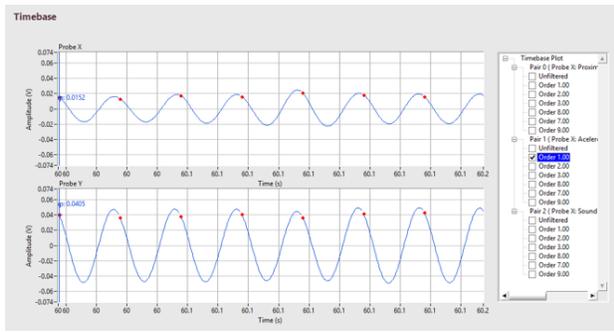


Fig. 4.31 Timebase de acelerómetros, señal 1x (Izq.) / Timebase de micrófono, señal 1x (Der.)

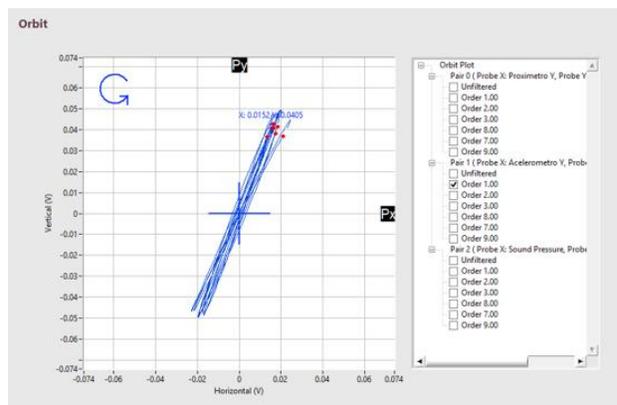
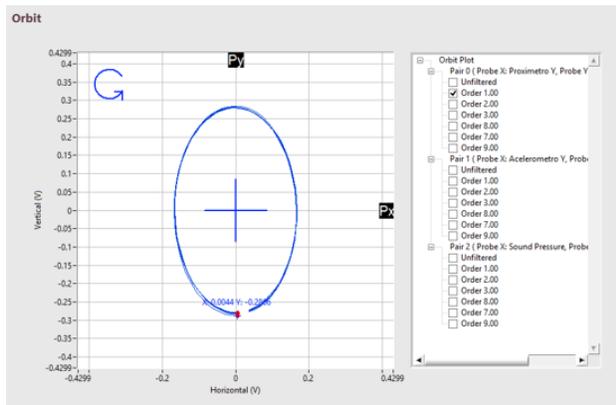


Fig. 4.32 Orbit de proxímetros, señal 1x (Izq.) / Orbit de acelerómetros, señal 1x (Der.)

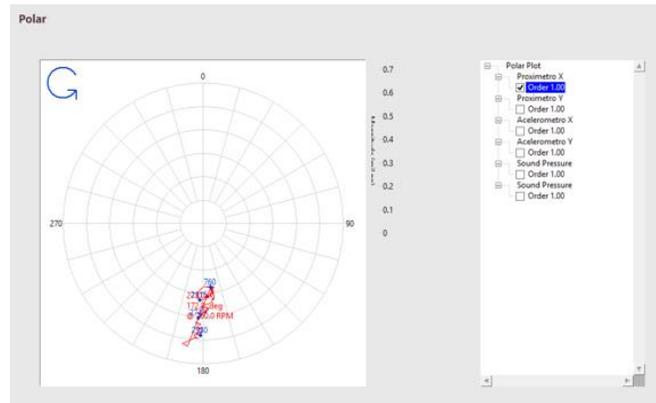
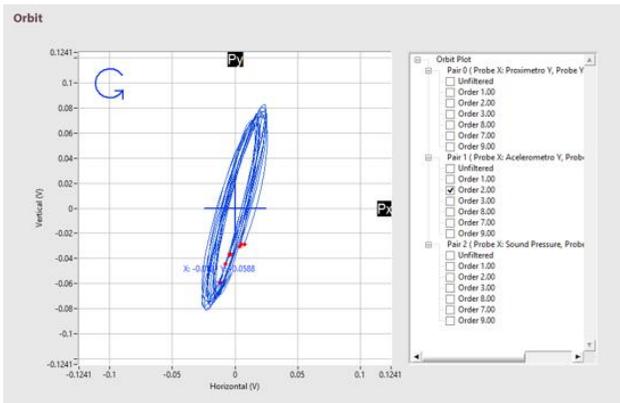


Fig. 4.33 Orbit de acelerómetros, señal 2x (Izq.) / Polar de proxímetro X a 90° (Der.)



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

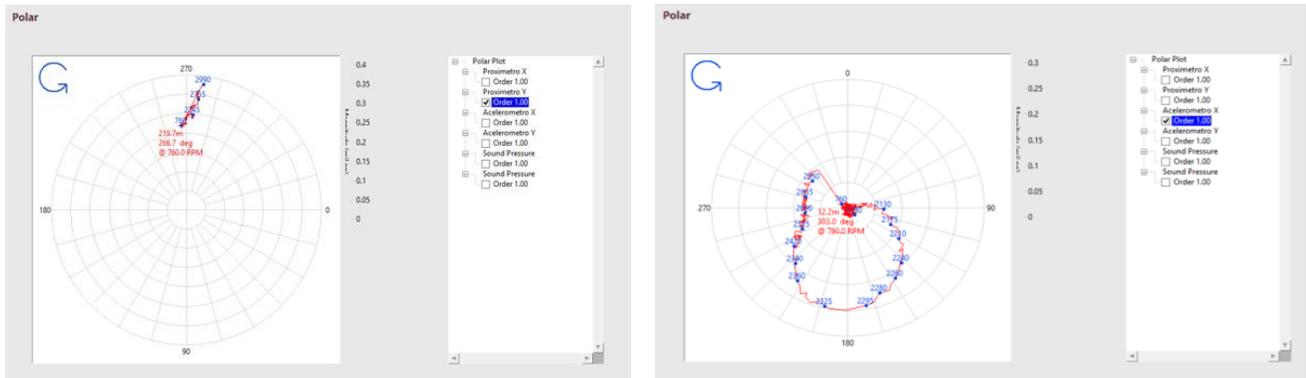


Fig. 4.34 Polar de proximetro Y a 0° (Izq.) / Polar de acelerómetro X a 90° (Der.)

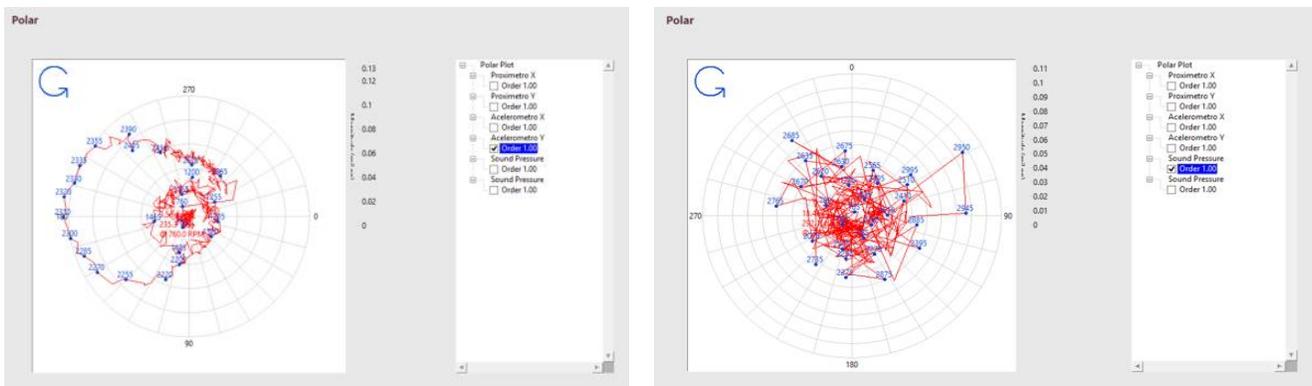


Fig. 4.35 Polar de acelerómetro Y a 0° (Izq.) / Polar de micrófono (Der.)

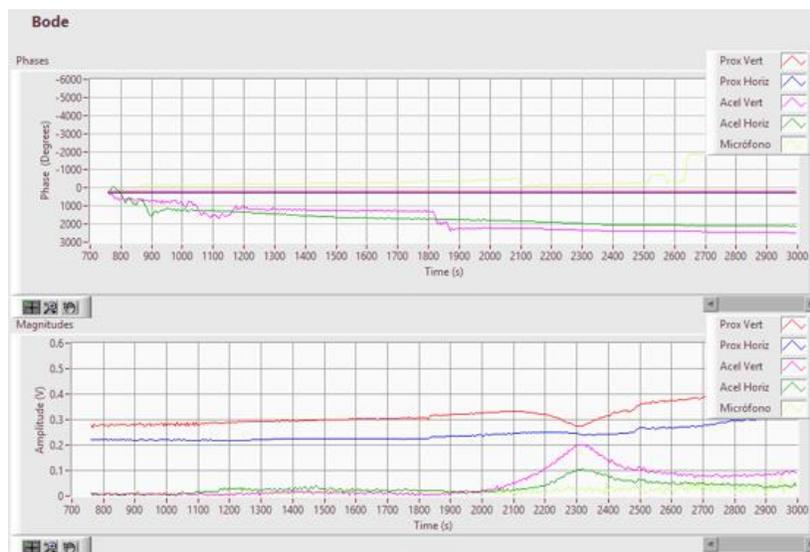


Fig. 4.36 Diagrama de Bode, todos los sensores mostrados en la misma gráfica



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

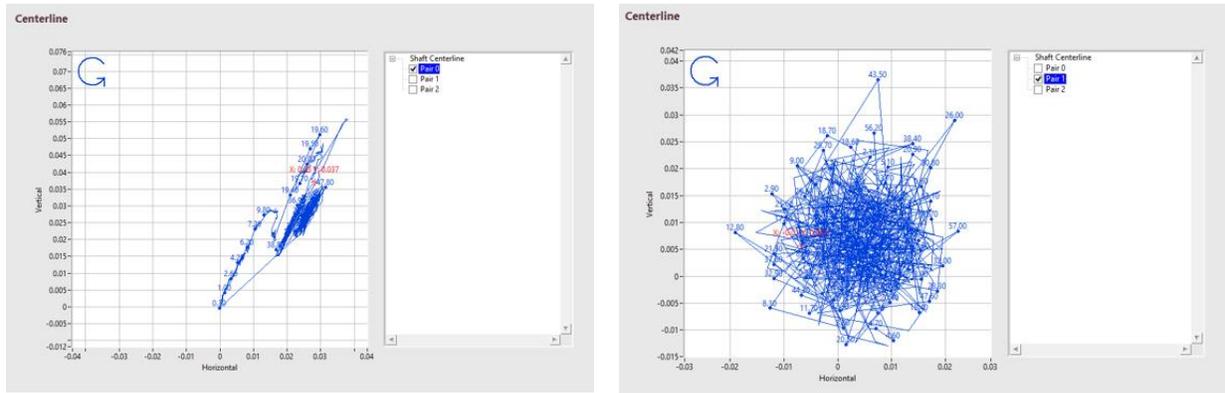


Fig. 4.37 Centerline de proxímetros (Izq.) / Centerline de acelerómetros (Der.)

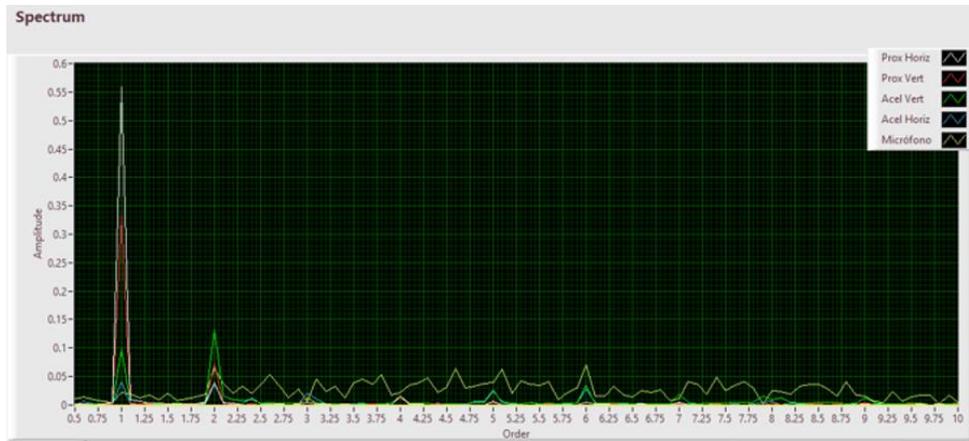


Fig. 4.38 Diagrama Spectrum, se muestran las gráficas juntas para mejor comparación

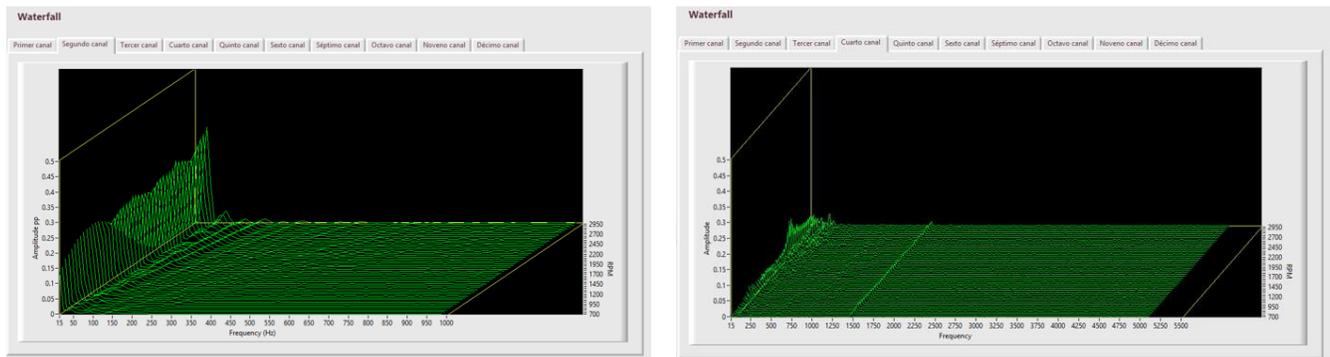


Fig. 4.39 Waterfall de proxímetro Y a 0° (Izq.) / Waterfall de acelerómetro Y a 0° (Der.)



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

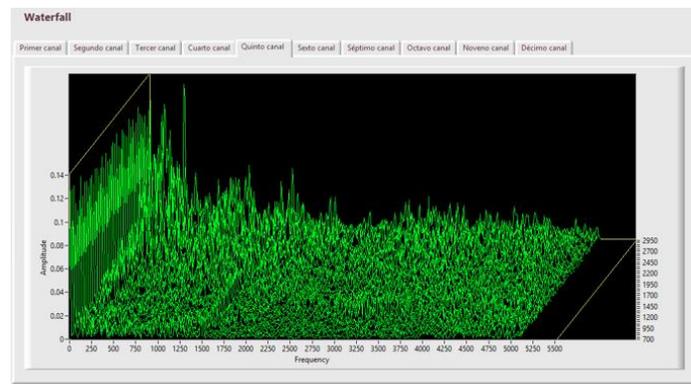


Fig. 4.40 Waterfall de micrófono

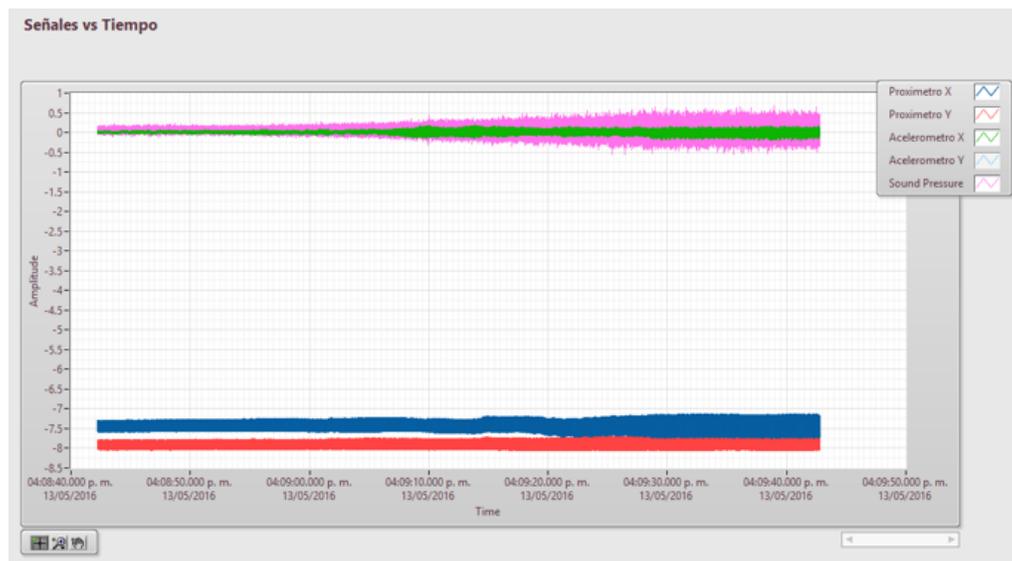


Fig. 4.41 Señales de Amplitud vs Tiempo de todos los sensores usados en esta prueba

4.4.4 Prueba de aplicación de filtros externos y post-procesos (LLE) programados en MATLAB

Esta prueba también se realizó en la misma plataforma experimental, con una velocidad constante de 50 Hz., durante 4 segundos. La adquisición de datos fue de este periodo de tiempo, ya que para utilizar el post-proceso del cálculo de LLE, se debe tomar en cuenta la cantidad masiva de datos arrojados. Con un muestreo de 10k por segundo y utilizando los 5 canales para los diferentes sensores, la comunicación



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

entre LabVIEW y Matlab logra dar resultados en menos de 15 minutos. Demasiados datos consumirían el espacio del buffer de LabVIEW.

El funcionamiento del programa realizado en esta tesis, fue el siguiente:

- 1.- Adquisición de datos por medio de los sensores
- 2.- Estos datos pasan por el filtro (Integración, Derivación y Smoothing) programado en Matlab, este último permite cambiar el average del cálculo. Este average tiene un valor de 4. Este cálculo realiza una integración y una derivación descritas anteriormente (Pág. 77)
- 3.- Los datos filtrados, pasan al segundo post-proceso, que es el cálculo de una serie de características no lineales con la finalidad de obtener el LLE (proceso descrito en Cap. 3)
- 4.- Los datos ya post-procesados, son graficados. LabVIEW permite agregar un filtro más a nuestra señal, se referirá a este filtro como filtro adicional, que son los diferentes órdenes en que puede ser mostrada la señal. Estos son configurables en LabVIEW.

Proxímetros

En la figura siguiente se muestra la señal directa y sin filtros adicionales de los proximímetros colocados ortogonalmente.

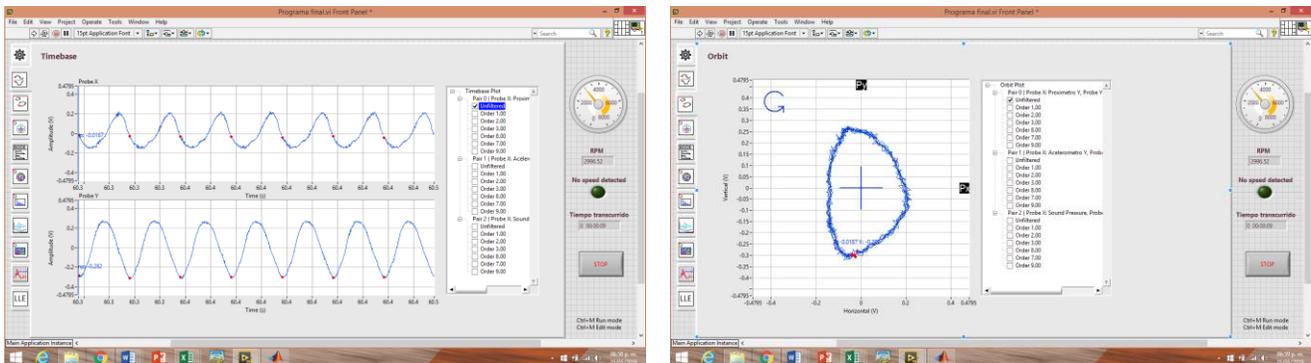


Fig. 4.42 Timebase, $X=0.37$, $Y=0.53$ v pp. (Izq.) / Orbit (Der.)



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

A continuación, se muestra graficada la señal filtrada de los proximetros, es decir, aplicando el post-proceso para integración y derivación. Se puede notar como las amplitudes disminuyen y las órbitas se distorsiona levemente en ciertos fragmentos. En esta figura, aún no se han aplicado filtros adicionales.

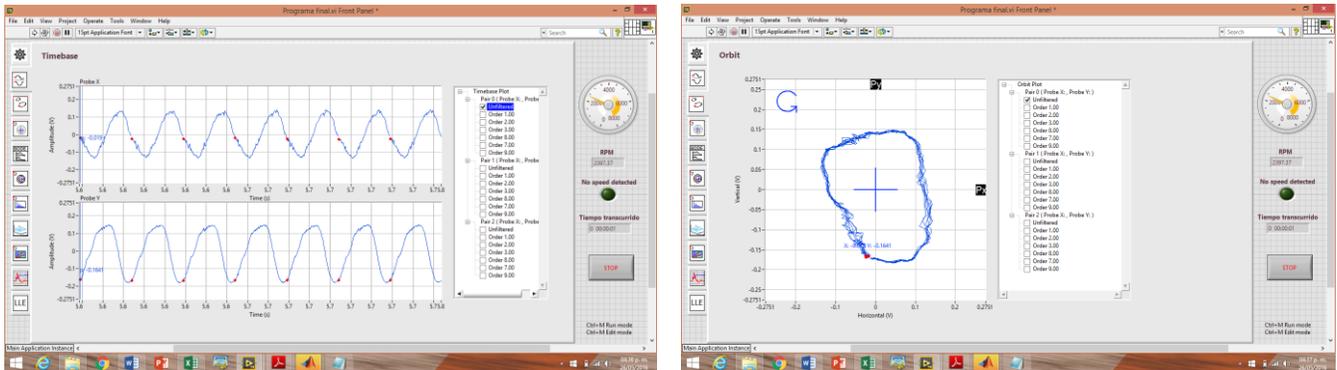


Fig. 4.43 Timebase, $X=0.24$, $Y=0.31$ v pp. (Izq.) / Orbit (Der.)

En la siguiente figura, se ve la señal ya filtrada de los proximetros, es decir, integrada y derivada, además de agregar el filtro adicional de orden 1.

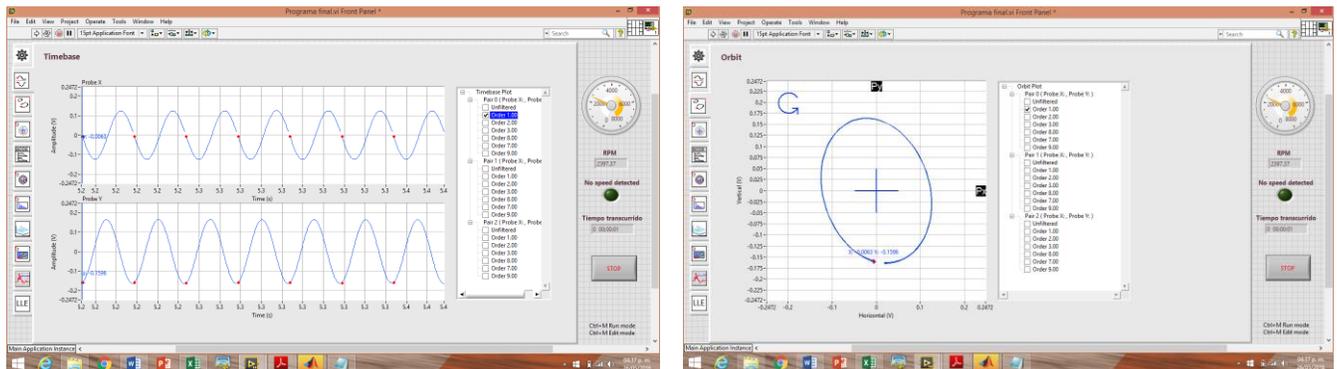


Fig. 4.44 Timebase, $X=0.24$, $Y=0.32$ v pp. (Izq.) / Orbit (Der.)



Acelerómetros

En la figura siguiente se muestra la señal directa y sin filtros adicionales de dos direcciones del acelerómetro tri-axial, estas dos direcciones son las correspondientes a la posición de los proximetros para poder hacer la comparación.

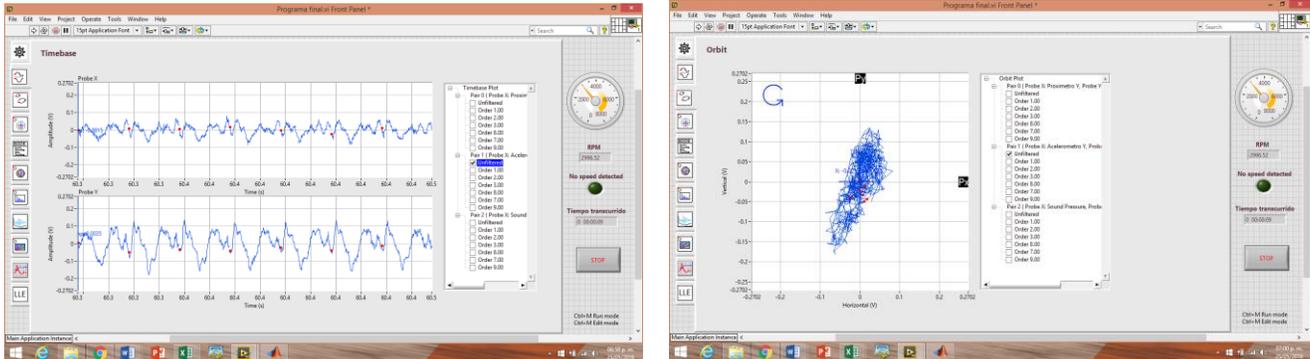


Fig. 4.45 Timebase, X=0.17, Y=0.32 v pp. (Izq.) / Orbit (Der.)

Al igual que los proximetros, se presenta a continuación la señal filtrada de los acelerómetros, es decir, aplicando el mismo post-proceso para integración y derivación. En esta figura, aún no se han aplicado filtros adicionales.

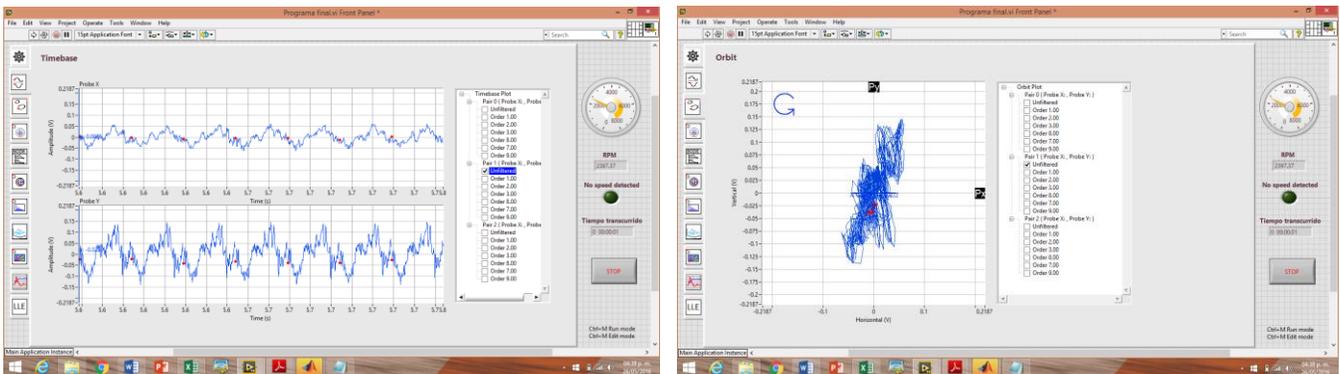


Fig. 4.46 Timebase, X=0.12, Y=0.29 v pp. (Izq.) / Orbit (Der.)



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

En la siguiente figura, se puede ver la señal ya filtrada de los acelerómetros, es decir, integrada y derivada, además de agregar el filtro adicional de orden 1.

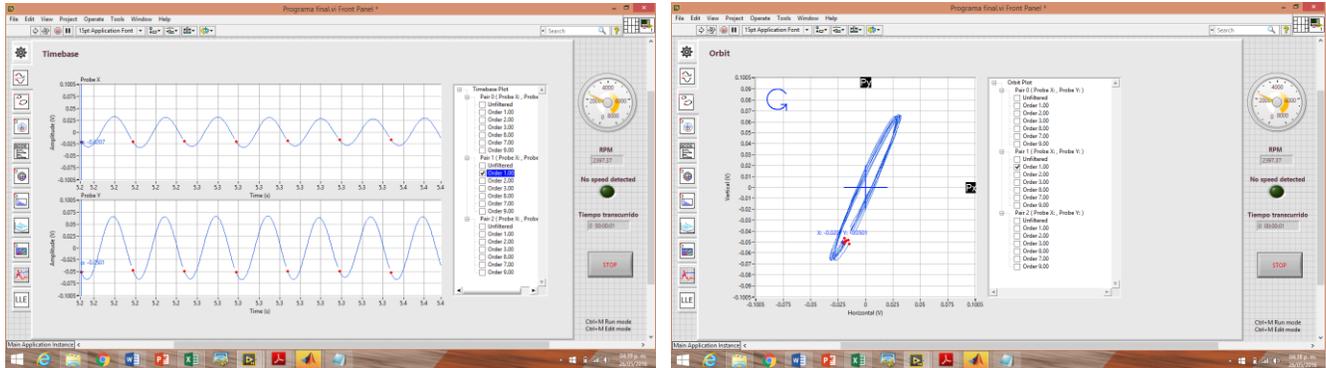


Fig. 4.47 Timebase, X=0.06, Y=0.13 v pp. (Izq.) / Orbit (Der.)

Micrófono

El micrófono fue un sensor relativamente nuevo en cuanto a la aplicación que se le dio en esta prueba, en el laboratorio de vibraciones y rotodinámica. De inicio cabe señalar que la gráfica de Orbit no se puede generar, ya que se necesitan de dos sensores con ubicaciones ortogonales. En este caso se plantean solo los gráficos de Timebase. En estos se puso atención especial al perteneciente al filtro adicional de orden 8, ya que observando la gráfica de Spectrum, se notó la presencia de una amplitud muy grande perteneciente al orden 8. A continuación se muestran las figuras correspondientes al micrófono, con la señal directa, sin filtros adicionales (Izq.) y con señal filtrada con post-proceso de integración y derivación sin filtros adicionales (Der.).

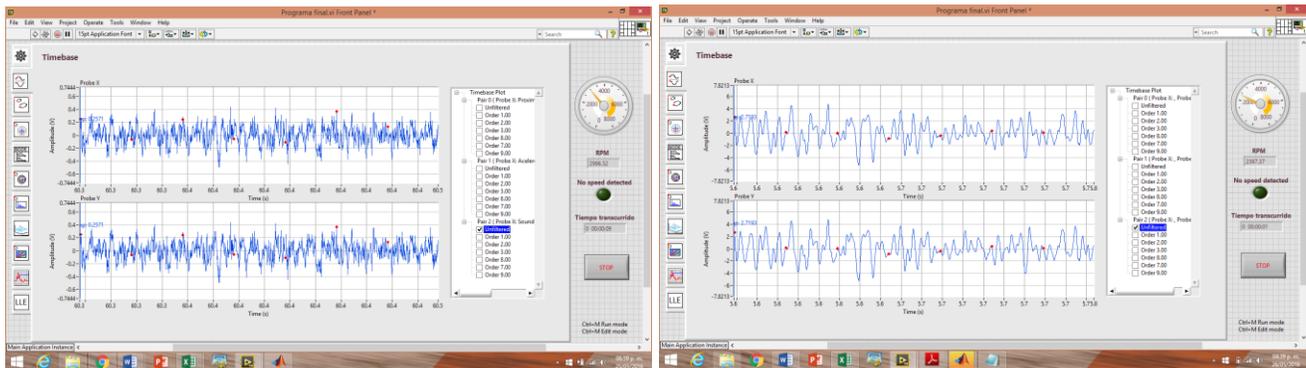


Fig. 4.48 Timebase señal directa X=0.76 v pp. (Izq.) / Timebase señal filtrada X=0.79 v pp. (Der.)



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

Las siguientes imágenes, pertenecen a la señal filtrada con el post-proceso de integración y derivación del micrófono, cada una con un filtro adicional de orden distinto.

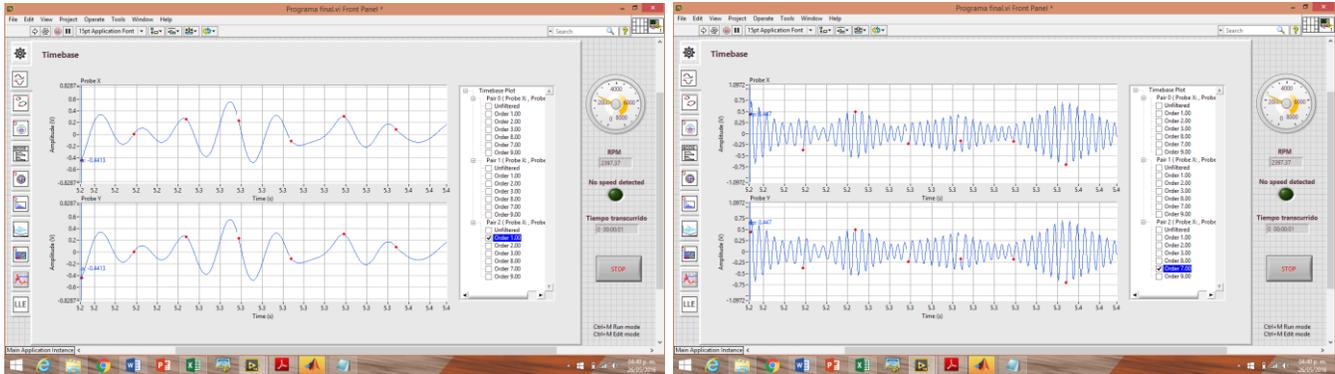


Fig. 4.49 Timebase Orden 1 $X=0.51$ v pp. (Izq.) / Timebase Orden 7 $X=1.42$ v pp. (Der.)

Las mayores amplitudes se muestran en el orden 8, esto debido a la ubicación del micrófono, el cual se colocó lo más cerca posible al disco del eje. Este disco, como se mencionó anteriormente, cuenta con 8 tornillos que lo mantienen unido. Estos 8 tornillos (con sus respectivas tuercas), son lo suficientemente grandes para que, al girar a 3000 RPM, generen cierta turbulencia que es captada por el micrófono, convirtiendo esa excitación en la más grande.

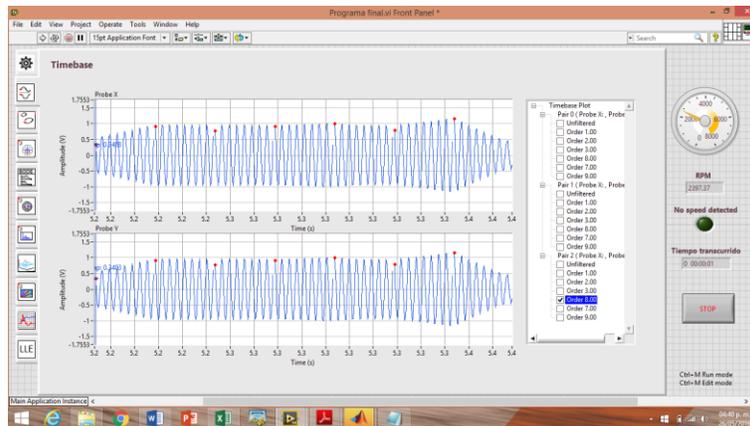


Fig. 4.50 Timebase Orden 8 $X=2.28$ v pp.

En las siguientes imágenes se mostrarán los resultados de los parámetros no lineales, calculados con la señal adquirida por cada uno de los sensores. La señal adquirida fue filtrada con el post-proceso de integración y derivación. Estos post-procesos se explicaron en el capítulo 3.



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

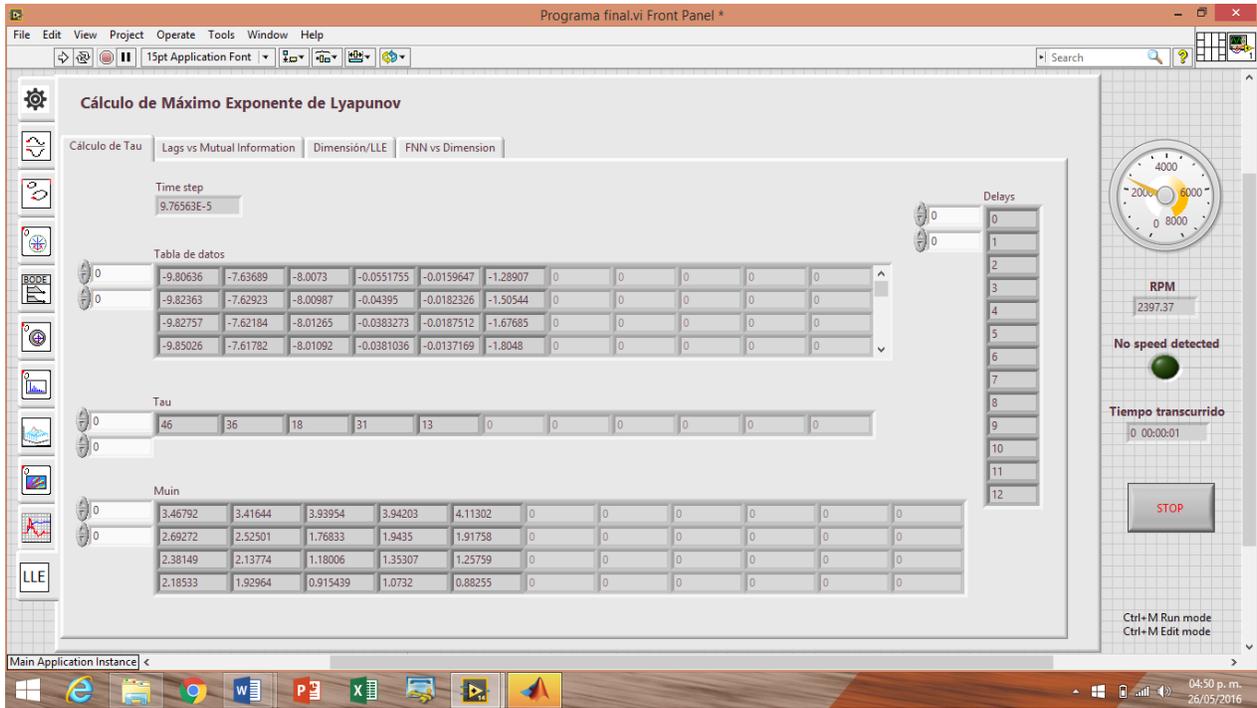


Fig. 4.51 Tabla de datos filtrados y cálculo de Tau

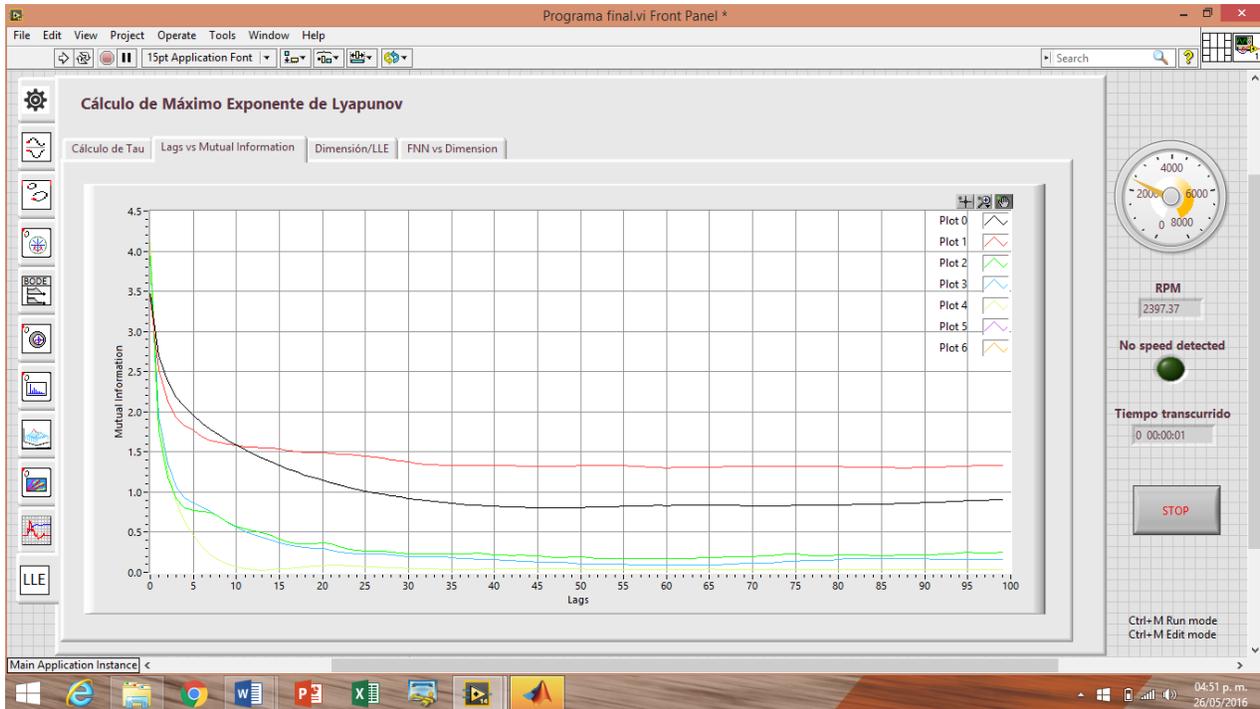


Fig. 4.52 Gráfica de Lags vs Mutual Information



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

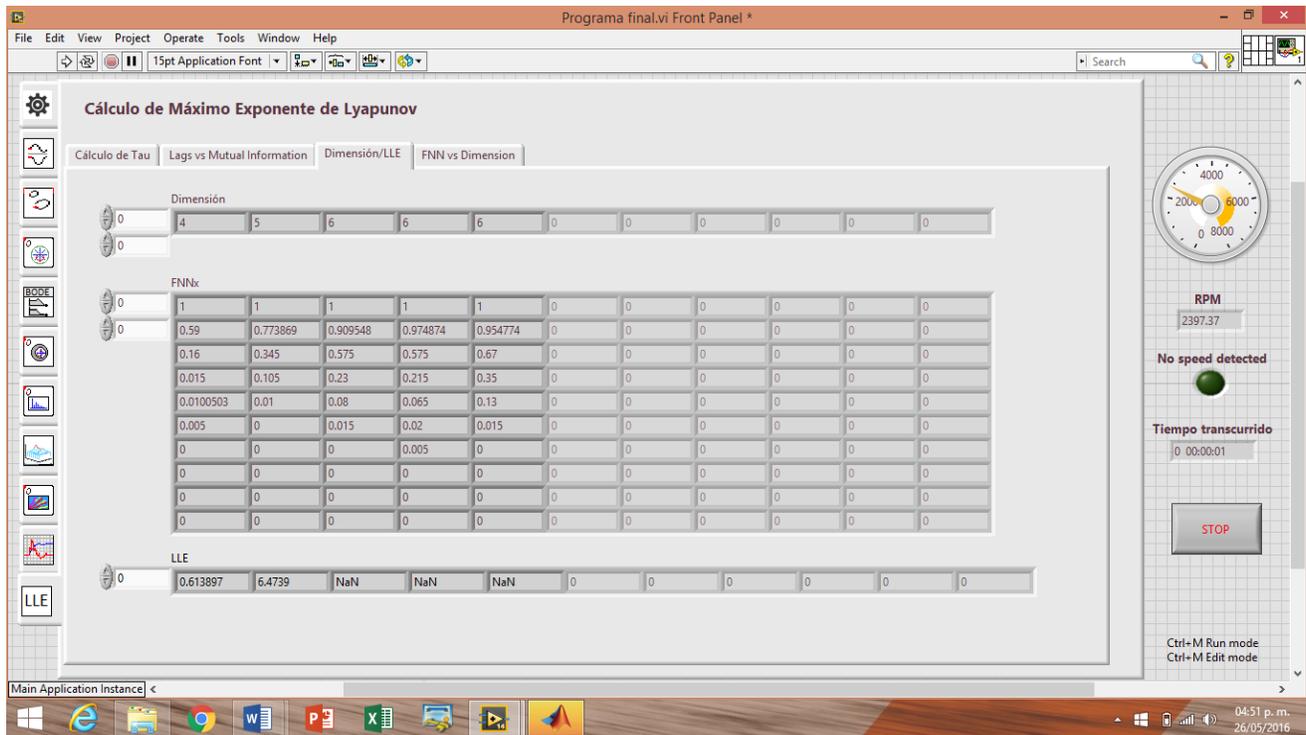


Fig. 4.53 Dimensión y LLE

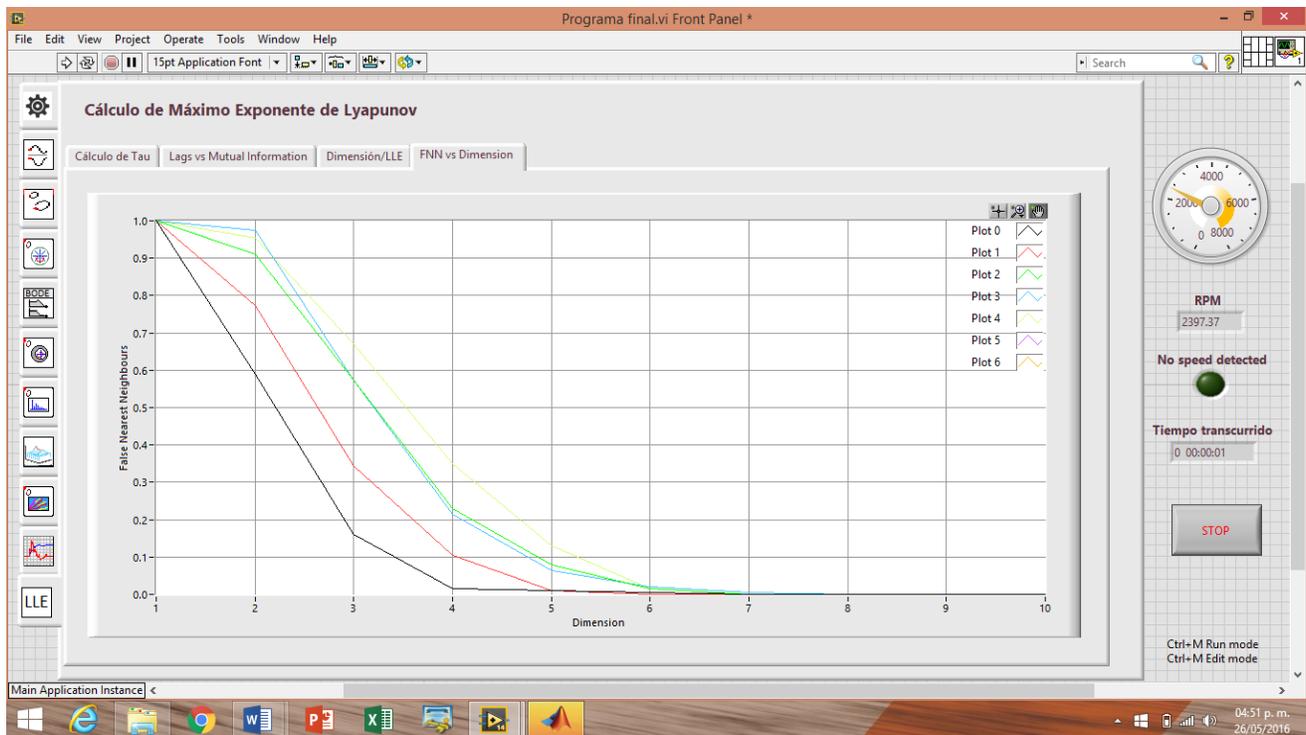


Fig. 4.54 FNN vs Dimensión



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

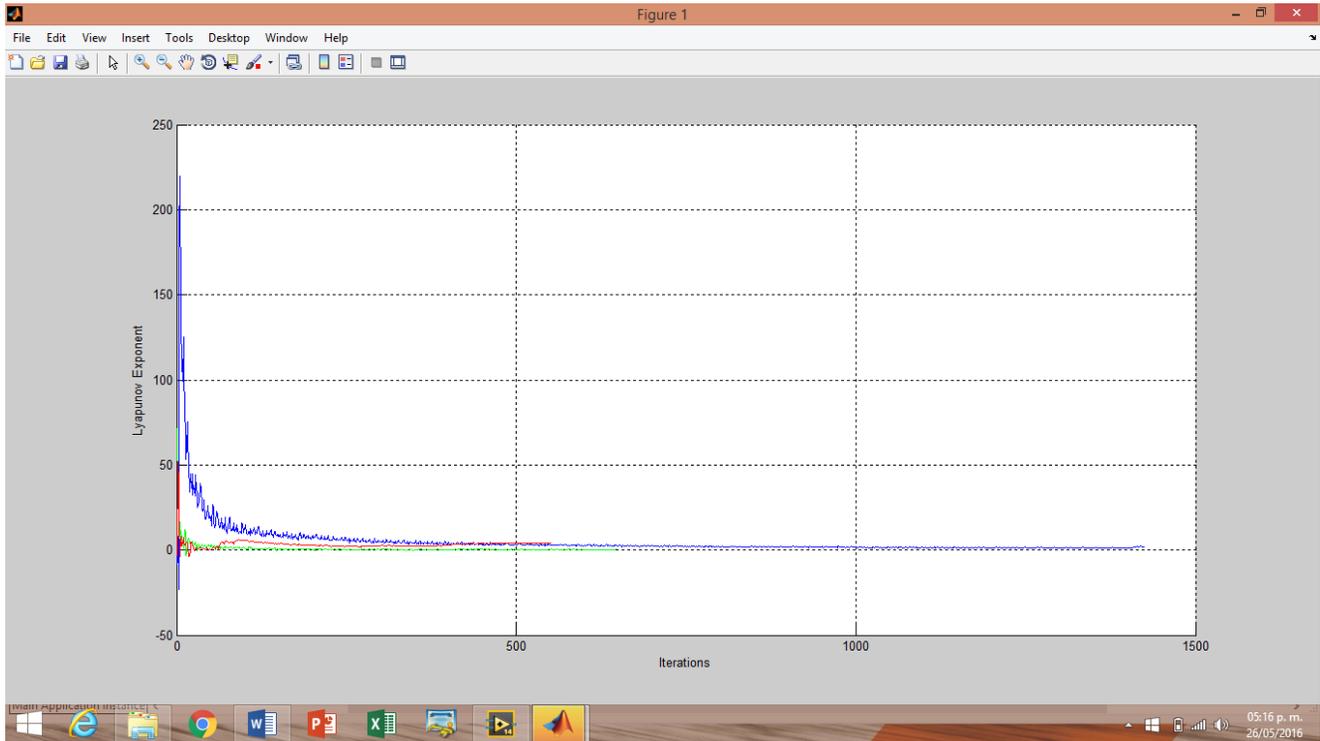


Fig. 4.55 Gráfica de Largest Lyapunov Exponent



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"



Conclusiones

Se logró realizar un programa con software NI LabVIEW 2014, capaz de monitorear la condición de máquinas rotativas con ayuda de sensores y hardware de National Instruments, así mismo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1.- Emular las características básicas del sistema de adquisición de datos ADRE de Bently Nevada con el que cuenta el Laboratorio de Vibraciones y Rotodinámica de ESIME Zacatenco en el Instituto Politécnico Nacional.
- 2.- El programa se realizó de manera que se pueda hacer más versátil, es decir, ampliar su capacidad integrando diferentes post-procesos, canales y características que beneficien su velocidad y uso.
- 3.- Integrar post-procesos programados en Matlab, para que se realicen de forma automática después de adquirir señales o para aplicarlos a datos adquiridos en otros sistemas.
- 4.- Se logró comprobar la mejora en la plataforma experimental, haciendo pruebas antes y después del proceso de alineamiento y balanceo. Se respaldaron los resultados en LabVIEW con sistema ADRE.
- 5.- Se utilizó el programa desarrollado en esta tesis para el balanceo de la misma plataforma experimental, ya que este proporciona las amplitudes y su fase.
- 6.- Se comprobó que los proximetros proporcionaron una señal menos susceptible al ruido, aunque sean los de más difícil montaje. Los acelerómetros son mucho más sensibles, por lo que la ubicación de estos es fundamental para un mejor resultado, ya que si se posicionan en un lugar erróneo se pueden captar señales de ruido por factores externos que complican tanto la interpretación de resultados, así como, el post-proceso de los datos.
- 7.- Se incursionó en la utilización del micrófono en este laboratorio para monitorear la condición de la plataforma experimental, debido a factores externos de ruido ajenos a nuestro control, los resultados no son muy claros, sin embargo, esto ayudó para conocer ciertas características de su funcionamiento tales como la mejor posición de montaje para adquirir los datos y la capacidad de reconocer factores repetitivos de presión de aire generada por el movimiento del rotor o diversos agentes.



Trabajos futuros

El software en el que se realizó el programa es configurable y adaptable a lo que el usuario quiera hacer. Este programa se puede volver más completo y robusto, como se describe a continuación.

- 1.- Aumentar la cantidad de filtros a elegir, estos pueden ser configurables y/o estar en algún otro lenguaje de programación.
- 2.- Cambiar ciertas partes de la programación a bajo nivel, lo cual haría más rápido el proceso, ya que se sustituirían subVIs con elementos más sencillos. Al hacer esto, la configuración completa del programa se podría realizar desde el panel frontal, sin la necesidad de entrar en el diagrama de bloques.
- 3.- Una vez que el punto número 2 este completo, este programa se puede convertir en una aplicación, esto es, que se pueda utilizar en una computadora que no cuente con el software de LabVIEW.
- 4.- Añadir canales si se piensa utilizar a nivel de industria, el código permite la rápida modificación de estos elementos.
- 5.- Añadir un temporizador que permita programar una serie de pruebas de forma automática y emita alarmas en caso de que el sistema exceda ciertas condiciones establecidas.
- 5.- Realizar pruebas en una máquina rotativa del ramo industrial con ambientes controlados para las pruebas.
- 6.- Continuar con pruebas donde se empleen los 3 sensores utilizados en esta tesis, para mejorar la calidad de resultados con ayuda de filtros especiales para cada sensor.



Referencias

- [1] Balanchandran, B., Magrab, E. B. (2006). Vibraciones. México: Cengage Learning.
- [2] Burton, R. (1958). Vibration and Impact. Estados Unidos: Addison-Weasley.
- [3] Rao, S. S. (2012). Vibraciones Mecánicas, México: Pearson Educación.
- [4] Mosquera, G., Piedra Díaz, M. de la V., Armas Cardona, R. A. (2001). Las Vibraciones Mecánicas y su Aplicación al Mantenimiento Predictivo. Venezuela: CDCH.
- [5] Rao, J. S. (2011). History of Rotating Machinery Dynamics. Alemania: Springer.
- [6] Stodola, A. (1927). Steam and Gas Turbines, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- [7] Föppl, O. (1919). *Zeitschrift der VDI*, p. 866.
- [8] Ehrich, F.F. (1992). Handbook of Rotor Dynamics. Estados Unidos: McGraw-Hill.
- [9]. J. Gómez-Mancilla, J. A. Meda-Campaña, G. H. Salazar-Silva, (2007). Pressurized Bearing Design Using Nonlinear Active Control Attenuating Vibrations, 10mo Congreso Nacional De La ESIME, Mex. D.F.
- [10] Avalos Gauna, J., (2011). Análisis y Validación por Volumen Finito de los Coeficientes Rotodinámicos de Rigidez de una Chumacera Corta Con y Sin Presurización. (Tesis de Maestría). IPN SEPI ESIME Zacatenco. México.
- [11] (1994). Diagnóstico de Problemas de Vibración en Maquinaria. (Manual). TMV Instrumentación S. A. de C. V. México
- [12] Montiel Varela, G., (2011). Validación Numérica del Amortiguamiento Crítico para el Tercer Modo de Vibración. (Tesis de Maestría). IPN SEPI ESIME Zacatenco. México
- [13] Rao, J.S., Sreenivas, R., (2003). Dynamic Analysis of Misaligned Rotor Systems, Advances in Vibration Engineering. *Journal of Vibration Institute of India*, 2 (2), p. 128.
- [14] Fernández Tavitas, D. A., Nieto González, J. P., (2014). Detección de Barras Rotas en Motores de Inducción Utilizando SMCA (Square Motor Current Signature Analysis). *Research in Computing Science*, 73, 193-202.
- [15] White, G. (2010). Introducción al Análisis de Vibraciones. Estados Unidos: Azima DLI.



- [16] Pacheco Lara, J. L., (2011). Diseño de Detalle: Instrumentación y Experimentación de Sistema Chumacera Híbrida. (Tesis de Maestría). IPN SEPI ESIME Zacatenco. México.
- [17] Gómez Mancilla, J. C., Sinou, J-J., Nosov, V. R., Thouverez, F., Zambrano, A., (2004). The Influence of Crack-imbalance Orientation and Orbital Evolution for and Extend Cracked Jeffcott Rotor. *Comptes Rendus Mécanique*. 332. 955-962.
- [18] Gómez Mancilla, J. C., Zambrano Reyes, A. (2005). A Local Resonance of Crack-imbalance Orientation and Orbital Evolution to Detect Rotor Cracks: Part 1, Numerical Analysis. *Orlando: International Modal Analysis*.
- [19] Gómez Mancilla, J. C., Machorro López, J. M. (2005). Local Resonance of Crack-Imbalance Orientation and Orbital Evolution to Detect Mid-span Rotor Cracks. Part 2. Experimental Validation. *Orlando: International Modal Analysis*.
- [20] Machorro López, J. M., (2005). Experimentación y Validación de Modelos Dinámicos para Detectar Fisuras en Ejes Rotatorios en Maquinaria en Operación. (Tesis de Maestría). IPN SEPI ESIME Zacatenco. México.
- [21] Gómez Mancilla, J. C., Nossov, V. R. (2002). Perturbed Pressure Field Solution for Misaligned Short Journal Bearings. *International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Honolulu, Hawaii*.
- [22] Huertos Castellano, D., (2011). Mantenimiento Predictivo de Turbinas de Gas. (Tesis). Universidad Carlos III de Madrid. España.
- [23] Fallas más comunes que producen vibración: Desalineamiento, Vibratec, Recuperado el 21 de Octubre de 2014 a las 5:45pm de http://www.vibratec.net/pages/tecnico_deslineamiento.html
- [24] ISO 13373-1:2002, Condition Monitoring and Diagnostics of Machines - Vibration Condition Monitoring - Part 1: General Procedures
- [25] ISO 13373-2:2005, Condition Monitoring and Diagnostics of Machines - Vibration Condition Monitoring - Part 2: Processing, Analysis and Presentation of Vibration Data
- [26]. Tony R. Kuphaldt. (2014). Lessons In Industrial Instrumentation. Version 2.03 (development)
- [27]. Creus Sole A. (1997). Instrumentacion Industrial. Alfaomega marcombo.



- [28]. Cooper William D. (1991). Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición. Prentice Hall.
- [29]. Pallás Areny Ramón. (2006). Instrumentos electrónicos básicos. Marcombo.
- [30] Sinha, J. K., Lees, A. W., Friswell, M. I. (2004). Estimating unbalance and misalignment of a flexible rotating machine from a single run-down. *Journal of Sound and Vibration*, 272 (3-5), 967-989.
- [31]. Creus Sole A. (2002). Instrumentación Industrial.marcombo 8ª edición
- [32]. Tony R. Kuphaldt. (2008). Lessons In Industrial Instrumentation.
- [33]. Ramos Castro Juan, Rosell Ferrer Javier. (2004). Sistemas de instrumentación Pere Riu Costa, Universitat Politecnica de Catalunya.
- [34]. Lajara Vizcaíno José Rafael, Pelegrí Sebastiá José. (2012). LabVIEW: Entorno gráfico de programación, Marcombo.
- [35] Genta, G. (2005). Dynamics of Rotating Systems, Estados Unidos: Springer.
- [36] J. V. Fedor, (1960). "A Sommerfeld solution for finite bearings with circumferential grooves", ASME Trans, Journal of Basic Engineering.
- [37] Tian Y., Bonis Marc. (1995). "Analytical approach for the determination of the dynamic coefficients of hybrid bearings", ELSEVIER, pp. 66-76.
- [38] I. F. Santos y F. Y. Watanabe (2003). "Feasibility of influencing the dynamic fluid film coefficients of multirecess journal by means of active hybrid lubrication". Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.
- [39]. http://www.ni.com/labview/esa/?icid=HP_FG_es-MX_09240906_0617_png
- [40]. <http://www.ni.com/gettingstarted/labviewbasics/esa/environment.htm>
- [41] Gomez Mancilla, J. C. (2014). Monitoring for Predictive Maintenance based on Non-linear Time Series Analyses, *XIV Latinamerican Turbomachinery Congress & Exhibition*, CONACyT- CIATEQ, Queretaro, México.
- [42] Gómez Mancilla, J. C., Palacios Pineda, L. M., Meda Campaña J. A. (2015). Fast Algorithm To Estimate The Jeffcott Cracked Rotor Nonlinear Stiffness Variation And Corresponding Dynamics. *Journal of Vibration Engineering and Technologies*.



- [43] Gomez Mancilla, J. C., Palacios Pineda, L. M., Nosov, V. (2015). Software Package Evaluation For Lyapunov Exponent And Others Features Of Signals Evaluating The Condition Monitoring Performance On Nonlinear Dynamic Systems. *Journal of Energy and Power Engineering*, 9 (5), 443-451.
- [44] García Illescas, R., Gómez Mancilla J. C., Bregant L. (2015)., Experimental And Numerical Analysis Of Transversal Open Cracked Shafts Considering Beam Slenderness And Crack Depth, En Ceccarelli, M. (coord.), *Mechanisms and Machine Science*, Alemania. Springer.
- [45] Machorro López, J. M., (2009). Desarrollo de Técnicas de Diagnóstico de Rotores Fisurados sólo Monitoreando y Analizando su Dinámica. (Tesis de Doctorado). IPN SEPI ESIME Zacatenco. México.
- [46] Zambrano Reyes, A., (2005). Estudio Numérico-Analítico de la Respuesta Vibratoria de Ejes Fisurados. (Tesis de Maestría). IPN SEPI ESIME Zacatenco. México.
- [47] García Illescas, R., Pérez R., N. (2007). Análisis de la falla y malfuncionamiento de una turbina hidráulica de 15 MW. *Boletín IIE*, Abr-Jun, 39-45.
- [48] Ishida, Y., Yamamoto, T. (2012). *Linear and Nonlinear Rotordynamics*, Gran Bretaña: Wiley-VCH.
- [49] ISO 1940-1:2003, Mechanical vibration - Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state - Part 1: Specification and verification of balance tolerances.
- [50] (1999). Machinery Fault Simulator – Magnum, [en línea]. Virginia. Estados Unidos, Recuperado el 28 de Septiembre de 2015 de <http://spectraquest.com/machinery-fault-simulator/details/mfs-mg/>
- [51] (2007). User Operating Manual for Machinery Fault Simulator™ Magnum. (Manual). Spectra Quest, Inc. Estados Unidos
- [52] (2000). ADRE® for Windows® / DAIU, [en línea]. Nevada. Estados Unidos, Recuperado el 30 de Septiembre de 2015 de http://site.ge-energy.com/prod_serv/products/oc/cn/downloads/141577.pdf
- [53] <http://mexico.ni.com/> , [en línea]. México, Recuperado el 15 de Octubre de 2015
- [54] ISO 7919-3: 2009 Mechanical Vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts – Part 3: Coupled industrial machines
- [55] Nosov, V., Meda Campaña, J. A., Gomez Mancilla, J. C., Escobedo Alva, J. O., Hernández García, R. (2015). Stability Analysis For Autonomous Dynamical Switched Systems Through Non-Conventional Lyapunov Functions. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.



- [56] Gómez Mancilla, J. C., Nosov, V., Palacios Pineda, L. M., Zamora Gutiérrez, F., A. C., Gómez Navarro. (2014). Exponente de Lyapunov y Otras Características No Lineales de Señales Dinámicas Aplicadas a Evaluar el Monitoreo del Estado de Una Máquina Cuando Ocurren Malfunciones, *7mo Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, CIIES 2014*, México D.F.
- [57] García Illescas, R., Gómez Mancilla J. C., Programa "Método Energético para Calcular las Frecuencias Naturales y Modos de Vibración en Ejes Fisurados" en Matlab.
- [58] Murphy & Pérez, Fundación, Programa de Cómputo para Balanceo en Uno y Dos Planos en Matlab, 2015.
- [59] Palacios Pineda, L. M., (2015). Diagnóstico y Prognosis en Problemas Dinámico/Estructurales Ocurridos en Componentes de Turbomaquinaria de Alto Desempeño. (Tesis de Doctorado). IPN SEPI ESIME Zacatenco. México
- [60] National Instruments, Recuperado el 20 de Noviembre de 2015 de <http://www.ni.com/condition-monitoring/esa/>
- [61] National Instruments, Recuperado el 20 de Noviembre de 2015 de <http://www.ni.com/labview/esa/>
- [62] Machorro López J. M., Adams D.E., Gómez Mancilla J.C., Gul, K. (2009). Identification of Damaged Shafts Using Active-Sensing Simulation and Experimentation. *Journal of Sound and Vibration*, 327 (3-5), 368–390.
- [63] Gómez Mancilla, J. C., Castillo Ginori M. A., Marín Herrera, A. (2006). Diagnóstico Basado en Análisis Rotodinámico de un Turbocompresor en Refinería, Reunión de Máquinas y Equipos Eléctricos, *Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas CIGRE-México*.
- [64] Gómez Mancilla, J. C., Nosov, V. R. (2002). Cojinetes Desalineados: Características, Diagnóstico Y Campo De Presión Distorsionado, *XXIII Taller Internacional De Calderas Recipientes A Presión*, Temas Afines Y Exposición Industrial, Academia de Ingeniería, AMIME, SOMIM, Monterrey.
- [65] Meda Campaña J. A., Gómez Mancilla J. C., Castillo Toledo B. (2012). Exact Output Regulation For Nonlinear Systems Described By Takagi-Sugeno Fuzzy Models. *Transactions On Fuzzy Systems*, 20 (2), 235-247.
- [66] Nosov, V., Arreola, D. E., Gómez Mancilla, J. C., Meda Campaña, J. A. (2013). Stability Threshold Velocity For A Hybrid Short Journal Bearing With The Injection Ports In The Symmetric Points. *Journal Of Scientific Research Reports*, 2 (1), 74-92.



[67]. Rankine, W. (1869). Centrifugal whirling of shaft., The Engineer, p. Apr. 9

[68] (2014). Análisis Dinámico para Certificación Nivel 1 de Acuerdo a ISO 18436-2. (Manual). CFE. México.

[69] Fallas más comunes que producen vibración: Desbalance, Vibratec, [en línea]. Guayaquil, Ecuador, Recuperado el 26 de Febrero de 2014 a las 5:45pm de http://www.vibratec.net/pages/tecnico_desbalance.html

[70] (2011). Diplomado en Análisis Dinámico Módulo II. (Manual). CFE. México.

[71] Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L., Vastano, J. A. Determining Lyapunov exponents from a time series. Physica D: Nonlinear Phenomena 16, 3 (1985), 285 – 317.

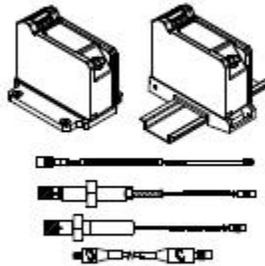


Anexos

Anexo 1

3300 XL NSv* Proximity Transducer System

Bently Nevada* Asset Condition Monitoring



Description

The 3300 XL NSv* Proximity Transducer system is intended for use with centrifugal air compressors, refrigeration compressors, process gas compressors and other machines with tight installation requirements. The 3300 XL NSv Proximity Transducer System consists of:

- a 3300 NSv probe
- a 3300 NSv extension cable
- a 3300 XL NSv Proximitar* Sensor.¹

The primary uses for the 3300 XL NSv Transducer System are for areas where counter bore, sideview or rearview restrictions limit the use of standard Bently Nevada* 3300 and 3300 XL 5 and 8 mm Transducer Systems. It is also ideal for small target applications, such as measuring radial vibration on shafts smaller than 51 mm (2 in) or axial position on flat targets smaller than 15 mm (0.6 in). It is primarily used in the following applications on fluid-film bearing machines where a small shaft or reduced side-view is present:

- Radial vibration and radial position measurements
- Axial (thrust) position measurements
- Tachometer and zero speed measurements
- Phase reference (Keyphasor*) signals

The 3300 XL NSv Transducer System design allows it to replace both the 3300 RAM Transducer Systems and the 3000-series or 7000-series 190 Transducer System. Upgrades from the 3300 RAM system to the 3300 XL NSv system may use the existing probe, extension cable, and monitoring system with 3300 XL NSv Proximitar Sensor. Upgrades from the 3000-series or 7000-series Transducer System must replace the probe, extension cable and Proximitar Sensor with NSv components.

The 3300 XL NSv Transducer System has an Average Scale Factor of 7.87 V/mm (200 mV/mil), which is the most common output for eddy current transducers. Its enhanced side-view and small target characteristics give it a shorter linear range than the Bently Nevada 3300 XL-series 5 and 8 mm Transducer System. With The 1.5 mm (60 mils) of linear range exceeds the linear range of the 3000-series 190 Transducer System.

Application Alert: Although the terminals and connector on the Proximitar Sensor have protection against electrostatic discharge, take reasonable precautions to avoid electrostatic discharge during handling.





"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

Probe dc resistance:

Probe Length (m)	Resistance from the Center Conductor to the Outer Conductor (R_{PROBE}) (ohms)
0.5	4.0 ± 0.5
1.0	4.2 ± 0.5
5.0	5.3 ± 0.7
7.0	5.9 ± 0.9

Extension cable dc resistance:

Center conductor: 0.220Ω/m (0.067 Ω/ft)
Shield: 0.066 Ω/m (0.020 Ω/ft)

Extension cable capacitance:

69.9 pF/m (21.3 pF/ft) typical

Field wiring:

0.2 to 1.5 mm² (16 to 24 AWG) [0.25 to 0.75 mm² (18 to 23 AWG) with ferrules]. Recommend using three-conductor shielded triad cable. Maximum length of 305 metres (1,000 feet) between the 3300 XL NSv Proximity Sensor and the monitor. See the frequency response graphs Figure 16 and Figure 17 for signal rolloff at high frequencies when using longer field wiring lengths.

Linear Range:

1.5 mm (60 mils). Linear range begins at approximately 0.25 mm (10 mils) from target and is from 0.25 to 1.75 mm (10 to 70 mils) (approximately -1 to -13 Vdc).

Recommended Gap Setting:

1.0 mm (40 mils)

System performance over ambient temperature range (0°C to 45°C):

Incremental Scale Factor (ISF)

7.87 V/mm (200 mV/mil) +12.5%/-20% including interchangeability error when measured in increments of 0.25 mm (10 mils) over the 1.5 mm (60 mil) linear range.

Deviation from best fit straight line (DSL)

Less than ±0.06 mm (±2.3 mils).

Frequency Response:

0 to 10 kHz: +0, -3 dB typical, with up to 305 metres (1000 feet) of field wiring.

Target Size (flat target):

Minimum: 8.9 mm (0.35 in) diameter

Recommended minimum: 13 mm (0.5 in) diameter

Axial position measurements on shaft diameters smaller than 13mm (0.5 in) will generally result in a change in scale factor. Reducing the gap between the probe and target will help limit the change in scale factor. See Figure 12 for additional information.

Shaft Diameter

Minimum (standard X-Y probe configuration): 30 mm (1.2 in)

Minimum (X-Y proximity probes offset axially by 23 mm (0.9 in): 20 mm (0.8 in)

Measurements on shaft diameters smaller than 30 mm (1.2 in) usually require close spacing of radial vibration or axial position transducers. This creates the potential for their

Specifications and Ordering Information
Part Number 147385-01
Rev. E (6/11)

Page 3 of 28



"Diseño de un programa automatizado implementado en software N.I. LabVIEW 2014 para adquirir señales, analizar datos y evaluar comportamiento dinámico"

Anexo 2

Model Number	PERFORMANCE SPECIFICATIONS				DOC NO																																								
3023A	TRI AXIAL IEPE ACCELEROMETER				P83023A																																								
					REV A, 824-1104, 05/2014																																								
 <p>• MINATURE SIZE • EXCELLENT LINEARITY • ULTRA LOW WEIGHT</p>	ENGLISH		SI		<p>This family also includes:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Model</th> <th>Sensitivity (mV/g)</th> <th>Frequency Response (Hz)</th> <th>Mounting</th> <th>Operating Temp (°F)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3023A1</td> <td>10 (-10 to +15%)</td> <td>1.5 to 10000 (-5 to +15%)</td> <td>5-40 Tapped Hole</td> <td>-60 to +250</td> </tr> <tr> <td>3023A2</td> <td>10 (-10 to +15%)</td> <td>1.5 to 10000 (-5 to +15%)</td> <td>10-32 Tapped Hole</td> <td>-60 to +250</td> </tr> <tr> <td>3023A3</td> <td>5 (-10 to +15%)</td> <td>1.5 to 10000 (-5 to +15%)</td> <td>Adhesive</td> <td>-60 to +250</td> </tr> <tr> <td>3023A4</td> <td>5 (-10 to +15%)</td> <td>1.5 to 10000 (-5 to +15%)</td> <td>5-40 Tapped Hole</td> <td>-60 to +250</td> </tr> <tr> <td>3023A5</td> <td>1 (±5%)</td> <td>1.5 to 10000 (-5 to +15%)</td> <td>Adhesive</td> <td>-60 to +250</td> </tr> <tr> <td>3023A6</td> <td>5 (-10 to +15%)</td> <td>1.5 to 10000 (-5 to +15%)</td> <td>10-32 Tapped Hole</td> <td>-60 to +250</td> </tr> <tr> <td>3023A9</td> <td>1 (±10%)</td> <td>1.5 to 10000 (-5 to +15%)</td> <td>10-32 Tapped Hole</td> <td>-60 to +250</td> </tr> </tbody> </table> <p>Refer to the performance specifications of the products in this family for detailed description</p> <p>Supplied Accessories:</p> <p>1) Accredited calibration certificate (ISO 17025)</p> <p>Notes:</p> <p>[1] Measured at 100Hz, 1 Grms per ISA RP 37.2.</p> <p>[2] Measure using zero-based straight line method, % of F.S. or any lesser range.</p> <p>[3] Do not apply power to this system without current limiting, 20 mA MAX. To do so will destroy the IC charge amplifier.</p> <p>[4] In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.</p>	Model	Sensitivity (mV/g)	Frequency Response (Hz)	Mounting	Operating Temp (°F)	3023A1	10 (-10 to +15%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	5-40 Tapped Hole	-60 to +250	3023A2	10 (-10 to +15%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	10-32 Tapped Hole	-60 to +250	3023A3	5 (-10 to +15%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	Adhesive	-60 to +250	3023A4	5 (-10 to +15%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	5-40 Tapped Hole	-60 to +250	3023A5	1 (±5%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	Adhesive	-60 to +250	3023A6	5 (-10 to +15%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	10-32 Tapped Hole	-60 to +250	3023A9	1 (±10%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	10-32 Tapped Hole	-60 to +250
	Model	Sensitivity (mV/g)	Frequency Response (Hz)	Mounting		Operating Temp (°F)																																							
3023A1	10 (-10 to +15%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	5-40 Tapped Hole	-60 to +250																																									
3023A2	10 (-10 to +15%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	10-32 Tapped Hole	-60 to +250																																									
3023A3	5 (-10 to +15%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	Adhesive	-60 to +250																																									
3023A4	5 (-10 to +15%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	5-40 Tapped Hole	-60 to +250																																									
3023A5	1 (±5%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	Adhesive	-60 to +250																																									
3023A6	5 (-10 to +15%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	10-32 Tapped Hole	-60 to +250																																									
3023A9	1 (±10%)	1.5 to 10000 (-5 to +15%)	10-32 Tapped Hole	-60 to +250																																									
<p>PHYSICAL</p> <p>Weight, Max.</p> <p>Connector</p> <p>Mounting Provision</p> <p>Material, Housing/Connector</p> <p>Sensing Element</p> <p>Element Style</p>	0.11	oz	3.0	grams																																									
	4-PIN		4-PIN																																										
	Adhesive Mount		Adhesive Mount																																										
	Titanium Alloy		Titanium Alloy																																										
	Quartz		Quartz																																										
	Shear		Shear																																										
<p>PERFORMANCE</p> <p>Sensitivity, -10 / +15 % [1]</p> <p>Range for ± 5 Volts Output</p> <p>Frequency Response</p> <p>Resonant Frequency</p> <p>Broad Band Resolution</p> <p>Spectral Noise</p> <p>Linearity [2]</p> <p>Maximum Transverse sensitivity</p> <p>Strain Sensitivity @ 250µs</p>	10	mV/g	1	mV/m/s ²																																									
	±500	g	±4903	m/s ²																																									
	1.5 to 4000	Hz	1.5 to 4000	Hz																																									
	1.5 to 10000	Hz	1.5 to 10000	Hz																																									
	> 40	KHz	> 40	KHz																																									
	0.007	Grms	0.069	m/s ² /ms																																									
	0.003	µGrms/√(Hz)	0.029	µm/s ² /m/s/√(Hz)																																									
	0.001	µGrms/√(Hz)	0.0098	µm/s ² /m/s/√(Hz)																																									
	0.0002	µGrms/√(Hz)	0.00196	µm/s ² /m/s/√(Hz)																																									
	0.00005	µGrms/√(Hz)	0.00049	µm/s ² /m/s/√(Hz)																																									
	0.00004	µGrms/√(Hz)	0.00039	µm/s ² /m/s/√(Hz)																																									
	1	% F.S.	1	% F.S.																																									
	5	%	5	%																																									
	0.039	g/µs	0.38	m/s ² /µs																																									
<p>ENVIRONMENTAL</p> <p>Maximum Vibration</p> <p>Maximum Shock</p> <p>Temperature Range</p> <p>Seal</p>	±500	Gpeak	±5884	m/s ² peak																																									
	5000	Gpeak	49033	m/s ² peak																																									
	-60 to +250	°F	-51 to +121	°C																																									
	Hermetic		Hermetic																																										
<p>ELECTRICAL</p> <p>Supply Current Range [3]</p> <p>Compliance Voltage Range</p> <p>Output Impedance, Typ</p> <p>Bias Voltage</p> <p>Discharge Time Constant</p> <p>Electrical Isolation</p>	2 to 20	mA	2 to 20	mA																																									
	18 to 30	Volts	18 to 30	Volts																																									
	100	Ω	100	Ω																																									
	9 to 11	VDC	9 to 11	VDC																																									
	0.3 to 1.5	Sec	0.3 to 1.5	Sec																																									
	Case Grounded	GΩ, min	Case Grounded	GΩ, min																																									

TYPICAL LOW-FREQUENCY RESPONSE

TYPICAL TEMPERATURE RESPONSE

Units on the drawing are in inches, units in brackets are in millimeters. Refer to 027-3023A for more information.



21592 Marilla Street, Chatsworth, California 91311 Phone: 818.700.7818 Fax: 818.700.7880 www.dytran.com
For permission to reprint this content, please contact info@dytran.com



Anexo 3

SPECIFICATIONS
CARACTÉRISTIQUES
SPECIFICHE TECNICHE
TECHNISCHE DATEN
ESPECIFICACIONES
仕様

Type	Dynamic (moving coil)
Frequency Response	40 to 15,000 Hz
Polar Pattern	Cardioid
Output Impedance	310 Ω
Sensitivity (at 1 kHz, open circuit voltage)	-56.0 dBW/Pa (1.6 mV) 1 Pascal=94 dB SPL
Polarity	Positive pressure on diaphragm produces positive voltage on pin 2 with respect to pin 3
Weight	Net: 0.284 kg (0.625 lbs)
Connector	Three-pin professional audio (XLR), male
Case	Dark gray, enamel-painted, die-cast steel with a polycarbonate grille and a stainless steel screen.

Tipo	Dinámico (bobina móvil)
Respuesta de frecuencia	40 a 15.000 Hz
Patrón polar	Cardioide
Impedancia de salida	310 Ω
Sensibilidad (a 1 kHz, voltaje en circuito abierto)	-56,0 dBW/Pa (1,6 mV) 1 Pascal=94 dB SPL
Polaridad	Una presión positiva en el diafragma del micrófono produce un voltaje positivo en la clavija 2 con respecto a la clavija 3
Peso	Neto: 0,284 kg (0,625 lb)
Conector	Conector de audio de tres clavijas profesional (tipo XLR), macho
Estuche	Acero troquelado esmaltado en color gris oscuro con una rejilla de policarbonato y una malla de acero inoxidable.

Type	Dynamique (bobine mobile)
Réponse en fréquence	40 à 15.000 Hz
Courbe de directivité	Cardioïde
Impédance de sortie	310 Ω
Sensibilité (à 1 kHz, tension en circuit ouvert)	-56,0 dBW/Pa (1,6 mV) 1 Pascal=94 dB NPA
Polarité	Une pression acoustique positive sur le diaphragme produit une tension positive sur la broche 2 par rapport à la broche 3.
Poids	Net: 0,284 kg
Connecteur	Audio professionnel à trois broches (XLR), mâle
Corps	Acier moulé peint vernis gris foncé avec une grille en polycarbonate et un écran en acier inoxydable.

Tipo	Dinamico (a bobina mobile)
Risposta in frequenza	40 a 15.000 Hz
Diagramma polare	Cardioide
Impedenza di uscita	310 Ω
Sensibilità (a 1 kHz, tensione a circuito aperto)	-56,0 dBW/Pa (1,6 mV) 1 Pascal=94 dB di SPL
Polarità	Una pressione positiva sul diaframma produce una tensione positiva sul piedino 2 rispetto al piedino 3.
Peso	Netto: 0,284 kg (0,625 lbs)
Connettore	Tipo audio, professionale, a tre piedini (XLR), maschio
Involucro	Acciaio pressofuso, smaltato, grigio scuro, con griglia in policarbonato e schermo in acciaio inossidabile.

Typ	Dynamisch (Tauchspule)
Übertragungsbereich	40 bis 15.000 Hz
Richtcharakteristik	Niere
Ausgangs impedanz	310 Ω
Empfindlichkeit (bei 1 kHz, Leerlaufspannung)	-56,0 dBW/Pa 1 Pascal=94 dB Schalldruckpegel
Polarität	Positiver Druck an der Membran erzeugt positive Spannung an Pin 2 in Bezug auf Pin 3.
Gewicht	Netto: 0,284 kg
Stecker	Dreipoliger (XLR) Profi-Audiostecker
Gehäuse	Dunkelgrauer, einbrennlackierter Druckgussstahl mit Polycarbonat-Grill und Edelstahl-Abschirmung.

型	ダイナミック型 (ムービングコイル方式)
周波数特性	40 - 15,000 Hz
指向特性	カーディオイド
出力インピーダンス	310 Ω
感度 (1 kHz, 開回路電圧)	-56.0 dBW/Pa (1.6 mV) 1 パスカール=94 dB SPL
極性	ダイヤフラムへの正の圧力により、3番ピンに対して2番ピンに誘起電圧が生成される
質量	本体: 0.284 kg
コネクター	プロオーディオ用3ピン (XLR)、オス
ケース	ダークグレーエナメル加工ダイカストスチールボディとポリカーボネートグリル、ステンレススチールスクリーン



Anexo 4

SPECIFICATIONS

NI cDAQ™ -9178

NI CompactDAQ Eight-Slot USB Chassis

These specifications are for the National Instruments CompactDAQ 9178 chassis only. These specifications are typical at 25 °C unless otherwise noted. For the C Series I/O module specifications, refer to the documentation for the C Series I/O module you are using.

Analog Input

Input FIFO size.....	127 samples per slot
Maximum sample rate ¹	Determined by the C Series I/O module or modules
Timing accuracy ²	50 ppm of sample rate
Timing resolution ³	12.5 ns
Number of channels supported.....	Determined by the C Series I/O module or modules

Analog Output

Number of channels supported	
Hardware-timed task	
Onboard regeneration.....	16
Non-regeneration.....	Determined by the C Series I/O module or modules

¹ Performance dependent on type of installed C Series I/O module and number of channels in the task.

² Does not include group delay. For more information, refer to the documentation for each C Series I/O module.

³ Does not include group delay. For more information, refer to the documentation for each C Series I/O module.





Anexo 5



Technical Sales

(888) 531-4285
orders@ni.com

[Ordering Information](#) | [Detailed Specifications](#) | [Pinouts/Front Panel Connections](#)
For user manuals and dimensional drawings, visit the [product page resources](#) tab on ni.com.

Last Revised: 2014-09-24 23:07:52.0

NI 9234

±5 V, IEPE and AC/DC Analog Input, 51.2 kS/s/ch, 4 Ch Module



- 51.2 kS/s per channel maximum sampling rate; ±5 V input
- 24-bit resolution; 102 dB dynamic range; anti-aliasing filters
- Software-selectable AC/DC coupling; AC-coupled (0.5 Hz)
- Software-selectable IEPE signal conditioning (0 mA or 2 mA)
- Transducer Electronic Data Sheet smart sensor compatibility
- -40 °C to 70 °C operating; 5 g vibration; 50 g shock

Overview

The NI 9234 is a 4-channel C Series dynamic signal acquisition module for making high-accuracy audio frequency measurements from integrated electronic piezoelectric (IEPE) and non-IEPE sensors with NI CompactDAQ or CompactRIO systems. The NI 9234 delivers 102 dB of dynamic range and incorporates software-selectable AC/DC coupling and IEPE signal conditioning for accelerometers and microphones. The four input channels simultaneously digitize signals at rates up to 51.2 kHz per channel with built-in anti-aliasing filters that automatically adjust to your sampling rate.

Recommended Software

NI sound and vibration analysis software, including the NI Sound and Vibration Measurement Suite and the NI Sound and Vibration Toolkit, provides signal processing functionality for performing audio measurements, fractional-octave analysis, frequency analysis, transient analysis, and order tracking. NI analysis software features NI Sound and Vibration Assistant interactive software for quickly acquiring, analyzing, and logging acoustic, noise, and vibration data. With a configuration-based, flexible measurement library and open-analysis capability, the Sound and Vibration Assistant is designed for quick data capture through a unique software-based measurement approach to create customized applications.

Recommended Accessories

None

Box Contents

- 1 NI 9234 C Series module
- 1 NI 9234 Operating Instructions and Specifications manual

[Back to Top](#)

Comparison Tables

Product Name	Signal Ranges	Channels	Sample Rate	Simultaneous	Resolution	Excitation	Isolation	Connectivity
NI 9232	±30 V	3 differential	102.4 kS/s/ch	Yes	24-Bit	4 mA	80 VDC Ch-Earth	Screw Terminal
NI 9234	±5 V	4 differential	51.2 kS/s/ch	Yes	24-Bit	2 mA	None	BNC

[Back to Top](#)

Application and Technology

NI C Series Overview



Anexo 6



Technical Sales

(800) 531-6285
orders@ni.com

For user manuals and dimensional drawings, visit the product page resources tab on ni.com

Last Revised: 2014-11-06 07:14:48.0

NI 9232

±30 V, IEPE and AC/DC Analog Input, 102.4 kS/s/ch, 3 Ch Module



- 3 channels, 102.4 kS/s/ch simultaneous AI; 41 kHz bandwidth
- ±30 V input, 24-bit resolution, 90 dB dynamic range
- Software-selectable AC/DC coupling, AC coupled (0.1 Hz)

- Software-selectable IEPE signal conditioning (0 mA or 4 mA); IEPE open/short detection
- Transducer Electronic Data Sheet smart sensor compatibility
- -40 °C to 70 °C operating range, 5 g vibration, 50 g shock

Overview

The NI 9232 is a 3-channel C Series dynamic signal acquisition module for making industrial measurements from integrated electronic piezoelectric (IEPE) and non-IEPE sensors with NI CompactDAQ or NI CompactRIO systems.

The NI 9232 delivers 90 dB of dynamic range and incorporates software-selectable AC/DC coupling and IEPE signal conditioning for accelerometers, tachometers, and proximity probes. The three input channels simultaneously digitize signals at rates up to 102.4 kHz per channel with built-in anti-aliasing filters that automatically adjust to your sample rate.

EMC Performance

To ensure EMC compliance, you must use a ferrite bead, such as part number 782802-01.

Recommended Software

NI sound and vibration analysis software, including the NI Sound and Vibration Measurement Suite and the NI Sound and Vibration Toolkit, provides signal processing functionality for performing condition monitoring and machine diagnostics including frequency analysis, order tracking, and display techniques such as orbit plots and shaft centerlines.

Recommended Accessories

- NI 9971 strain relief and operator protection
 - EMI suppression ferrite for NI 9232 (782802-01)
- Note: To ensure EMC compliance, you must use a ferrite bead, such as part number 782802-01.

Box Contents

- 1 NI 9232 C Series module
- 1 NI 9232 Operating Instructions and Specifications manual

[Back to Top](#)

Comparison Tables

Product Name	Signal Ranges	Channels	Sample Rate	Simultaneous	Resolution	Excitation	Isolation	Connectivity
NI 9232	±30 V	3 Differential	102.4 kS/s/ch	Yes	24-Bit	4 mA	60 VDC Ch-Earth	Screw Terminal
NI 9234	±5 V	4 Differential	51.2 kS/s/ch	Yes	24-Bit	2 mA	None	BNC

[Back to Top](#)

Application and Technology



Anexo 7

Mecánica Computacional Vol. XXII
M.B.Rosales, V. H. Cortinez y D. V. Bambill (Editores)
Bahía Blanca, Argentina, Noviembre 2003.

ESTIMACIÓN DE LOS EXPONENTES DE LYAPUNOV

Luis Lara^{**}, Cesar Stoico^{***}, Rodrigo Machado^{**}, Mario Castagnino^{*}

Instituto de Astronomía y Física del Espacio. Ciudad Universitaria.^{*}
Buenos Aires, Argentina.

Facultad de Ciencias Exactas Ingeniería y Agrimensura.^{**}
Universidad Nacional de Rosario.
Avda. Pellegrini 250, Rosario, Argentina.
e-mail: lplara@fceia.unr.edu.ar

Facultad de Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas.^{***}
Universidad Nacional de Rosario.
Suipacha 531, Rosario, Argentina.

Palabras clave: sistemas dinámicos, métodos numéricos, algoritmos.

Resumen. *Si bien existe una amplia bibliografía para la determinación de los exponentes de Lyapunov para sistemas dinámicos continuos, en este trabajo definimos un espectro de coeficientes como alternativa al espectro de Lyapunov. Se comparan los exponentes de Lyapunov obtenidos mediante el método de ortogonalización de Gram-Schmidt con los determinados en base al promedio de la parte real de los autovalores de la matriz Jacobiana. Ambas técnicas dan la misma descripción asintótica de la dinámica. El método propuesto requiere menor tiempo de cómputo y posee mayor simplicidad de cálculo.*



1 INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de modelos matemáticos deterministas, se pueden utilizar las ecuaciones diferenciales ordinarias. En general, cuanto más detallado es el modelo con respecto a la descripción del sistema, las ecuaciones aumentan su complejidad y dejan de ser lineales^(1, 3, 4). Debido a la pérdida de linealidad, pueden existir determinadas condiciones donde el comportamiento de la solución a tiempos grandes es estocástico. Estas soluciones asintóticas acotadas que no convergen a ningún conjunto límite se las conoce como caóticas^(1, 3). Para caracterizar cuantitativamente este comportamiento es factible determinar por métodos numéricos los exponentes de Lyapunov^(5, 6, 8). En este trabajo presentamos un método alternativo que consiste en el estudio de un espectro de coeficientes que caracterizan las propiedades de las soluciones asintóticas.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se desarrolla una breve introducción al espectro de Lyapunov. En la sección 3 presentamos el método de autovalores. En la sección 4, se comparan los tiempos de CPU con los obtenidos mediante el método de ortogonalización de Gram-Schmidt. En la sección 5, estudiamos el espectro de Lyapunov para la ecuación de Lorenz. En la sección 6 se presentan las conclusiones.

2 ESTABILIDAD LOCAL Y EXPONENTE DE LYAPUNOV

En esta sección resumimos dos conceptos básicos vinculados a la estabilidad de las soluciones. Consideremos el espacio de fases asociado a una cierta dinámica autónoma, cada punto de este espacio está en correspondencia con una única trayectoria la cual está parametrizada en el tiempo t . Sobre cualquier punto de esta curva nos preguntamos que ocurre si nos desplazamos infinitesimalmente en una dirección, no tangente. Al cabo de un incremento δt , la nueva trayectoria pudo haberse acercado o alejado a la inicial, lo cual da una medida del comportamiento de la estabilidad local. Por simplicidad consideremos el sistema

$$\frac{d}{dt}y = f(y) \quad (1)$$

la condición inicial $y_0 = y(t_0)$ define la curva γ_0 o sea $y(t, p_0)$. En el tiempo t_0 producimos la variación δy_0 y la nueva curva solución γ la expresamos como $y = y(t, p_0) + \delta y$, donde la variación δy esta definida por

$$\frac{d}{dt}\delta y = \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_{\gamma_0} \delta y, \quad (2)$$

e integrando la Ec. (2) se obtiene

$$\frac{\delta y(t)}{\delta y(t_0)} = \exp \int_{t_0}^t \frac{\partial f}{\partial y} dt',$$

Cuando los valores de t son próximos a t_0 la variación se aproxima a

$$\frac{\delta y(t)}{\delta y(t_0)} \cong \exp \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_{t_0} \delta t.$$



Cuando $(\frac{\partial f}{\partial y})_{t_0} > 0$, decimos que la solución $y(t, p_0)$ es localmente inestable en p_0 . Al contrario, si $(\frac{\partial f}{\partial y})_{t_0}$ es negativa es localmente estable. Por tanto, para cada punto de la trayectoria hemos definido su estabilidad local^(1,3). Es importante remarcar que dada una trayectoria, la misma puede ser totalmente estable, totalmente inestable, o a lo largo de ella, puede tener puntos estables y puntos inestables. Este concepto es fácilmente generalizable a dinámicas de orden superior.

Una segunda cuestión de interés en la teoría de sistemas dinámicos, consiste en determinar una medida de cuanto se separan a tiempo infinito diferentes trayectorias generadas con condiciones iniciales muy próximas y fundamentalmente establecer un parámetro que de este modo cuantifique el movimiento caótico. Como es sabido, uno de estos parámetros es el exponente de Lyapunov^(1,3,5). Para determinar en forma elemental el exponente de Lyapunov consideremos nuevamente la ecuación (1). Se define al exponente de Lyapunov por

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \left| \frac{\delta y(t)}{\delta y(t_0)} \right| ,$$

Para sistemas de orden superior la definición del exponente es equivalente a la ya presentada y existen tantos exponentes como la dimensión del sistema^(5, 6). Es importante remarcar que los exponentes están asociados a cada curva y, en definitiva, a cada punto del espacio de fases. Así por ejemplo, en sistema de dimensión tres, si la dinámica es caótica, en el sentido de que su comportamiento asintótico es acotado (no constante ni periódico) entonces uno de los exponentes es positivo, el otro es nulo y el tercero es negativo. Si bien, la definición del exponente de Lyapunov es sumamente simple, desde el punto de vista del cálculo numérico plantea serias dificultades. Estas son debidas a la acumulación de errores de truncamiento del método de integración y los errores en la representación numérica. En muchos casos se producen fuertes errores en las soluciones numéricas y desbordamiento en el cálculo. Todo sumado, hace que en muchas ocasiones, la solución numérica obtenida tenga poco que ver con la real^(2, 6). En la sección siguiente presentamos una alternativa a esta definición con el fin de superar las dificultades numéricas.

3 METODO DE LOS AUTOVALORES

A partir del concepto de estabilidad local, presentamos un método alternativo de cálculo que proporciona la misma información que el espectro de Lyapunov pero con mayor eficiencia en los tiempos de CPU. El método consiste en realizar cambios locales de coordenadas de manera de diagonalizar localmente las ecuaciones de las variaciones. Los autovalores de estas últimas, están directamente vinculados a la estimación de los exponentes. En particular, cuando la transformación puntual se resuelve explícitamente, en muchos casos los signos del espectro de coeficientes quedan determinados, evitándose el cálculo numérico. Entonces, consideremos el sistema



Anexo 8

Physica 16D (1985) 285–317
North-Holland, Amsterdam

DETERMINING LYAPUNOV EXPONENTS FROM A TIME SERIES

Alan WOLF†, Jack B. SWIFT, Harry L. SWINNEY and John A. VASTANO
Department of Physics, University of Texas, Austin, Texas 78712, USA

Received 18 October 1984

We present the first algorithms that allow the estimation of non-negative Lyapunov exponents from an *experimental* time series. Lyapunov exponents, which provide a qualitative and quantitative characterization of dynamical behavior, are related to the exponentially fast divergence or convergence of nearby orbits in phase space. A system with one or more positive Lyapunov exponents is defined to be chaotic. Our method is rooted conceptually in a previously developed technique that could only be applied to analytically defined model systems: we monitor the *long-term* growth rate of *small* volume elements in an attractor. The method is tested on model systems with known Lyapunov spectra, and applied to data for the Belousov-Zhabotinski reaction and Couette-Taylor flow.

Contents

1. Introduction
2. The Lyapunov spectrum defined
3. Calculation of Lyapunov spectra from differential equations
4. An approach to spectral estimation for experimental data
5. Spectral algorithm implementation*
6. Implementation details*
7. Data requirements and noise*
8. Results
9. Conclusions

Appendices*

- A. Lyapunov spectrum program for systems of differential equations
- B. Fixed evolution time program for λ_1

1. Introduction

Convincing evidence for deterministic chaos has come from a variety of recent experiments [1–6] on dissipative nonlinear systems; therefore, the question of detecting and quantifying chaos has become an important one. Here we consider the spectrum of Lyapunov exponents [7–10], which has proven to be the most useful dynamical diagnostic for chaotic systems. Lyapunov exponents are the average exponential rates of divergence or

convergence of nearby orbits in phase space. Since nearby orbits correspond to nearly identical states, exponential orbital divergence means that systems whose initial differences we may not be able to resolve will soon behave quite differently – predictive ability is rapidly lost. Any system containing at least one positive Lyapunov exponent is defined to be chaotic, with the magnitude of the exponent reflecting the time scale on which system dynamics become unpredictable [10].

For systems whose equations of motion are explicitly known there is a straightforward technique [8, 9] for computing a complete Lyapunov spectrum. This method cannot be applied directly to experimental data for reasons that will be discussed later. We will describe a technique which for the first time yields estimates of the non-negative Lyapunov exponents from finite amounts of experimental data.

A less general procedure [6, 11–14] for estimating only the dominant Lyapunov exponent in experimental systems has been used for some time. This technique is limited to systems where a well-defined one-dimensional (1-D) map can be recovered. The technique is numerically unstable and the literature contains several examples of its improper application to experimental data. A discussion of the 1-D map calculation may be found

†Present address: The Cooper Union, School of Engineering, N.Y., NY 10003, USA.

*The reader may wish to skip the starred sections at a first reading.

in ref. 13. In ref. 2 we presented an unusually robust 1-D map exponent calculation for experimental data obtained from a chemical reaction.

Experimental data inevitably contain external noise due to environmental fluctuations and limited experimental resolution. In the limit of an infinite amount of noise-free data our approach would yield Lyapunov exponents by definition. Our ability to obtain good spectral estimates from experimental data depends on the quantity and quality of the data as well as on the complexity of the dynamical system. We have tested our method on model dynamical systems with known spectra and applied it to experimental data for chemical [2, 13] and hydrodynamic [3] strange attractors.

Although the work of characterizing chaotic data is still in its infancy, there have been many approaches to quantifying chaos, e.g., fractal power spectra [15], entropy [16–18, 3], and fractal dimension [proposed in ref. 19, used in ref. 3–5, 20, 21]. We have tested many of these algorithms on both model and experimental data, and despite the claims of their proponents we have found that these approaches often fail to characterize chaotic data. In particular, parameter independence, the amount of data required, and the stability of results with respect to external noise have rarely been examined thoroughly.

The spectrum of Lyapunov exponents will be defined and discussed in section 2. This section includes table I which summarizes the model systems that are used in this paper. Section 3 is a review of the calculation of the complete spectrum of exponents for systems in which the defining differential equations are known. Appendix A contains Fortran code for this calculation, which to our knowledge has not been published elsewhere. In section 4, an outline of our approach to estimating the non-negative portion of the Lyapunov exponent spectrum is presented. In section 5 we describe the algorithms for estimating the two largest exponents. A Fortran program for determining the largest exponent is contained in appendix B. Our algorithm requires input parameters whose selection is discussed in section 6. Sec-

tion 7 concerns sources of error in the calculations and the quality and quantity of data required for accurate exponent estimation. Our method is applied to model systems and experimental data in section 8, and the conclusions are given in section 9.

2. The Lyapunov spectrum defined

We now define [8, 9] the spectrum of Lyapunov exponents in the manner most relevant to spectral calculations. Given a continuous dynamical system in an n -dimensional phase space, we monitor the long-term evolution of an *infinitesimal* n -sphere of initial conditions; the sphere will become an n -ellipsoid due to the locally deforming nature of the flow. The i th one-dimensional Lyapunov exponent is then defined in terms of the length of the ellipsoidal principal axis $p_i(t)$:

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log_2 \frac{p_i(t)}{p_i(0)}, \quad (1)$$

where the λ_i are ordered from largest to smallest[†]. Thus the Lyapunov exponents are related to the expanding or contracting nature of different directions in phase space. Since the orientation of the ellipsoid changes continuously as it evolves, the directions associated with a given exponent vary in a complicated way through the attractor. One cannot, therefore, speak of a well-defined direction associated with a given exponent.

Notice that the linear extent of the ellipsoid grows as $2^{\lambda_1 t}$, the area defined by the first two principal axes grows as $2^{(\lambda_1 + \lambda_2)t}$, the volume defined by the first three principal axes grows as $2^{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t}$, and so on. This property yields another definition of the spectrum of exponents:

[†]While the existence of this limit has been questioned [8, 9, 22], the fact is that the orbital divergence of any data set may be quantified. Even if the limit does not exist for the underlying system, or cannot be approached due to having finite amounts of noisy data, Lyapunov exponent estimates could still provide a useful characterization of a given data set. (See section 7.1.)

the sum of the first j exponents is defined by the long term exponential growth rate of a j -volume element. This alternate definition will provide the basis of our spectral technique for experimental data.

Any continuous time-dependent dynamical system without a fixed point will have at least one zero exponent [22], corresponding to the slowly changing magnitude of a principal axis tangent to the flow. Axes that are on the average expanding (contracting) correspond to positive (negative) exponents. The sum of the Lyapunov exponents is the time-averaged divergence of the phase space velocity; hence any dissipative dynamical system will have at least one negative exponent, the sum of all of the exponents is negative, and the post-transient motion of trajectories will occur on a zero volume limit set, an attractor.

The exponential expansion indicated by a positive Lyapunov exponent is incompatible with motion on a bounded attractor unless some sort of *folding* process merges widely separated trajectories. Each positive exponent reflects a "direction" in which the system experiences the repeated stretching and folding that decorrelates nearby states on the attractor. Therefore, the long-term behavior of an initial condition that is specified with *any* uncertainty cannot be predicted; this is chaos. An attractor for a dissipative system with one or more positive Lyapunov exponents is said to be "strange" or "chaotic".

The signs of the Lyapunov exponents provide a qualitative picture of a system's dynamics. One-dimensional maps are characterized by a single Lyapunov exponent which is positive for chaos, zero for a marginally stable orbit, and negative for a periodic orbit. In a three-dimensional continuous dissipative dynamical system the only possible spectra, and the attractors they describe, are as follows: $(+, 0, -)$, a strange attractor; $(0, 0, -)$, a two-torus; $(0, -, -)$, a limit cycle; and $(-, -, -)$, a fixed point. Fig. 1 illustrates the expanding, "slower than exponential," and contracting character of the flow for a three-dimensional system, the Lorenz model [23]. (All of the model systems

that we will discuss are defined in table I.) Since Lyapunov exponents involve long-time averaged behavior, the short segments of the trajectories shown in the figure cannot be expected to accurately characterize the positive, zero, and negative exponents; nevertheless, the three distinct types of behavior are clear. In a continuous four-dimensional dissipative system there are three possible types of strange attractors: their Lyapunov spectra are $(+, +, 0, -)$, $(+, 0, 0, -)$, and $(+, 0, -, -)$. An example of the first type is Rossler's hyperchaos attractor [24] (see table I). For a given system a change in parameters will generally change the Lyapunov spectrum and may also change both the type of spectrum and type of attractor.

The magnitudes of the Lyapunov exponents *quantify* an attractor's dynamics in information theoretic terms. The exponents measure the rate at which system processes create or destroy information [10]; thus the exponents are expressed in bits of information/s or bits/orbit for a continuous system and bits/iteration for a discrete system. For example, in the Lorenz attractor the positive exponent has a magnitude of 2.16 bits/s (for the parameter values shown in table I). Hence if an initial point were specified with an accuracy of one part per million (20 bits), the future behavior could not be predicted after about 9 s [20 bits/(2.16 bits/s)], corresponding to about 20 orbits. After this time the small initial uncertainty will essentially cover the entire attractor, reflecting 20 bits of new information that can be gained from an additional measurement of the system. This new information arises from scales smaller than our initial uncertainty and results in an inability to specify the state of the system except to say that it is somewhere on the attractor. This process is sometimes called an information gain – reflecting new information from the heat bath, and sometimes is called an information loss – bits shifted out of a phase space variable "register" when bits from the heat bath are shifted in.

The average rate at which information contained in transients is lost can be determined from

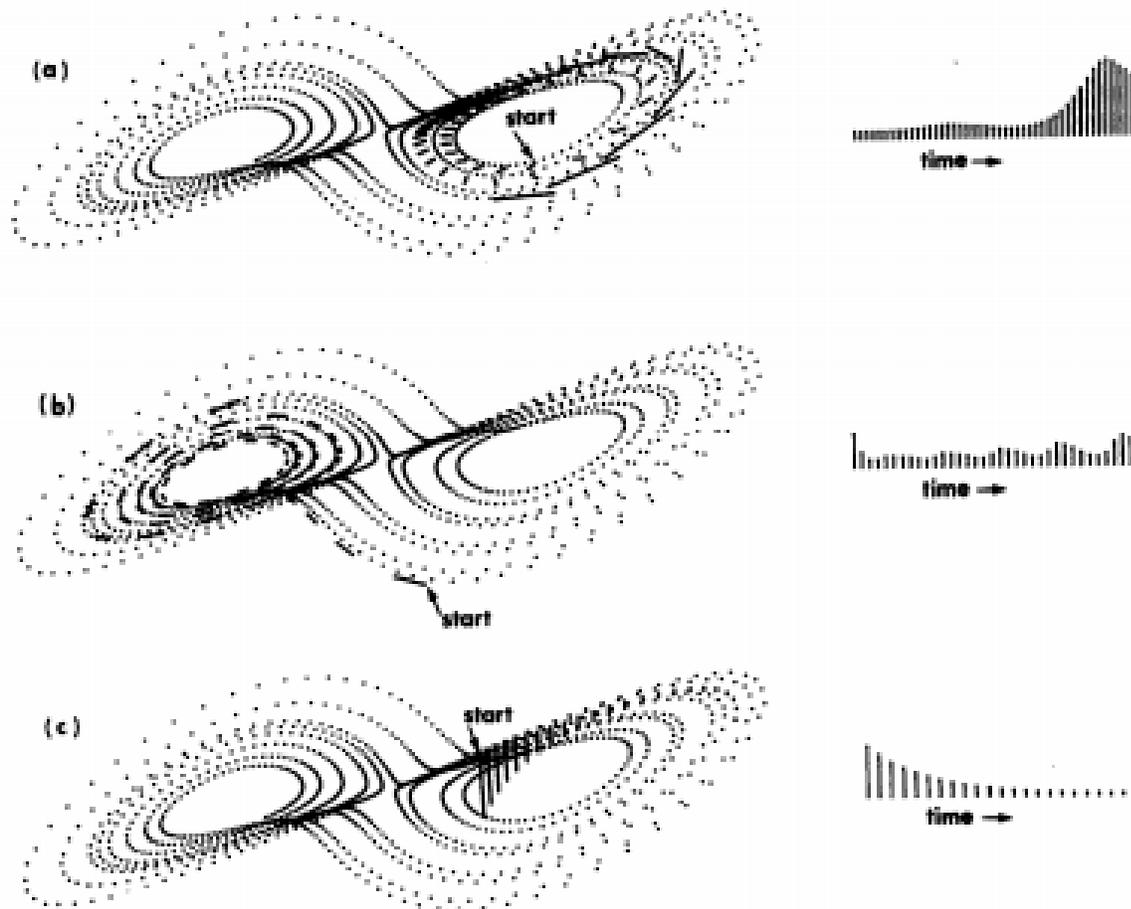


Fig. 1. The short term evolution of the separation vector between three carefully chosen pairs of nearby points is shown for the Lorenz attractor. a) An expanding direction ($\lambda_1 > 0$); b) a "slower than exponential" direction ($\lambda_2 = 0$); c) a contracting direction ($\lambda_3 < 0$).

the negative exponents. The asymptotic decay of a perturbation to the attractor is governed by the least negative exponent, which should therefore be the easiest of the negative exponents to estimate[†].

[†]We have been quite successful with an algorithm for determining the dominant (smallest magnitude) negative exponent from pseudo-experimental data (a single time series extracted from the solution of a model system and treated as an experimental observable) for systems that are nearly integer-dimensional. Unfortunately, our approach, which involves measuring the mean decay rate of many induced perturbations of the dynamical system, is unlikely to work on many experimental systems. There are several fundamental problems with the calculation of negative exponents from experimental data, but

For the Lorenz attractor the negative exponent is so large that a perturbed orbit typically becomes indistinguishable from the attractor, by "eye", in less than one mean orbital period (see fig. 1).

of greatest importance is that *post-transient* data may not contain resolvable negative exponent information and *perturbed* data must reflect properties of the unperturbed system, that is, perturbations must only change the state of the system (current values of the dynamical variables). The response of a physical system to a non-delta function perturbation is difficult to interpret, as an orbit separating from the attractor may reflect either a locally repelling region of the attractor (a positive contribution to the negative exponent) or the finite rise time of the perturbation.