

710255
L5

nº: 2012-no tiene

TESIS DE MAESTRÍA

Presentada ante la ilustre UNIVERSIDAD DE LOS ANDES como requisito parcial para obtener el Título de MAGISTER SCIENTIARUM en INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO

Por

Ing. Jhon Edward Lizarazo Parada

Tutor: PhD Mary Vergara

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA ANÁLISIS DE DESBALANCE EN MÁQUINAS ROTATIVAS.

Mérida, Venezuela, Abril 2012



Derechos Reservados ©2012 Universidad de Los Andes

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Diseño e Implementación de Sistema de Adquisición de Datos para Análisis de Desbalance en Máquinas Rotativas.

Ing. Jhon Edward Lizarazo Parada

Tesis de Maestría — Ingeniería en Mantenimiento, 177 páginas

Resumen: El desbalance es uno de los problemas mas frecuentes a causa de vibración en la industria, por ello es de gran importancia el estudio del mismo para aplicaciones prácticas que contribuyen a formar profesionales capaces de enfrentar este problema con conocimientos prácticos y teóricos. Para tal fin se realizó un instrumento virtual de análisis de vibración para el desbalance por medio de adquisición de datos de sensores de vibraciones como acelerómetros y velocímetros, el cual sirve para evaluar los modos y efectos de falla en un rotor efectuando un diagnóstico del elemento, hallando la forma posible de corregir cuando ocurra desbalance. Este instrumento está desarrollado con programación gráfica en LabVIEW, y está instalado en el banco de pruebas del laboratorio de Mecánica de Materiales (LABMM) el cual cuenta con la instrumentación adecuada. Los instrumentos utilizados durante el desarrollo del trabajo fueron: dos acelerómetros 736T, un velocímetro 793V y la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E para efectuar la medición de vibración en el ROTOR 5000 del laboratorio. El Rotor utilizado consta de un motor de corriente directa que puede girar a 1700 RPM con un sistema de transmisión por correa con un factor de amplificación de 1:3 llegando a una velocidad máxima de 5100 RPM. Los métodos de balanceo utilizados a lo largo de la investigación son balanceo vectorial en un plano y balanceo por coeficientes de influencia para dos planos. En el programa se obtienen precisiones de medida de 4.88mV sin necesidad de ampliaciones de las señales de los transductores. Se implementaron prácticas para balanceo en un plano con la instrumentación mencionada anteriormente y se realizó programa de balanceo en dos planos obteniendo resultados satisfactorios para cada una de las prácticas. Se adicionó un módulo de severidad de vibración para efectuar prácticas con niveles de vibración excesivos y verificar como se detecta una falla potencial de un equipo rotativo.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Palabras clave: Instrumentación virtual, Adquisición de datos, análisis de vibraciones, desbalance, mantenimiento predictivo, equipos rotativos.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

*Esta obra es dedicada a Dios
y a mi familia por acompañarme
y apoyarme durante el desarrollo
de la misma.*

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Índice general

Agradecimientos	IX
Introducción	1
I Análisis de vibraciones en equipos Rotativos	6
1. Balanceo	7
1.1. Tipos de desequilibrio	8
1.2. Fuentes de desbalance	9
1.3. Conceptos y principios para balancear rotores rígidos	10
1.4. Rotor Rígido	13
1.4.1. Montaje Rígido	13
1.5. Efectos de la flexibilidad del rotor	13
2. Métodos de Balanceo de Rotores	16
2.1. Concepto de Fase	16
2.2. Balanceo en un plano	18
2.2.1. Método Estroboscópico	19
2.2.2. Método de Balanceo Vectorial en un Plano	25
2.2.3. Método de Balanceo de los Cuatro Vectores	26
2.3. Balanceo en dos planos	30
2.3.1. Método Vectorial de Balanceo en Dos Planos	30
2.3.2. Separación de Desbalance en estático y por Par de fuerzas	33
2.3.3. Método de los coeficientes de Influencia	36

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

3. Instrumentación	46
3.1. Sistemas de Adquisición de Datos	47
3.2. Tarjeta de Adquisición de Datos DAQpad-6020E	48
3.2.1. Características de Tarjeta de Adquisición de Datos DAQpad-6020E	50
3.2.2. Entradas Analógicas	50
3.2.3. Velocidad de Muestreo	55
3.2.4. Métodos de muestreo de varios canales	59
3.3. Software	62
3.4. Transductores e Instrumentación Adicional	63
3.4.1. Transductor Piezoeléctrico	64
3.4.2. Transductor de Velocidad	64
3.4.3. Transductor de Aceleración	66

II Diseño de tacómetro, Instalación de equipos y programación del Instrumento Virtual.

4. Diseño e implementación de tacómetro	70
4.0.1. Tacómetro de frecuencia o frecuencímetro	70
4.1. Criterio de selección de tacómetro	71
4.2. Diseño electrónico de tacómetro óptico	71
4.3. Lectura de tacómetro óptico con DAQpad-6020E	74
4.3.1. Instrumento Virtual Programado en Labwindows/CVI 8.5 . . .	75
4.3.2. Instrumento Virtual Programado en LabVIEW 8.6	77
5. Instalación de Equipos en el laboratorio	80
5.1. Instalación Eléctrica Laboratorio de Análisis de Vibraciones	81
5.2. Montaje y Cimentación del Banco de Pruebas	83
5.3. Montaje e Instalación de Transductores	84
5.3.1. Requerimientos eléctricos del transductor	85
5.3.2. Requerimientos de Cableado	87
5.3.3. Montaje	90
5.4. Instalación del Tacómetro en Rotor 5000	94

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

5.5. Instalación de Tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E en el LABMM	96
6. Programación del Instrumento Virtual para Medición de Vibraciones y Balanceo del Rotor 5000	99
6.1. Módulo Balanceo en un plano	101
6.1.1. Diagrama de Bloques Para Balanceo en un Plano	108
6.2. Módulo Balanceo en dos planos	111
6.2.1. Diagrama de Bloques Para Balanceo en dos Planos	115
6.3. Módulo Evaluación Severidad Vibratoria	121
6.3.1. Diagrama de Bloques Para Evaluación de Severidad Vibratoria.	122
 III Análisis de Resultados	 124
7. Análisis de Resultados	125
7.1. Procedimiento para especificar el problema de Fase	129
7.1.1. LabVIEW vs MATLAB	130
7.1.2. Validación Hardware de Adquisición de datos	136
7.1.3. Verificación estructura mecánica de ROTOR 5000	138
7.2. Balanceo en un plano	141
7.3. Balanceo en dos planos	147
7.4. Evaluación Severidad Vibratoria	148
 IV Conclusiones y Referencias	 151
8. Conclusiones y recomendaciones	152
A. Programa Inicial del Tacómetro en LabWindows/CVI	154
B. Programa para procesar datos en Matlab y comparar con LabVIEW	158
C. Manual de Prueba y Calibración de Sistema de Adquisición de Datos.	162
C.1. PRUEBA DE TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DAQpad-6020E	163

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

C.1.1. Características de tarjeta DAQpad-6020E.	163
Referencias	175

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Agradecimientos

Primero darle las gracias a Dios que me ha mostrado el camino y me ha acompañado durante la realización del presente trabajo.

A mis padres que con gran entrega me han apoyado a lo largo de mi vida personal y profesional, con su ejemplo han logrado formar todo lo que soy actualmente. Son los directos responsables y mis logros son un tributo a ellos y a Dios.

A mi hermana quien es un gran motivo para seguir adelante y fortalecer mis conocimientos como profesional.

A la Profesora Mary Vergara quien depósito su entera confianza en el manejo de los equipos del laboratorio (LABMM) y me guió a lo largo del desarrollo del presente trabajo.

Al Ing. Julián Suárez que con sus conocimientos y consejos fué un gran apoyo incondicional durante cada etapa del proyecto.

A la ilustre Universidad de Los Andes y al Postgrado de Ingeniería en Mantenimiento, por ser forjadores de mi formación académica y personal.

Introducción

Análisis de vibraciones en equipos Rotativos

La detección de fallas en maquinaria rotativa abarca tecnologías como el análisis de aceite, la termografía infrarroja y el análisis de vibraciones. La corrección de fallas en maquinaria rotatoria comprende el simple reemplazo de piezas defectuosas, como correas, cojinetes y engranajes, enderezar un eje doblado, la alineación de acoplamientos y el balanceo dinámico. De la detección de fallas y su corrección se han realizado numerosos trabajos, sin embargo el diagnóstico por vibraciones es uno de los más extendidos y será el objetivo de este trabajo de investigación, enfocado al estudio de desbalance.

El análisis de vibraciones en equipos rotativos es la herramienta que permite interpretar las lecturas de vibración y eventualmente diagnosticar con precisión el tipo de falla. *El desbalance* ocasiona el deterioro progresivo y la falla prematura de los cojinetes anti-fricción que soportan el rotor debido a las fuerzas centrífugas creadas por la rotación, éste se corrige mediante balanceo dinámico, ya sea en una máquina de equilibrado o en el mismo sitio donde está instalada la máquina bajo condiciones normales de temperatura, carga y velocidad de funcionamiento.

Durante años se ha tenido un enfrentamiento drástico por parte de los estudiantes en el periodo de escolaridad con el trabajo en la industria, por ello surge la idea de realizar un programa para efectuar mediciones en el laboratorio que puedan ser comparadas con las encontradas en una industria cualesquiera en el área de vibraciones en rotores para tomar muestras representativas de desbalance.

En el laboratorio LABMM se cuenta con un banco de pruebas llamado ROTOR

5000 elaborado en la tesis de grado [1] el cual posee algunas modificaciones para realizar pruebas de balanceo.

En este trabajo se diseña un instrumento virtual de adquisición y procesamiento de datos de vibraciones para balancear el ROTOR 5000 con los métodos vectorial en un plano y coeficientes de influencia para dos planos adicionando un módulo de evaluación de severidad de vibración. La precisión del mismo depende de la configuración de frecuencia de muestreo y la misma tiene un rango de 10KHz a 33KHz por la configuración de canales de adquisición. El programa arroja un archivo con las mediciones de vibración adquiridos con los acelerómetros y también se obtienen los resultados de cantidad de masa necesaria y ubicación de la misma para balancear el rotor 5000.

Alcance

Dentro de las expectativas del trabajo propuesto se llegó a un nivel de realización de medición de vibraciones en el laboratorio con el banco de pruebas existente utilizando un sistema de adquisición de datos con tarjeta y software de Nacional Instruments para obtener comportamiento en el tiempo y respuesta en frecuencia para el sistema rotor-dinámico cuando se encuentra desbalanceado.

Hipótesis

Por medio del análisis de vibraciones, se desarrolló un programa interactivo para el estudio del desbalance en equipos rotativos de aplicación académica para la instrucción en el laboratorio mecánica de materiales de la Universidad de los Andes, con el mismo se podrán realizar mediciones y diagnosticar el desbalance con una frecuencia de muestreo de 10-33KHz configurable por el usuario teniendo en cuenta que la frecuencia de resonancia del transductor de aceleración es 15KHz a una velocidad máxima de trabajo del rotor de 100Hz o 6000 rpm, lo cual indica que el grado de exactitud de la medida es elevado inclusive con 10KHz.

Objetivo General

- Obtener un instrumento virtual de medición de vibración con el cual se pueda detectar y corregir la mala operación por desbalance con una frecuencia de muestreo de 10 a 33Khz.
- Realizar un sistema de adquisición y procesamiento de datos para el análisis y corrección del desbalance en equipos rotativos, utilizando un banco de pruebas y equipo existente en el laboratorio.

Objetivos Específicos

- Aplicar el análisis de vibraciones de equipos rotor-dinámicos como mantenimiento predictivo midiendo el desbalance.
- Diagnosticar el estado de severidad en la vibración.
- Establecer niveles de corrección de desbalance a partir de cantidad de masa y ubicación de la misma según métodos de balanceo en uno y dos planos respectivamente.
- Identificar patrones representativos en el estudio frecuencial para establecer un análisis basado en condición del equipo rotativo.
- Analizar la condición del equipo por desbalance e implantar acciones correctivas de acuerdo a la norma ISO 10816.

Organización de la Tesis

El informe está constituido de tres partes principales que són:

- Análisis de vibraciones en equipos rotativos: Está parte hace referencia a conceptos netamente teóricos acerca del Balanceo y métodos para balancear rotores

agregando conceptos importantes de instrumentación utilizada además de teoremas que se deben tener en cuenta para una correcta adquisición de datos de vibración. Esta parte contiene tres capítulos llamados:

1. Capítulo 1: Balanceo
 2. Capítulo 2: Métodos de balanceo
 3. Capítulo 3: Instrumentación
- Diseño del tacómetro, Instalación de equipos y Programación del Instrumento Virtual: Ésta parte contiene diseño e implementación del instrumento virtual en el laboratorio de vibraciones. Explica de manera específica aspectos de diseño que se tienen en cuenta al realizar el tacómetro y recomendaciones técnicas de instalación de los sensores e instalación de tarjeta de adquisición de datos. Por último se desarrolla el programa realizado en labVIEW para la adquisición y posterior procesamiento de datos con los módulos de balanceo que son tratados en detalle en el capítulo 6, de manera similar a la parte anterior esta conforma 3 capítulos internos:
 1. Capítulo 4: Diseño e implementación de Tacómetro.
 2. Capítulo 5: Instalación de equipos en el laboratorio.
 3. Capítulo 6: Programación del Instrumento Virtual para la Medición de vibraciones y Balanceo del ROTOR 5000.
 - Presentación y Análisis de Resultados: En esta parte se evalúa la adquisición de los datos de vibración y el método de balanceo empleado para cada una de las pruebas. Se divide en cuatro secciones que se realizan de acuerdo a los módulos diseñados en el programa que son:
 1. Sección 1: Procedimiento para especificar el problema de Fase.
 2. Sección 2: Análisis de módulo de Balanceo en un plano.
 3. Sección 3: Análisis de módulo de Balanceo en dos planos por medio del método de coeficientes de influencia.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

4. Sección 4: Análisis de módulo de Severidad de Vibración.

Por último se realizaron las correspondientes conclusiones y Recomendaciones acerca del instrumento desarrollado en la investigación.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Parte I

Análisis de vibraciones en equipos

Rotativos

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Capítulo 1

Balanceo

En este capítulo se detallan conceptos básicos de análisis de vibraciones para el estudio de desbalance en equipos rotativos y sus principales tipos, se adicionan soportes netamente teóricos para abordar la temática del problema de balanceo en ambientes industriales aplicables al ROTOR 5000.

El *desbalance* es una de las fuerzas que más causan problemas en los rotores y por consecuencia en las máquinas rotativas. Si una máquina no está correctamente balanceada, generalmente presenta altos niveles de vibración, ruido y desgaste que son evidentes a la misma frecuencia de rotación de la máquina [2]. También, existe una reducción en la resistencia a la fatiga de la máquina. Un área que está relacionada al uso de rotores es el de la Turbo maquinaria (turbinas, compresores, bombas, motores de helicópteros, jets, turbo jets, cohetes, etc.). En dicha área, una de las fuentes más comunes de vibraciones es el desbalance en los rotores. Las fuerzas de vibración en el desbalance se deben a que el centro de masa del rotor es excéntrico al eje de rotación, por lo tanto, se generan fuerzas centrífugas que actúan sobre la masa del rotor y que deben ser contenidas por los rodamientos y carcasa o estructura de soporte. En el caso en que el centro de masa del rotor coincida con el eje de rotación, todavía puede darse el hecho de que se presente un desalineamiento entre el eje de rotación y el eje principal de inercia. Por lo tanto, se debe entender que un balanceo perfecto se presenta cuando las distancias radiales entre el centro de gravedad del rotor (que coincide con uno de los ejes principales de inercia) y el eje de rotación son cero. Para rotores simples (aquellos

con sólo una masa, como el de la figura 1.2, donde el eje se considera sin masa), el procedimiento de balanceo es sencillo porque el problema se resuelve aplicando sólo una masa (o contrapeso) en la posición angular correspondiente. En el caso de rotores largos y flexibles, el procedimiento es más complicado debido a que la distribución del desbalance cambia a lo largo del rotor al igual que los modos de vibración del rotor; estos aspectos afectan la posición en que los contrapesos tienen que ser añadidos como se expresa en [2].

Por otro lado es importante mencionar que en la práctica, los rotores no pueden ser perfectamente balanceados debido a errores en las mediciones y porque las masas que rotan no son rígidas, pero altos niveles de vibración sincrónica se pueden reducir mediante el balanceo, ver [3].

1.1. Tipos de desequilibrio

El *desbalance* es la distribución desigual de la masa de la pieza alrededor de su línea de rotación, Por lo tanto si la línea de rotación de una pieza no pasa por el centro de gravedad existirá una clara condición de desequilibrio [2]. El desequilibrio también puede definirse como la condición que existe cuando la línea de rotación y el eje principal central no coinciden, provocando que el giro no sea concéntrico y agregando fuerzas o momentos dinámicos que producen vibraciones [4].

En la figura 1.1 se muestran los diferentes tipos de desequilibrio según la relación que guardan entre si las posiciones del eje central principal y el eje de rotación del árbol de máquina. La figura 1.1a. muestra un desequilibrio estático el cual se produce al quedar desplazado el eje central principal paralelamente a la línea de rotación. Esto sucede cuando el desbalance producido por el peso del rotor se encuentra en el mismo plano que el centro de gravedad del rotor. La norma ISO 1925 [5] clasifica el desbalance según la distribución de masas como:

- Desbalance estático, cuando el eje principal de inercia es paralelo al eje de rotación ver figura 1.1a.
- Desbalance por par de fuerzas, cuando el eje principal de inercia intercepta al eje de rotación en el centro de gravedad del rotor figura 1.1b.

- Desbalance cuasi-estático, cuando el eje principal de inercia intercepta al eje de rotación en un punto distinto al centro de gravedad del rotor figura 1.1c.
- Desbalance dinámico, cuando el eje principal de inercia no intercepta al eje de rotación figura 1.1d.

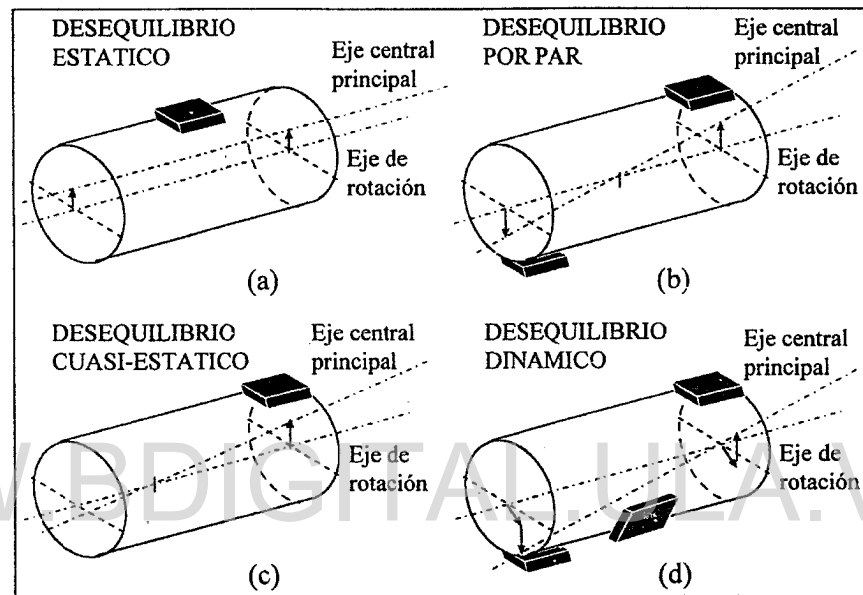


Figura 1.1: Tipos de desequilibrio: (a) desequilibrio estático; (b) desequilibrio por par de fuerzas; (c) Desequilibrio cuasi-estático; (d) Desequilibrio dinámico. Tomado de [2]

1.2. Fuentes de desbalance

Las principales fuentes de desbalance en los rotores, son ocasionadas por:

- Falta de simetría (desplazamientos de masas en la fundición, superficies con acabado superficial pobre).
- Material no homogéneo (Inclusiones en materiales forjados o rolados, variaciones en la red cristalina causadas por las variaciones de densidad del material).
- Distorsión a la velocidad de operación.

- Excentricidad.
- Desalineamiento de los rodamientos.
- Desplazamiento de las partes debido a la deformación plástica.
- Desbalance hidráulico o aerodinámico (cavitación o turbulencia).
- Gradientes térmicos.

1.3. Conceptos y principios para balancear rotores rígidos

El hecho de balancear idealmente sería mucho más sencillo si la forma del rotor y el eje no variaran con respecto a su rotación aunque esta fuera a altas velocidades. Bajo algunas condiciones iniciales se puede asumir que un rotor es rígido: (1) bajas velocidades del rotor, (2) soportes de rodamientos altamente flexibles, comparados con el rotor y (3) rango pequeño de velocidades de operación. En virtud de lo anterior, se puede justificar el uso de los métodos de balanceo para rotores rígidos. Por otro lado, un rotor también es considerado rígido si su velocidad de rotación es menor a 75 % de su menor frecuencia natural en flexión. Un rotor rígido puede ser balanceado mediante la adición de contrapesos o quitando material del rotor en dos planos normales al eje (mientras más separado mejor porque la masa de los contrapesos será menor). La mayoría de la bibliografía se dedica a tratar sobre la adición de contrapesos debido a que es un método más sencillo de verificar en cuanto a su estimación por medio de métodos teóricos. Estos métodos son: (1) La adición de estaño, (2) adición de rondanas mediante tornillos o remaches, (3) adición de hierro fundido o contrapesos de plomo y (4) la adición de contrapesos de soldadura. Por otro lado, los métodos utilizados para balancear rotores quitando material del rotor constituyen una buena opción e incluyen: Taladrado, Fresado, Pulido.

La función de los contrapesos (o de quitar material) es trasladar el centro de gravedad hasta que este se encuentre sobre el eje de rotación para después lograr que el

eje principal de inercia que pasa a través del c.g. coincida con el eje rotación o sea paralelo a él. Cuando el eje principal de inercia es paralelo al de rotación se presenta una fuerza neta radial que actúa sobre el rotor y que se debe a su aceleración centrífuga. La magnitud de esta fuerza es:

$$F = mr\omega^2 \quad (1.1)$$

Donde m es la masa del rotor, r la distancia radial del c.g. al eje de rotación y ω es la velocidad de rotación en rad/s. En la Figura 1.2, se muestra la posición de la fuerza neta radial y de sus respectivas reacciones en los rodamientos. A partir de la ecuación 1.1 para que no exista fuerza neta radial que actúe en el rotor, a cualquier velocidad se cumple:

$$m_1 R = (m + m_1) u \quad (1.2)$$

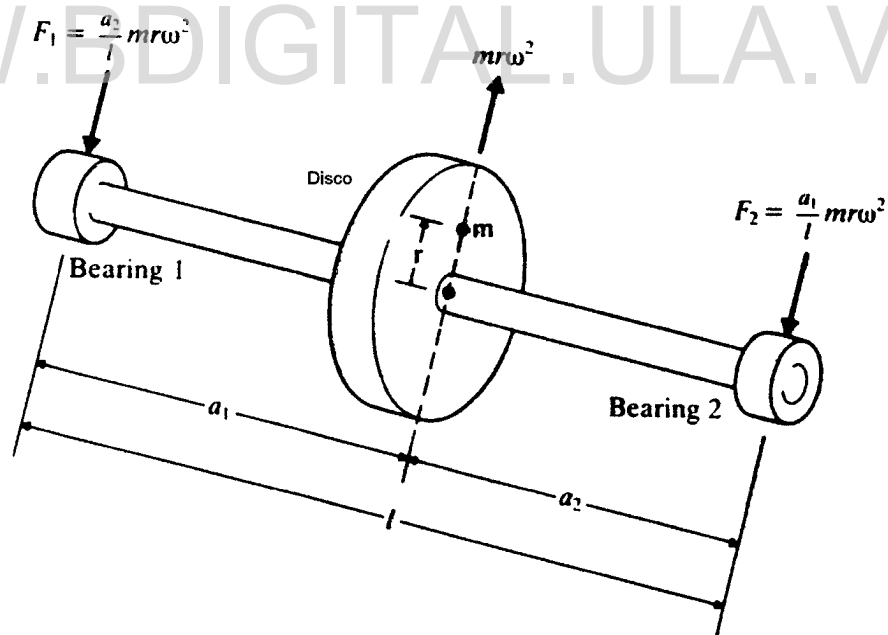


Figura 1.2: Cantidad de desbalance en un disco giratorio. Tomado de [2]

m_1 es la masa añadida, R es la distancia radial a m_1 y u representa el desplazamiento del c.g. Todavía puede existir un par pero ya no más fuerza neta y por lo tanto, cero

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

reacción en los rodamientos. Al proceso de hacer coincidir el c.g. con el eje de rotación es llamado “balanceo en un plano” o balanceo estático.

Cuando un rotor está balanceado estáticamente, el eje principal de inercia y el eje de rotación pueden no coincidir, esto significa que el procedimiento de balanceo estático solamente confirma que existirá un punto en común entre el eje principal de inercia y el eje de rotación, el cual, es el c.g. Entonces, para lograr la coincidencia entre ejes se debe aplicar un par en el plano longitudinal del rotor. Esto se logra añadiendo o removiendo dos masas de igual magnitud de cada extremo del rotor. Se prefiere escoger los extremos del rotor debido a que entre mayor distancia entre las masas, menor será la magnitud de las masas. Al proceso de hacer coincidir al eje principal de inercia del rotor con el eje de rotación se le llama “balanceo en dos planos” o balanceo dinámico. La figura 1.3, muestra dos rotores que giran libremente en el espacio. Ambos giran a una velocidad cercana a la resonancia. Es importante notar como el movimiento del rotor corresponde claramente con la descripción de los procesos de balanceo estático y dinámico.

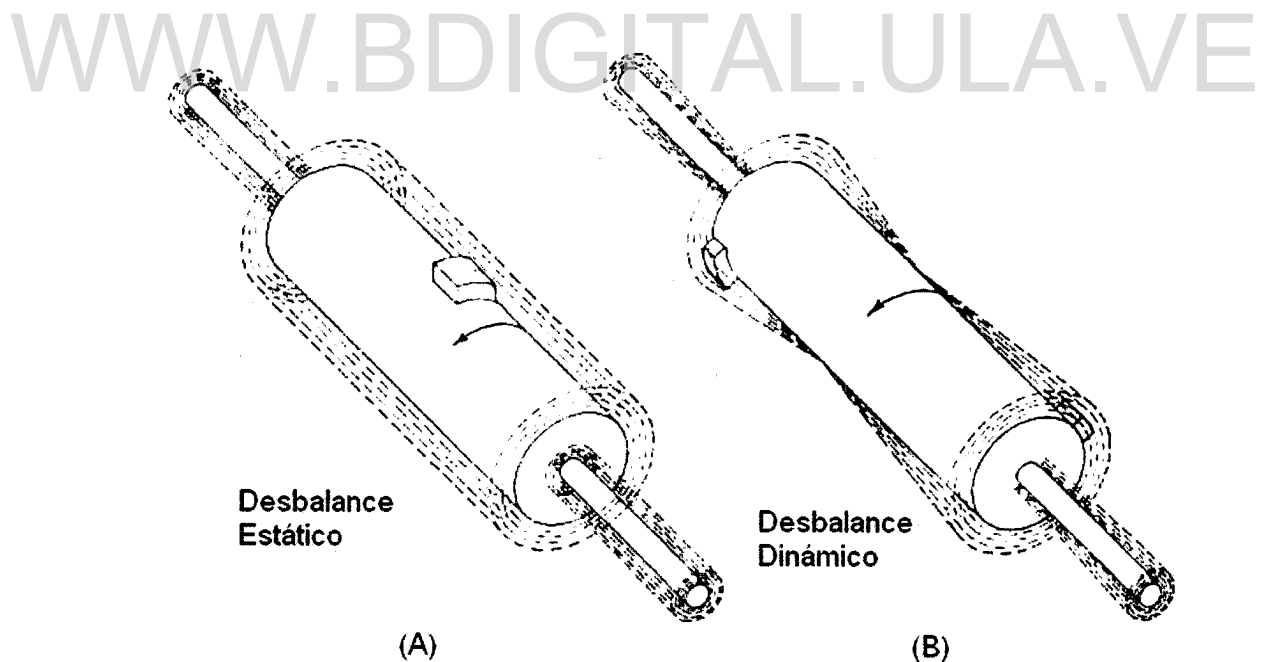


Figura 1.3: Efecto del desbalance estático y dinámico en el movimiento de un rotor libre. Tomado de [2]

1.4. Rotor Rígido

Si el rotor no experimenta ninguna deformación a la velocidad de funcionamiento se considera que es un rotor rígido, suposición que da muy buenos resultados si la velocidad del eje está por debajo de la velocidad crítica del cuerpo rotante, menos del 50 % de este valor [6].

1.4.1. Montaje Rígido

El montaje rígido del rotor en el bastidor de la máquina es aproximadamente isotrópico, aunque se deben esperar ciertas diferencias en la elasticidad del bastidor de la máquina como un todo en las direcciones horizontal y vertical, pero estas diferencias son realmente despreciables; siendo además la cantidad absoluta de deformación en verdad insignificante por lo que en realidad la inercia rotatoria no juega ningún papel y los efectos giroscópicos no tienen lugar, siendo las fuerzas centrífugas prácticamente independientes de la masa del cuerpo a ser balanceado. Los efectos de un desbalance no pueden ser medidos directamente sino con relación a los cojinetes del cuerpo a ser balanceado. Sin embargo, los desbalances no pueden ser compensados directamente en los planos de los rodamientos y la interferencia mutua es inevitable cuando se llevan a cabo las correcciones en los planos de balanceo [7]. Esta situación se resuelve trasladando el plano de medición al plano del disco implementado en el rotor para realizar las diferentes masas correctoras. El ROTOR 5000 se trabaja a lo largo del desarrollo como un rotor rígido a velocidades inferiores a 3200 rpm que es la primera velocidad crítica o frecuencia natural según [1].

1.5. Efectos de la flexibilidad del rotor

Cuando un rotor ha sido balanceado y da la apariencia de que el método falló, porque los niveles de vibración sincrónica aceptable no fueron aceptados, usualmente, se debe a que la flexibilidad del rotor no ha sido tomada en cuenta. Cuando el rango de velocidad de operación se acerca o excede alguna de las velocidades críticas con modos de vibración que presentan un grado considerable de flexión.

En la figura 1.4 se muestra como cambia el efecto de los contrapesos según la velocidad. La masa negra en el centro del rotor representa el desbalance inicial del rotor. En la figura 1.4a se muestra como el desbalance inicial actúa como una fuerza centrífuga. En la figura 1.4c, se puede ver que el modo de vibración se acerca a su segunda velocidad crítica con lo que se produce un desbalance dinámico con reacciones en los rodamientos. En este momento se puede observar que es posible balancear el rotor de la figura 1.4 para el caso de la figura 1.4b o 1.4c mediante la adición de contrapesos, pero, no para ambos casos. Por lo tanto, la regla para balancear rotores flexibles debe decir “Si sólo dos planos de corrección son usados, un rotor flexible puede ser balanceado para sólo una velocidad de rotación”. [2].

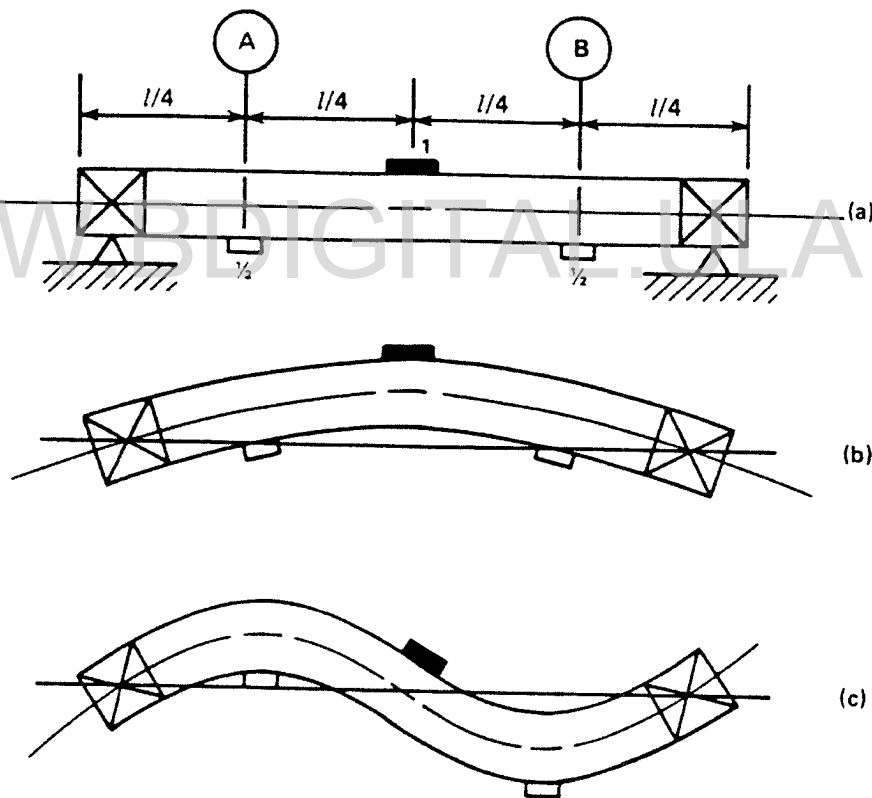


Figura 1.4: Distribuciones de masa en un rotor flexible. Tomado de [8] (a) Girando por debajo de la primera velocidad crítica; (b) Girando por encima de la primera velocidad crítica; (c) Por encima de la segunda velocidad crítica

Bajo estas premisas se parte para definir que el alcance máximo del trabajo es dos planos debido a que se tienen dos acelerómetros para adquirir datos en los apoyos, es

decir, se deberá balancear para una velocidad en particular preferiblemente por debajo de la primera velocidad crítica. En el capítulo 6 se definen los diferentes módulos programados para balancear en uno y dos planos con sus diferentes procedimientos.

En el capítulo 2 se muestran los métodos para balancear rotores y se explicará con mas detalle, teóricamente, como se realiza el procedimiento de balanceo para construir el algoritmo implementado.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Capítulo 2

Métodos de Balanceo de Rotores

En el presente capítulo se definen los diferentes métodos para balancear rotores investigados a lo largo del desarrollo del trabajo con sus principales ventajas y desventajas para explicar el porque de la selección de los métodos vectoriales para la realización del algoritmo.

Existen diferentes métodos para balancear rotores que se pueden clasificar según los planos en: Balanceo en un solo plano, Balanceo en dos planos y Balanceo en $N+2$ planos.

A su vez estas clases se dividen según diferentes métodos para balancear como se indica en la sección 2.2.

Antes de empezar a describir los métodos para balancear rotores es necesario definir un concepto vital para el entendimiento del fenómeno físico del desbalance, este concepto es la definición de fase y su importancia para balancear rotores.

2.1. Concepto de Fase

Fase es una medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas senoidales. Aunque la fase es una diferencia verdadera de tiempo, siempre se mide en términos de ángulo, en grados o radianes. Eso es una normalización del tiempo que requiere un ciclo de la onda sin considerar su verdadero periodo de tiempo. La diferencia en fase entre dos formas de onda se llama a veces el desplazamiento de fase. Un desplazamiento de fase de 360

grados es un retraso de un ciclo o de un período de la onda, lo que realmente no es ningún desplazamiento. Un desplazamiento de 90 grados es un desplazamiento de $1/4$ del periodo de la onda etc. El desplazamiento de fase puede ser considerado positivo o negativo; eso quiere decir que una forma de onda puede ser retrasada relativa a otra o una forma de onda puede ser avanzada relativa a otra. Esos fenómenos se llaman atraso de fase y avance de fase respectivamente.

Atraso de tiempo = $1/4$ de periodo = 90 grados de .

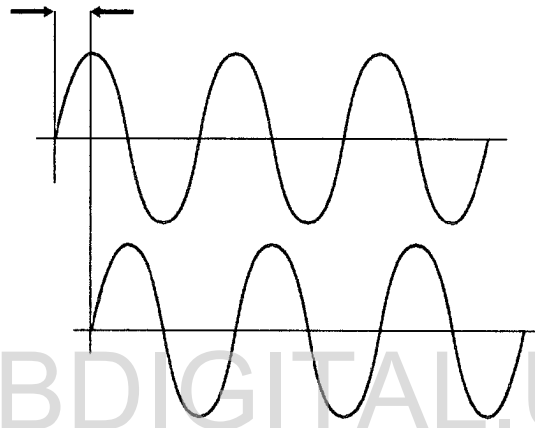


Figura 2.1: Concepto de Fase tomado de [8]

En la figura 2.1, la curva inferior está desplazada 90 grados con respecto a la curva superior. Eso es un atraso de tiempo de $1/4$ del período de la onda. También se podría decir que la curva superior tiene un avance de 90 grados. La fase también se puede medir con referencia a un tiempo particular. Un ejemplo de esto es la fase de un componente desbalanceado en un rotor, con referencia a un punto fijo en el rotor, como una conexión. Para medir la fase, un impulso disparador debe ser generado desde un cierto punto de referencia, en la flecha. Este disparador puede ser generado por un tacómetro o por una clase de sonda óptica o magnética, que sentirá una discontinuidad en el rotor y a veces está llamada un impulso “taco”.

El ángulo de fase se puede medir desde la posición de referencia o bien en la dirección de la rotación, o bien en la dirección opuesta a la rotación, eso es atraso de fase o avance de fase. Varios fabricantes de máquinas usan diferentes convenciones para esta medición. [8].

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

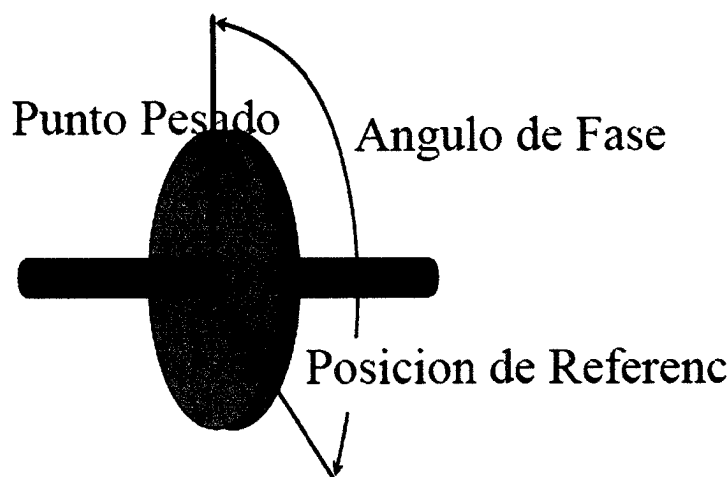


Figura 2.2: Fase de un Rotor

Uno de los inconvenientes que se presenta a la hora de medir la velocidad con el contador de la tarjeta es que la fase se debe medir cada ciclo de la señal de vibración con respecto a la velocidad del rotor, razón por la cual se debe ejecutar una revisión cada ciclo de reloj, si se hace con el contador se debe trazar una señal con la frecuencia de la señal del tacómetro para ser comparada con la señal de vibración que tiene la frecuencia 1xRPM. La construcción de dicha señal es algo complicada debido a la velocidad de adquisición de la señal de vibración, según [9] el tacómetro que se implementa en el toolset de Análisis de vibraciones por órdenes se conecta en un canal análogo para adquirir la señal de forma análoga, es decir, ya estaría construida la señal en el canal para todo tiempo y así compararla con la vibración presente en el acelerómetro. En el capítulo 6 se tratará con mas detalle esta selección.

2.2. Balanceo en un plano

El balance en un sólo plano puede ser realizado por el método de prueba y error, el cual consiste en colocar un peso en varias posiciones angulares, registrando dichos ensayos en un gráfico polar hasta conseguir que la amplitud de la vibración sea mínima, para luego ir variando la cantidad de peso hasta que se logre eliminar la vibración totalmente ver [2]. El balanceo en un solo plano es normalmente suficiente en la práctica

para rotores rígidos en forma de disco delgado, y se puede automatizar por deposición controlada de metal. La medición debe ser efectuada sobre un punto sobre el cojinete mas cercano al plano de balanceo. El balanceo se hace con la suposición que el desbalance es puramente estático. Por otra parte se asume que el disco está montado en el centro del eje y además la igualdad de características de isotropía de ambos soportes, lo que asegura una respuesta idéntica de magnitud y fase de ambos apoyos del rotor. Un disco desbalanceado próximo a uno de los cojinetes y alejado del otro producirá el efecto de un desbalance-cuasiestático a menos que el eje tenga otra pieza desbalanceada que haga que el centro de masa se encuentre en la mitad entre los soportes [2]. Estos métodos para balancear rotores son la base para el algoritmo implementado en el instrumento virtual diseñado. Se investigaron los diferentes métodos con el fin de seleccionar el mas adecuado a la aplicación en el laboratorio para el ROTOR 5000.

2.2.1. Método Estroboscópico

Es un método antiguo, aunque en la actualidad se usan captadores fotoeléctricos para producir una señal de referencia y medir automáticamente la fase, el estroboscopio es un valioso instrumento para entender el concepto de ángulo de fase dentro del procedimiento de balanceo. La figura 2.3 muestra el ángulo de destello de un rotor dado por el ángulo medido en dirección contraria a la de rotación del eje, entre la posición del lugar pesado y el punto de captación de vibraciones al ocurrir el destello de luz estroboscópica, el cual coincide con el ángulo de fase medido en una escala angular que gira con el eje. [10].

Si se debe equilibrar un disco, el cual produce vibraciones en los pedestales de la máquina debido a un cierto desbalance. Habrá que fijar al rotor una escala angular, dividida en 360° , y escoger como referencia para la medición de la fase algún punto fijo de la máquina. Luego se deberá determinar la velocidad de funcionamiento del rotor y efectuar dos mediciones filtradas de la amplitud de la vibración y del ángulo, cuyos valores deberán ser anotados. [2]

Para obtener los datos requeridos y determinar la localización angular y la cantidad del peso de corrección son necesarios dos ensayos a la misma velocidad constante. [11]

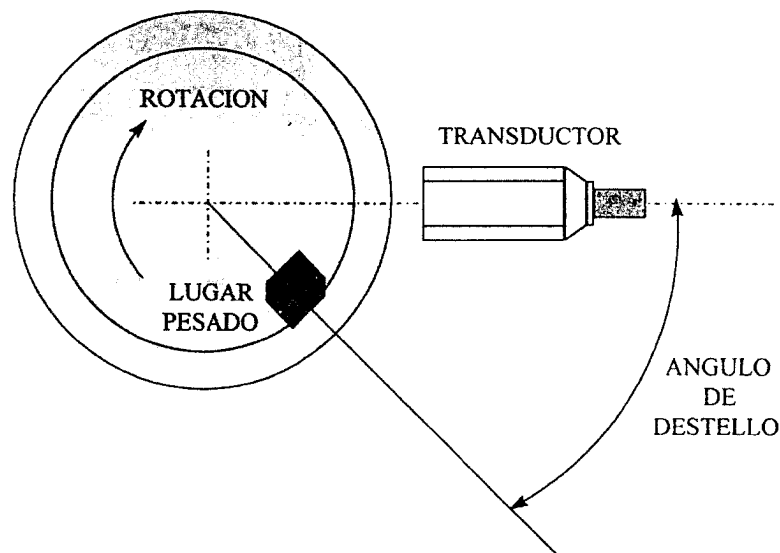


Figura 2.3: *Ángulo de destello*. Tomado de [2]

- El primer ensayo es hecho bajo condiciones normales sin ningún peso correctivo en el rotor [11]. Se lleva al rotor a la velocidad de balanceo (que es casi siempre la velocidad de funcionamiento) y se registran los datos de la vibración original en amplitud. V_0 y fase γ_0 medida en dirección opuesta al giro del rotor [12]. Dicha vibración representada por el vector $\vec{V}_0$, donde $V_0 = \|\vec{V}_0\|$ es la amplitud de la vibración se traza en coordenadas polares como se muestra en la figura 2.4.
- El segundo ensayo es hecho con un peso de prueba conocido [11], cuya magnitud es estimada mediante la siguiente fórmula empírica [13].

$$W_t = \frac{WV_0}{r} \quad (2.1)$$

donde W es el peso del rotor, siendo r el radio de compensación en el plano de balanceo. Es imprescindible que el peso de prueba ocasione un cambio apreciable en la magnitud y/o la fase de la vibración.

El ángulo en el cual es insertado el peso de prueba es normalmente seleccionado como $\gamma = 0^\circ$ en la escala angular rotante para permitir una visualización directa

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

del ángulo de fase [13]. La masa de prueba $m_t = W_t/g$ crea un desbalance de magnitud $U_I = m_t r$ que se puede expresar en notación fasorial como:

$$\vec{U}_I = U_I e^{i\gamma} \quad (2.2)$$

Se detiene el rotor y se fija el peso de prueba conocido al rotor en el plano de balanceo [12]. Se opera el rotor a la misma velocidad y se registran los nuevos datos de la vibración en amplitud V_t y fase γ_t [12]. Con estos datos se grafica el vector $\vec{V}_t$ como se ilustra en la figura 2.4. [12].

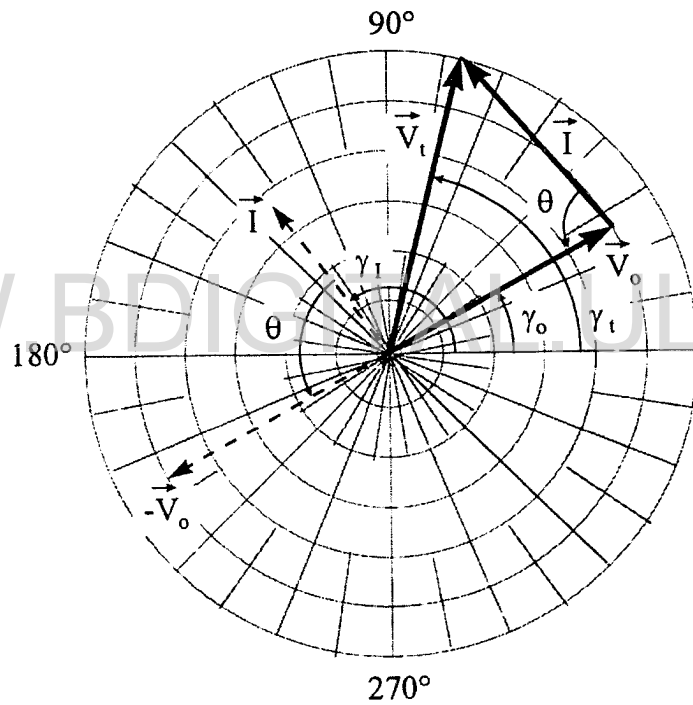


Figura 2.4: En el balanceo en un solo plano, un peso de prueba es agregado para encontrar el vector de efecto I . Tomada de [2].

- Se procede a construir el vector $\vec{I}$ conectando los extremos de los vectores $\vec{V}_0$ y $\vec{V}_t$ [12].

El vector $\vec{I}$ debe apuntar de $\vec{V}_0$ a $\vec{V}_t$, para que se cumpla la ecuación vectorial [12].

$$\vec{V}_t = \vec{V}_0 + \vec{I} \quad (2.3)$$

El vector $\vec{I}$ representa el efecto del peso de prueba sobre la vibración del rotor y es usado para determinar la magnitud y la localización angular de un peso de corrección [12].

- A continuación se mide la longitud I del vector $\vec{I}$ y se traslada hasta el origen de coordenadas para determinar su fase, o se calcula como la siguiente diferencia de fasores:

$$\vec{I} = \vec{V}_t - \vec{V}_0 = I e^{i\gamma_I} \quad (2.4)$$

Donde $I = \|\vec{I}\|$ es su magnitud y γ_I es su fase en coordenadas polares.

Según la ecuación que establece que la vibración es proporcional al desbalance:

$$\vec{V} = \vec{C} - \vec{U} \quad (2.5)$$

Se deduce que:

$$\vec{I} = \vec{C} - \vec{U}_I \quad (2.6)$$

de donde se calcula por división de fasores el coeficiente de influencia.

$$\vec{C} = \frac{\vec{I}}{\vec{U}_I} = \frac{I e^{i\gamma_I}}{U_I e^{i\gamma}} = \frac{I}{U_I} e^{i(\gamma_I - \gamma)} \quad (2.7)$$

El peso de corrección $W' = m'g$ deberá ser tal que el balanceo de magnitud $U' = m'r$ produzca un efecto que compense la vibración original. Este planteamiento fundamental se expresa matemáticamente en la forma [3].

$$\vec{C}\vec{U}' = -\vec{V}_0 \quad (2.8)$$

Puesto que $e^{-i\pi} = e^{i(-\pi)} = \cos(-\pi) + i \sin(-\pi) = \cos \pi - i \sin \pi = -1$; despejando el fasor de balance para corregir el desequilibrio de la ecuación y sustituyendo el valor del coeficiente de influencia dado por la ecuación 2.7, se tiene que [3]

$$\begin{aligned} \vec{U}' &= \frac{\vec{W}'}{g} r e^{i\gamma'} = -\frac{\vec{V}_0}{\vec{C}} = -\frac{V_0 e^{i\gamma_0}}{(I/U_I) e^{i(\gamma_I - \gamma)}} = -\frac{U_I V_0}{I} e^{i(\gamma_0 - \gamma_I + \gamma) e^{i\pi} e^{-i\pi}} \\ &= -\frac{V_0}{I} \frac{W_t}{g} r e^{i(\gamma_0 + \pi - \gamma_I + \gamma)} = -\frac{V_0}{I} \frac{W_t}{g} r e^{i(\gamma + \theta)} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

donde el ángulo $\theta = (\gamma_0 + \pi) - \gamma_I$, entre el vector $\vec{I}$ y el vector $-\vec{V}_0$, está claramente indicado en la figura 2.4. De la magnitud del balance dado por la ecuación 2.9 se determina el peso de balance correctivo que se necesita como [12]:

$$W' = \frac{W_t V_0}{I} \quad (2.10)$$

- Por último se mide el ángulo θ incluido entre los vectores $\vec{V}_0$ e $\vec{I}$ [12]. Ahora se traslada el peso de corrección W' por este ángulo medido desde la posición inicial del peso de prueba en la dirección en la cual el vector $\vec{I}$ llega a estar opuesto al vector de la vibración original $\vec{V}_0$ y se remueve el peso de prueba W_t del plano de balanceo [12]. Según la ecuación 2.9 la posición angular del peso de balance es:

$$\gamma' = \gamma + \theta \quad (2.11)$$

Es importante aclarar que además del ángulo de fase mecánico ϕ , existe un retraso de fase eléctrico ϑ debido a la demora en la respuesta de los componentes electrónicos de los transductores e instrumentos que conforman el equipo de medición con respecto a la vibración del pedestal de la máquina el cual depende de la frecuencia de la señal [14]. Por lo tanto el ángulo de fase total es:

$$\Psi = \phi + \vartheta \quad (2.12)$$

El diagrama vectorial que se muestra en la figura 2.5 ayudará a entender el significado del ángulo de fase para una correcta interpretación y aplicación de las técnicas de balanceo. Construyendo un vector equivalente al vector $\vec{I}$, trazando una paralela de igual longitud que la magnitud del vector $\vec{I}$ en la misma dirección a partir del origen de coordenadas, y suponiendo que corresponde a una amplitud de vibración I con una fase $\gamma_I = 350^\circ$. Se asume que el rotor plano tiene fijada una escala angular y que gira en sentido contrario a las agujas del reloj con una velocidad angular constante ω . Además el peso de prueba W_t fué localizado radialmente a una distancia r del centro de rotación y angularmente en un ángulo de 300° como se muestra en la figura 2.5.

Puesto que el vector de efecto equivalente tiene una magnitud I con un ángulo (o fase) $\gamma_I = 350^\circ$, esto quiere decir que el efecto máximo del peso de prueba se produjo se produjo con 50° de retardo, o sea que el ángulo de fase es $\Psi = 50^\circ$.

ángulo conocido en geometría como interno alterno entre dos rectas. En efecto,
 $\theta = (\gamma_0 + 180^\circ) - \gamma_I = (230^\circ + 180^\circ) - 350^\circ = 60^\circ$. [2].

2.2.2. Método de Balanceo Vectorial en un Plano

El procedimiento se realiza por medio de un gráfico polar análogo a la figura 2.5.

- Se acciona el rotor a la velocidad de funcionamiento, se mide y registra la información inicial de desequilibrio de amplitud y fase. A este vector se le denomina O . En la figura 2.6 se muestra el procedimiento manual.
- Se acciona el rotor a la velocidad de balanceo con una masa de prueba. Se registra la nueva información de desequilibrio de amplitud y fase llamándose $(O + T)$ a dicho vector.
- Se trazan los vectores que representan O y $O + T$ en el gráfico polar.
- Se construye el vector T uniendo los extremos de los vectores O y $O + T$, el vector T debe apuntar hacia $O + T$.
- Se mide la longitud del vector T y se calcula el peso de corrección de desequilibrio necesario de acuerdo a la ecuación 2.13:

$$PesoCorreccion = Pesoprueba * \left(\frac{O}{T} \right) \quad (2.13)$$

- Se mide el ángulo comprendido entre O y $O + T$, se cambia la posición del peso corregido según el ángulo medido desde la posición inicial del peso de prueba. La medida de este cambio es opuesto a la dirección del cambio del ángulo de fase desde O hacia $O + T$.
- Si se desean correcciones adicionales se observa y se anota la nueva vibración de amplitud y fase, estando el rotor funcionando con el peso de corrección calculado anteriormente. Esta nueva medida se traza con un nuevo vector " $O + T'$ " junto con el vector de desequilibrio inicial " O ", uniendo los extremos de estos vectores determinando un nuevo vector T' . Para determinar la magnitud del vector T' , se

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
 (CC BY-NC-SA 3.0 VE)

mide su longitud. El nuevo vector peso de corrección se determina mediante la fórmula:

$$PesoCorreccion = Pesoprueba \times \left(O/T' \right) \quad (2.14)$$

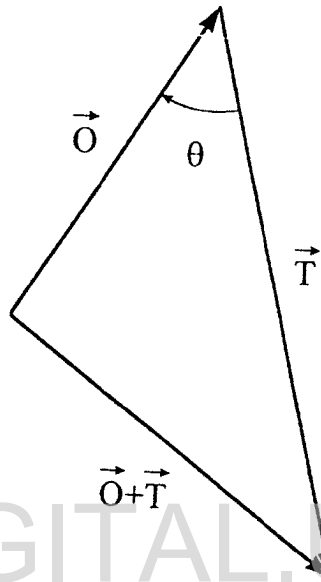


Figura 2.6: Balanceo Vectorial en un Plano. Tomado de [2]

Siendo el peso de prueba el peso de corrección calculado anteriormente. Para determinar la colocación del peso de corrección, se mide el ángulo comprendido entre el vector inicial “O” y el nuevo vector “T’”, colocando el nuevo peso de corrección en dirección contraria al giro del vector “O + T” respecto de “O”. [15].

Este método es basado en el método estroboscópico para balancear en un plano y es el contenido en el algoritmo diseñado para el instrumento virtual de balanceo del ROTOR 5000 ya que permite operar vectorialmente las variables y tiene menos gasto computacional.

2.2.3. Método de Balanceo de los Cuatro Vectores

Este método es útil si no se dispone de un estroboscopio o de una señal de referencia para medir la fase. El método de los cuatro vectores utiliza la amplitud de vibración

solamente para la determinación del desbalance, es fácil de entender y la solución gráfica es bastante simple pero se requieren por lo menos cuatro corridas de medición a la misma velocidad. Con ésta técnica es posible deducir la magnitud y la fase de la fuerza centrífuga creada por un desbalance a partir de cuatro mediciones de la amplitud de vibración. [13]. Se considera un rotor rígido plano y se asume primeramente que se conoce la magnitud de desbalance mr y la fase del mismo representado por el vector OS en la figura 2.7(a) [13]. Se agrega al rotor a una distancia radial r en un ángulo conocido una masa de prueba m_t conocida la cual produzca un desbalance adicional $m_t r$ representado, por ejemplo, por el vector SC , entonces el desbalance total será el vector suma de OS y SC el cual es OC [13]. Si se remueve esta masa y se reemplaza a 120° en sentido anti-horario para la misma posición axial en el rotor y a la misma distancia radial, de tal manera que su desbalance sea SD , se tendrá un desbalance total OD ; y similarmente si se reubica la masa a 240° con respecto a su posición angular original en el mismo sentido se tendrá un desbalance total OE [13].

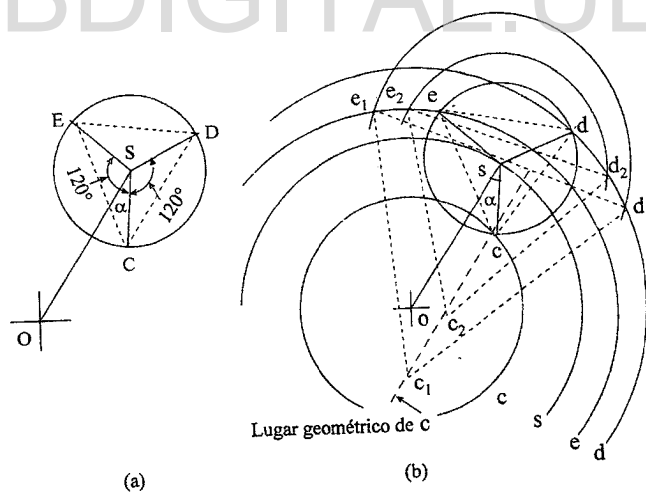


Figura 2.7: Método de Balanceo de los cuatro Vectores. Tomado de [13]

Por otra parte, se concluye que la amplitud de la vibración V es directamente proporcional a la magnitud del desbalance U según [2].

La expresión de las ecuaciones vectoriales es como sigue:

$$\begin{cases} \vec{OS} + \vec{SC} = \vec{OC} \\ \vec{OS} + \vec{SD} = \vec{OD} \\ \vec{OS} + \vec{SE} = \vec{OE} \end{cases} \quad (2.15)$$

Y puesto que las magnitudes de los desbalances son:

$$\|\vec{OS}\| = mr, \|\vec{SC}\| = \|\vec{SD}\| = \|\vec{SE}\| = m_t r \quad (2.16)$$

se puede establecer la relación siguiente

$$\frac{\|\vec{OS}\|}{\|\vec{SC}\|} = \frac{mr}{m_t r} \quad (2.17)$$

de donde se calcula la masa desbalanceada como

$$m = m_t \frac{\|\vec{OS}\|}{\|\vec{SC}\|} \quad (2.18)$$

o el peso desbalanceado $W = mg$ en función del peso de prueba $W_t = m_t g$. El peso de corrección de magnitud

$$W' = W \quad (2.19)$$

deberá colocarse en el plano de balanceo a una distancia r del eje de rotación con dirección y sentido opuesto al desbalance que es la dirección y sentido del vector **SO** localizado a un ángulo α del vector **SC** como se muestra en la figura 2.7(a).

- Las instrucciones para efectuar el balanceo en un solo plano por el método de los cuatro vectores son las siguientes:

Antes de comenzar se deben marcar tres puntos sobre el rotor con una diferencia angular de 120° y numerar en el sentido contrario a las agujas del reloj como 1, 2 y 3. Se debe fijar el transductor de vibración al cojinete de la máquina más cercano al rotor a ser balanceado y sostener en su lugar manualmente en la dirección de la máxima amplitud de vibración en un plano perpendicular al eje del rotor y se escoge esta dirección para la medición. Sintonizar el filtro del analizador de espectro de frecuencia a la velocidad de balanceo. El procedimiento para el equilibrado es como sigue:

- La premarcha a la velocidad de balanceo proporciona la amplitud de vibración original del rotor desbalanceado como A_0 .
- Se calcula un peso de prueba aproximado dado por la siguiente fórmula empírica [13].

$$W_t = \frac{W_R A_0}{r} \quad (2.20)$$

donde W_R es el peso de las partes vibratorias y r es el radio de compensación en el plano de balanceo.

- La primera marcha a la misma velocidad de balanceo con el peso de prueba W_t en el punto (1) da la amplitud de vibración A_1 .
- La segunda marcha a la misma velocidad de balanceo con el peso de prueba W_t en el punto (2) da la amplitud de vibración A_2 .
- Y la tercera marcha a la misma velocidad de balanceo con el peso de prueba W_t en el punto (3) da la amplitud de vibración A_3 .
- Se trazan en el papel cuatro círculos de radios A_0, A_1, A_2 y A_3 , con centro común O ; y con centro C localizado arbitrariamente en la circunferencia de radio A_0 se traza usando un compás un círculo de radio arbitrario. Se busca un triángulo equilátero cuyos vértices estén en los círculos de radio A_1, A_2 y A_3 , y cuyo centroide C , determinado por la intersección de tres rectas perpendiculares a los lados del triángulo y que pasan por sus puntos medios y por sus vértices opuestos, éste es el círculo de radio A_0 . La construcción gráfica de dicho triángulo equilátero se lleva a cabo mediante el procedimiento de prueba y error que fue expuesto anteriormente. El peso de corrección debe ser colocado en la dirección de la recta $\overline{CO}$ al mismo ángulo que forma con la recta $\overline{C1}$ y debe tener una magnitud

$$W' = W_t \frac{\overline{CO}}{\overline{C1}} \quad (2.21)$$

Dependiendo de la selección de los puntos de corte de la circunferencia de radio arbitrario y con centro C con las circunferencias de radios A_2 y A_3 es posible obtener dos soluciones, se debe considerar que produce una numeración en el mismo sentido que la del rotor.

- Para evaluar la precisión de la solución encontrada se trazan en el punto (1) un círculo de radio A_1 , en el punto (2) un círculo de radio A_2 , y en el punto (3) un círculo de radio A_3 . Estos tres círculos deben intersectarse en el punto O . La línea que une el centroide C del triángulo equilátero con el punto de intersección O de los tres círculos permite determinar la posición angular del peso de corrección con respecto a la posición angular conocida del peso de prueba para la primera marcha de medición dada por la línea que une C con 1 [2].

2.3. Balanceo en dos planos

El balanceo en dos planos es análogo en muchos aspectos al balanceo en un solo plano, excepto que requiere considerar los efectos cruzados o interferencia de los planos de corrección. El desbalance observado en cada plano de corrección es resultado del desbalance en el plano de corrección asociado más el efecto del desbalance proveniente del extremo opuesto. [12].

2.3.1. Método Vectorial de Balanceo en Dos Planos

Está basado en el efecto del desbalance de un plano sobre el otro, para este se emplean tres corridas. En cada corrida, a la velocidad de funcionamiento se determina la amplitud y el ángulo de fase, primero por el desbalance original del rotor; segundo con el peso de prueba en un plano y luego con el peso de prueba en el otro plano. Se emplean dos planos de medición, respecto a la posición axial de referencia de fase, denominados cerca y lejos [16]. En la figura 2.8, se representa el procedimiento vectorial.

En la primera corrida, al obtener la amplitud y ángulo de fase, estos se representan en dos planos cerca y lejos en la figura 2.8(b). De la segunda corrida 2.8(c), se tienen los vectores N_n y F_n que representan la vibración en los planos cerca y lejos, al haber colocado el peso de prueba en el plano cerca W_{pn} .

De los vectores mencionados, se obtienen la relaciones:

$$\begin{aligned} N + A &= N_n \\ F + \alpha A &= F_n \end{aligned} \quad (2.22)$$

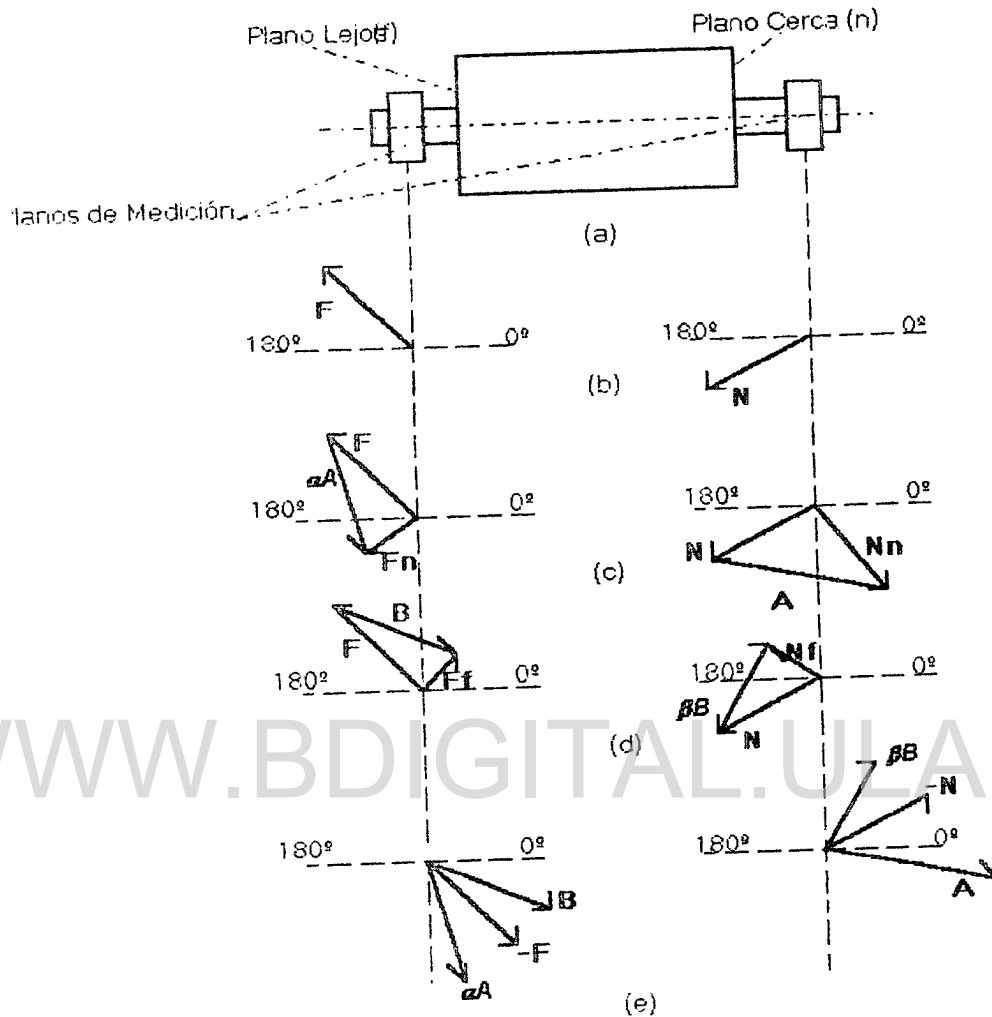


Figura 2.8: Solución Vectorial en Dos Planos. (a)Rotor; (b)Vector desbalance; (c)Vector efecto extremo cercano; (d)Vector efecto extremo lejano; (e)Vector resultante Tomado de [15].

donde A es el efecto del peso de prueba colocado en el plano cerca sobre rodamiento cercano y αA es el efecto del mismo peso sobre el lado lejano, pudiéndose calcular el coeficiente de influencia α del plano cerca sobre el rodamiento lejano:

$$\alpha = \alpha A / A \quad (2.23)$$

En la tercera corrida mostrada en la figura 2.8(d), se coloca el peso prueba en el plano lejano (W_{pf}) obteniéndose las mediciones N_n y F_f en los rodamientos cerca y lejos,

realizándose las relaciones vectoriales siguientes:

$$\begin{aligned} N - \beta B &= N_f \\ F + B &= F_f \end{aligned} \quad (2.24)$$

donde B y βB , representan el efecto del peso de prueba $W_p f$ en los rodamientos lejano y cercano respectivamente. Pudiéndose calcular el coeficiente de influencia β del plano lejano sobre el rodamiento cercano.

$$\beta = \beta B / B \quad (2.25)$$

La figura 2.8(e) muestra los resultados obtenidos de las tres corridas en cada momento. Para balancear el rotor los efectos de los pesos de prueba deben contrarrestar la vibración debido al desbalance original en cada rodamiento, o sea cambiar los pesos de prueba tal que:

$$\begin{aligned} A + \beta B &= -N \\ B + \alpha A &= -F \end{aligned} \quad (2.26)$$

Suponiendo que Θ y ϕ son los operadores vectoriales que producen los cambios necesarios de los pesos de prueba para obtener los pesos de corrección, se tiene:

$$\begin{aligned} W_{cn} &= \Theta W_{pn} \\ W_{cf} &= \phi W_{pf} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Reescribiendo las ecuaciones 2.26 como:

$$\begin{aligned} \Theta A + \phi \beta B &= -N \\ \phi B + \phi \alpha A &= -F \end{aligned} \quad (2.28)$$

Con lo cual, los operadores vectoriales son:

$$\begin{aligned} \Theta &= (\beta F - N) / A (1 - \alpha \beta) \\ \phi &= (\alpha N - F) / B (1 - \alpha \beta) \end{aligned} \quad (2.29)$$

Sustituyendo los valores de los operadores en las ecuaciones 2.27 se puede determinar la cantidad y posición angular de los pesos de corrección necesarios para el balanceo del rotor. [15]

2.3.2. Separación de Desbalance en estático y por Par de fuerzas

En principio es posible corregir cualquier desbalance dinámico corrigiendo separadamente el desbalance estático y el desbalance por par de fuerzas en dos o tres planos de balanceo.

Este método de balanceo es aplicable si se cumplen las siguientes condiciones:

1. El rotor es totalmente simétrico con respecto al plano radial que contiene al centro de gravedad, y los planos de balanceo, perpendiculares al eje de rotación, equidistan de este plano central, ortogonal al eje de giro, y también de los puntos de medición en los cojinetes de la máquina; es decir que el rotor es razonablemente simétrico, uniforme y está situado simétricamente con relación a sus soportes.
2. El movimiento del eje es circular en los cojinetes y en el espacio, lo cual equivale a asumir que los cojinetes tienen idénticas características y que los soportes son isotrópicos, con una igualdad razonable de las constantes de rigidez y amortiguación en las direcciones horizontal y vertical de las estructuras de soporte. [11]
3. La longitud del rotor es casi igual a la distancia entre los apoyos, o sea que los planos de balanceo están muy próximos a los apoyos del rotor, lo cual es cierto para rotores largos. Es importante resaltar que la mayoría de los problemas de balanceo envuelven una combinación de desbalance estático puro y de desbalance por par de fuerzas, detectable únicamente bajo las condiciones dinámicas; y que los efectos cruzados pueden ser separados en sus componentes estático y por par de fuerzas, asociados a los modos de vibración para un rotor rígido soportado en cojinetes terminales flexibles, y entonces corregir individualmente el desbalance estático y el desbalance por par de fuerzas. [12, 14, 17, 18]

Procedimiento a seguir para el balanceo de un rotor:

- Usando un papel de gráfico polar se construyen los vectores **OA** y **OB** a la misma escala. El vector **OA** representa la magnitud y fase de la vibración del extremo N°1, y el vector **OB** representa la magnitud y fase de la vibración del extremo N°2. [11, 12, 14]

- Se conectan con una línea los extremos de los vectores **OA** y **OB**, y se busca el punto medio de esta línea. [14, 19, 20]
- Se traza una línea desde el origen **O** hasta el punto medio **C** de la línea de conexión. El vector **OC** representa la vibración debida al desbalance estático original tanto en el extremo N°1 del rotor como en el extremo N°2 del rotor, o componentes estáticas N°1 y N°2. La línea de conexión representa la vibración debida al desbalance por el par de fuerzas; siendo el vector **CA** la vibración debida a la fuerza del par que actúa en el extremo N°1 del rotor, o componente por par N°1, y el vector **CB** la vibración ocasionada por la otra fuerza del par que actúa en el extremo N°2 del rotor, o componente por par N°2. En la figura 2.9 los vectores **CA** y **CB** que representan las vibraciones causadas por el desbalance por par de fuerzas se trasladan paralelamente hasta el origen para determinar las magnitudes iguales y fases opuestas correspondientes. Al encontrar los vectores que representan las vibraciones debidas al desbalance estático y al desbalance por par de fuerzas, puede corregirse primero cualquiera de los dos desbalances, el que se prefiera, basándose en la premisa de que las correcciones del desbalance estático no influenciarán al del par de fuerzas y viceversa. Como resulta mas sencillo trabajar con un solo vector que con dos vectores, normalmente se realiza primero la corrección del desbalance estático y luego la corrección por par de fuerzas. [14, 19, 20]

Las ecuaciones vectoriales se describen como:

$$\begin{cases} \vec{OA} = \vec{OC} + \vec{CA} \\ \vec{OB} = \vec{OC} + \vec{CB} \end{cases} \quad (2.30)$$

siendo

$$\vec{CA} = -\vec{CB} \quad (2.31)$$

- Teniendo la vibración original **OC**, que representa la mitad de la vibración debida al desbalance estático total, se procede a colocar en la misma posición radial y angular dos pesos de prueba idénticos, uno en el plano de balanceo N°1 y el otro

en el plano de balanceo N°2, estimados mediante la fórmula empírica siguiente

$$W_{t1} = W_{t2} = \frac{Q \|\vec{OC}\|}{r} \quad (2.32)$$

donde Q es la mitad del peso del rotor y r es el radio de compensación en el plano de balanceo. Estos pesos de prueba producen nuevas lecturas de amplitud y fase en los puntos de medición [14, 19, 20].

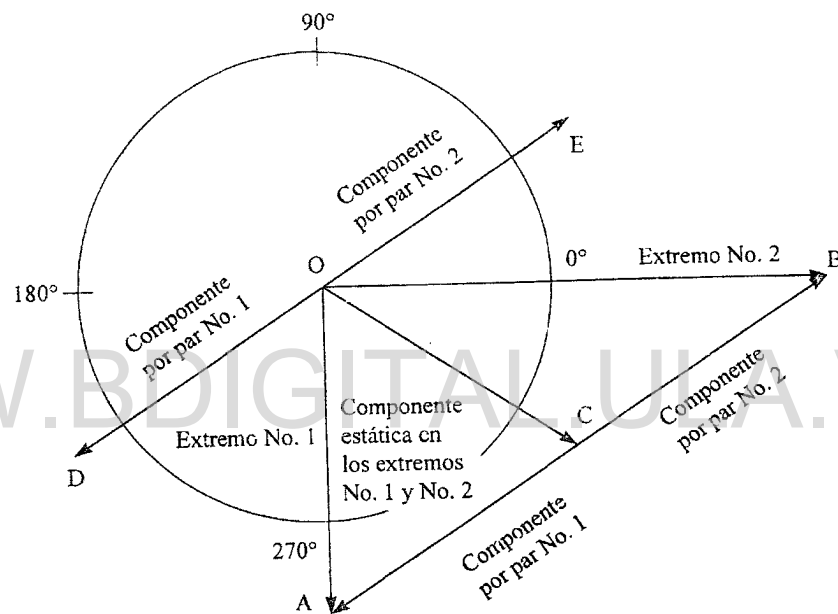


Figura 2.9: Gráfico vectorial de los dos vectores que representan las vibraciones en los extremos del eje. Tomado de [2]

- Se construyen los nuevos vectores usando la misma escala en el papel gráfico polar [11, 19, 20].
- Se conectan los extremos de los nuevos vectores y se encuentra el nuevo punto medio de la línea de conexión. Será interesante notar que la nueva línea de conexión va a ser igual en longitud y paralela a la línea de conexión original si el centro de gravedad del rotor se encuentra en el plano radial perpendicular al eje de rotación equidistante de los planos de balanceo y de los apoyos. Esto indicará que el desbalance por par de fuerzas no ha sido perturbado por el desbalance

estático adicional introducido en el rotor con los pesos de prueba [14, 19, 20].

- Se traza una línea desde el origen hasta el nuevo punto medio de la línea de conexión [14, 19, 20].
- El vector que conecta el extremo del vector **OC** con la nueva vibración resultante debida al desbalance estático de prueba introducido, es el vector que representa el efecto de una de los pesos de prueba sobre la vibración debida a la mitad del desbalance estático del rotor.
- Ahora se procede a corregir el desbalance estático utilizando el método vectorial ya conocido, colocando pesos de corrección iguales en la misma posición radial y angular en los dos planos de balanceo [14, 19, 20].
- Para corregir el desbalance por par de fuerzas se colocan dos pesos de prueba iguales en ambos planos de balanceo al mismo radio pero con 180° de diferencia. Esto producirá nuevas lecturas de amplitud y fase en los puntos de medición. Ahora se construye el nuevo diagrama vectorial y se encuentra el vector de efecto para la componente por par N°1 o N°2. El ángulo formado entre estos dos vectores permitirá aplicar el método vectorial para corregir el desbalance por par de fuerzas colocando dos pesos de corrección iguales en la misma posición radial pero a 180° en los planos de balanceo [14, 19, 20]. Se concluye que después de que los vectores que representan las vibraciones debidas a los desbalances en los extremos del rotor han sido separados en sus componentes modales asociados, estos componentes estático y por par de fuerzas son independientes entre si. Esto constituye el concepto fundamental del así llamado método de un solo tiro, a causa de la rapidez con la cual son obtenidos los resultados [12, 14]

2.3.3. Método de los coeficientes de Influencia

Puesto que normalmente no se cumplen las condiciones de simetría de un rotor ni las de igualdad e isotropía de sus estructuras de soporte, el modelo idealizado falla en representar el comportamiento real del sistema en forma precisa y se requiere un modelo matemático que se ajuste a las verdaderas características de la respuesta.

El balanceo completo de un rotor rígido soportado en los pedestales como se muestra en la figura 2.10(a), en general requiere la adición de dos pesos correctivos, uno en cada uno de dos planos radiales separados axialmente [21].

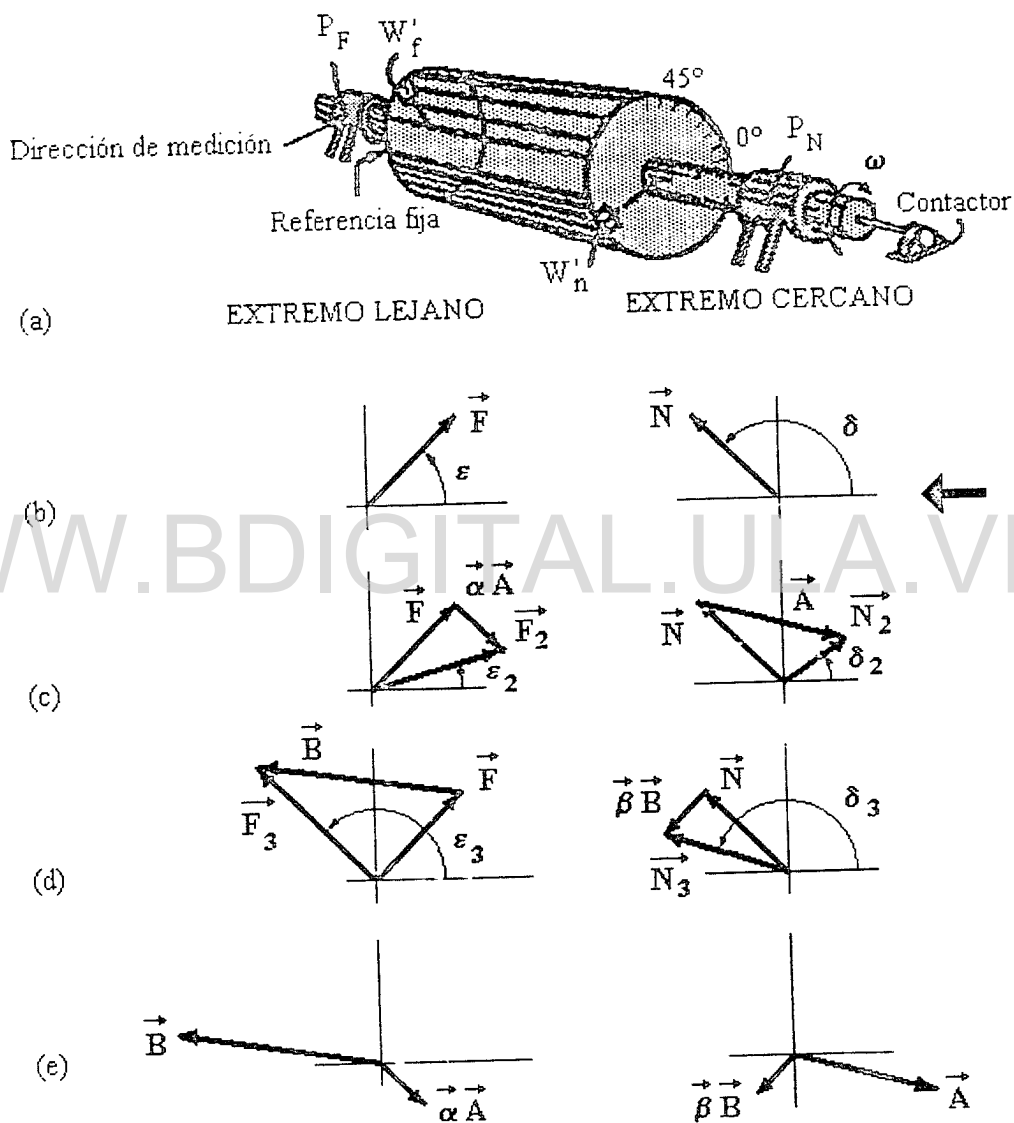


Figura 2.10: Método de los coeficientes de Influencia. Tomado de [4].

Los datos necesarios para determinar las cantidades y posiciones angulares de los dos pesos correctivos son obtenidos en tres ensayos, todos efectuados a la misma velocidad de balanceo escogida, mediante la medición de la amplitud de vibración y del ángulo

de fase en cada uno de dos puntos cualquiera escogidos sobre la máquina bajo cada una de las tres condiciones siguientes [21]:

1. Sin ningún tipo de pesos correctivos en el rotor figura 2.10(b).
2. Con cualquier peso único conocido, de magnitud razonable, colocado en cualquier posición angular en el plano de balanceo del primer extremo del rotor figura 2.10(c).
3. Con cualquier peso único conocido, de magnitud razonable, colocado en cualquier posición angular en el plano de balanceo del segundo extremo del rotor [21] ver figura 2.10(d).

El primero de estos tres ensayos determina los vectores generados por las vibraciones a ser eliminadas, y los últimos dos ensayos determinan la susceptibilidad del rotor a los pesos individuales que son colocados separadamente en cada uno de sus dos planos de balanceo escogidos y que se refleja por las vibraciones resultantes en los dos puntos de medición sobre la máquina [21].

Los planos de balanceo o extremos del rotor, y los puntos de medición han sido distinguidos como el extremo cercano y el extremo lejano, como aparecen a un observador situado en el contador y en frente de la máquina [21]. También, la dirección positiva de medición de los ángulos es tomada en el sentido anti-horario como aparecería a un observador en la posición anterior [21]. En ésta explicación los transductores miden la dirección horizontal perpendicular al eje del rotor en los puntos P_N y P_F , y el ángulo de fase es medido con respecto a la referencia fija; también horizontal, situada en un plano radial e indicada por la flecha; en una dirección contraria a la de giro del rotor W , para la cual se incrementa el ángulo en la escala angular incorporada al rotor. En la práctica, la medición del ángulo de fase se puede realizar con el estroboscopio que reciba una señal sincronizada proveniente del transductor, previamente fijada por el analizador de espectro de frecuencia. También se puede usar un contactor, acoplado directamente a un extremo del eje, rotando sincrónicamente con él [21], o una celda fotoeléctrica en conjunto con una cinta reflectiva adherida al eje para emitir una señal de referencia relativa a la señal del transductor de vibración, a partir de lo cual se

Licencia Creative Commons.

puede leer directamente el ángulo de fase en un instrumento analizador/balanceador apropiado.

Aquí se asume que el sistema vibrante con el cual se está tratando es lineal, o sea que las amplitudes de vibración son proporcionales a las fuerzas que las causan [21]. Este es un estado ideal que usualmente se ajusta aproximadamente a la realidad práctica [21].

- El rotor es puesto en marcha a alguna velocidad de balanceo pre-seleccionada W y las amplitudes de vibración y los ángulos de fase son medidos en los puntos del extremo cercano y del extremo lejano P_N y P_F , respectivamente. Estas mediciones determinan los vectores que generan las vibraciones que deberán ser anuladas: $\vec{N}$ a un ángulo δ y $\vec{F}$ a un ángulo ε , representados en la figura 2.10(b). Esto constituye la primera corrida [21]. En términos de los coeficientes de influencia, las vibraciones en los puntos de medición del extremo cercano P_N y del extremo lejano P_F debido a los desbalances equivalentes situados en los planos de balanceo del extremo cercano n y del extremo lejano f se expresan como [3]:

$$\begin{cases} \vec{N} = \vec{C}_n^N \vec{U}_n + \vec{C}_f^N \vec{U}_f \\ \vec{F} = \vec{C}_n^F \vec{U}_n + \vec{C}_f^F \vec{U}_f \end{cases} \quad (2.33)$$

si r es el radio de compensación en los planos de balanceo y g la aceleración de gravedad, dichos desbalances equivalentes se pueden expresar como los fasores:

$$\vec{U}_n = \frac{\vec{W}_n}{g} r, \vec{W}_n = W_n e^{i\gamma_n}; \vec{U}_f = \frac{\vec{W}_f}{g} r, \vec{W}_f = W_f e^{i\gamma_f} \quad (2.34)$$

Estando definidos los factores de influencia por los siguientes operadores vectoriales:

$$\vec{S}_n^N = \frac{r}{g} \vec{C}_n^N, \vec{S}_f^N = \frac{r}{g} \vec{C}_f^N, \vec{S}_n^F = \frac{r}{g} \vec{C}_n^F, \vec{S}_f^F = \frac{r}{g} \vec{C}_f^F \quad (2.35)$$

las vibraciones de los soportes se expresan en funciones de los pesos desbalanceados como

$$\begin{cases} \vec{N} = \vec{S}_n^N \vec{W}_n + \vec{S}_f^N \vec{W}_f \\ \vec{F} = \vec{S}_n^F \vec{W}_n + \vec{S}_f^F \vec{W}_f \end{cases} \quad (2.36)$$

- A continuación se coloca un peso de prueba W'_n de cantidad razonable en cualquier posición angular a una distancia radial r en el plano de balanceo del extremo

cercano n . La cantidad y posición de este peso son anotadas. Entonces se hace el segundo ensayo, a la misma velocidad que antes, y se repiten las mediciones de las amplitudes de vibración y de los ángulos de fase en los puntos P_N y P_F . Se encuentra que la aplicación del peso de prueba W'_n ha cambiado los vectores generados por las vibraciones en esos dos puntos; al vector $\vec{N}_2$ a un ángulo δ_2 y al vector $\vec{F}_2$ a un ángulo ε_2 como se muestra en la figura 2.10(c) [21]. La expresión vectorial de las vibraciones en los puntos de medición es:

$$\begin{cases} \vec{N}_2 = \vec{S}_n^N (\vec{W}_n + \vec{W}'_n) + \vec{S}_f^N \vec{W}_f \\ \vec{F}_2 = \vec{S}_n^F (\vec{W}_n + \vec{W}'_n) + \vec{S}_f^F \vec{W}_f \end{cases} \quad (2.37)$$

Se observa que el peso de prueba W'_n en el plano de corrección n asociado afecta no solo la vibración en el punto de medición P_N asociado sino que también influye sobre la vibración en extremo opuesto.

Substrayendo miembro a miembro la primera de las ecuaciones 2.36 de la primera de las ecuaciones 2.37 se obtiene:

$$\vec{N}_2 - \vec{N} = \vec{S}_n^N \vec{W}'_n = \vec{A} \quad \therefore \quad \vec{S}_n^N = \vec{A} / \vec{W}'_n \quad (2.38)$$

donde el efecto del peso de prueba W'_n sobre la vibración del pedestal del extremo cercano está representado por el vector $\vec{A}$ trazado desde el extremo del vector $\vec{N}$ hasta el extremo del vector $\vec{N}_2$ como se ilustra en la figura 2.10(c) [21]. La ecuación vectorial se escribe como: $\vec{N} + \vec{A} = \vec{N}_2$ [21].

La substracción de la segunda de las ecuaciones 2.36 de la segunda de las ecuaciones 2.37, y la sustitución del vector $\vec{W}'_n$ despejado de la ecuación 2.38 arroja lo siguiente:

$$\vec{F}_2 - \vec{F} = \vec{S}_n^F \vec{W}'_n = \vec{S}_n^F \left(\vec{A} / \vec{S}_n^N \right) = \left(\vec{S}_n^F / \vec{S}_n^N \right) \vec{A} \quad (2.39)$$

resultado que permite relacionar;

$$\vec{F}_2 - \vec{F} = \vec{S}_n^F \vec{W}'_n = \vec{\alpha} \vec{A} \quad \therefore \quad \vec{S}_n^F = \vec{\alpha} \vec{A} / \vec{W}'_n \quad (2.40)$$

donde $\vec{\alpha}$ es un operador vectorial que al ser aplicado al vector $\vec{A}$ produce un cambio en su magnitud y dirección. El operador vectorial $\vec{\alpha}$ es además una

relación adimensional de los factores de influencia $\vec{S}_n^N$ y $\vec{S}_n^F$, los cuales son constantes características de la máquina y de su montaje [21]. Por ejemplo, el factor de influencia $\vec{S}_n^F$ da la susceptibilidad de la máquina al efecto de un peso de prueba W'_n en el plano de balanceo del extremo cercano n sobre la vibración en el punto de medición P_F en el extremo lejano F del rotor.

Entonces, el efecto de este mismo peso de prueba W'_n sobre la vibración del pedestal del extremo lejano representado por el vector $\vec{\alpha}\vec{A}$ trazado desde el extremo del vector $\vec{F}$ hasta el extremo del vector $\vec{F}_2$ como se muestra en la figura 2.10(c). La ecuación vectorial se expresa como: $\vec{F} + \vec{\alpha}\vec{A} = \vec{F}_2$ [21]. Se ve claramente que los vectores de $\vec{A}$ y $\vec{\alpha}\vec{A}$ representan los efectos del mismo peso W'_n colocado en el plano de balanceo del extremo cercano. Asumiendo un mismo lineal (donde los efectos son proporcionales a las causas), si este peso W'_n es incrementado en cualquier cantidad, los vectores $\vec{A}$ y $\vec{\alpha}\vec{A}$ serán incrementados proporcionalmente. También si la posición de este peso en el rotor es trasladada a través de cualquier ángulo, estos vectores $\vec{A}$ y $\vec{\alpha}\vec{A}$ serán rotados a través del mismo ángulo. Por lo tanto, hay una relación definida de magnitudes entre el vector $\vec{A}$ y el vector $\vec{\alpha}\vec{A}$ y un ángulo fijo entre ellos, independiente del estado de balance del rotor [21].

El operador vectorial $\vec{\alpha}$ representa la relación entre la vibración en el punto de medición del extremo lejano y la vibración de la vibración del extremo cercano debidas a un desbalance de prueba situado en el plano de balanceo del extremo cercano, o relación de interferencia debida a un desbalance en el plano de corrección del extremo cercano, cuyo módulo es una medida del efecto cruzado que ocasionaría un desbalance cualquiera en el plano de corrección del extremo cercano que se puede expresar como un porcentaje (menor o incluso mayor del 100 % en rotores salientes) dado por [19]

$$(\%)|\vec{\alpha}| = \frac{|\vec{\alpha}\vec{A}|}{|\vec{A}|} \times 100 \quad (2.41)$$

- El peso W'_n se remueve y un peso de prueba W'_f de cualquier cantidad razonable es colocado en cualquier posición angular a la misma distancia radial r en el

plano de balanceo del extremo lejano f . La tercera corrida es entonces hecha, a la misma velocidad que antes observando las lecturas de amplitud y ángulo las cuales determinan los vectores $\vec{N}_3$ a un ángulo δ_3 y $\vec{F}_3$ a un ángulo ε_3 generados por las vibraciones en los pedestales del extremo cercano y del extremo lejano, respectivamente. Estos vectores se muestran en la figura 2.10(d) [21]. Las vibraciones en los puntos de medición del extremo cercano y del extremo lejano de la máquina se expresan vectorialmente por:

$$\begin{cases} \vec{N}_3 = \vec{S}_n^N \vec{W}_n + \vec{S}_f^N (\vec{W}_f + \vec{W}_f') \\ \vec{F}_3 = \vec{S}_n^F \vec{W}_n + \vec{S}_f^F (\vec{W}_f + \vec{W}_f') \end{cases} \quad (2.42)$$

Substrayendo las ecuaciones 2.36 de las correspondientes ecuaciones 2.42 se tiene

$$\vec{N}_3 - \vec{N} = \vec{S}_f^N \vec{W}_f' = \vec{\beta} \vec{B} \quad \therefore \quad \vec{S}_f^N = \vec{\beta} \vec{B} / \vec{W}_f' \quad (2.43)$$

$$\vec{F}_3 - \vec{F} = \vec{S}_f^F \vec{W}_f' = \vec{B} \quad \therefore \quad \vec{S}_f^F = \vec{B} / \vec{W}_f' \quad (2.44)$$

Entonces, el vector $\vec{B}$ representa el efecto del peso de prueba W_f' sobre la vibración del pedestal del extremo lejano [21]. La ecuación vectorial es $\vec{F} + \vec{B} = \vec{F}_3$ [21]. Puesto que el efecto en el pedestal del extremo cercano $\vec{\beta} \vec{B}$ es debido al mismo peso W_f' , la ecuación vectorial es escrita como $\vec{N} + \vec{\beta} \vec{B} = \vec{N}_3$ [21], donde $\vec{\beta}$ es un operador vectorial similar al vector $\vec{\alpha}$ [21]. El vector de $\vec{\beta} \vec{B}$ representa el efecto de un peso de prueba W_f' en el plano de balanceo del extremo lejano f sobre la vibración del punto de medición P_N en el pedestal del extremo cercano N . Los vectores $\vec{B}$ y $\vec{\beta} \vec{B}$ se muestran en la figura 2.10(d). Similarmente, el operador vectorial $\vec{B}$ representa la relación entre la vibración en el punto de medición del extremo cercano y la vibración en el punto de medición del extremo lejano debidas a un desbalance de prueba situado en el plano de balanceo del extremo lejano, o relación de interferencia debida a un desbalance de prueba en el plano de corrección del extremo lejano, cuyo módulo es una medida del efecto cruzado que ocasiona un desbalance cualquiera en el plano de corrección del extremo lejano que se puede expresar como un porcentaje (también menor o inclusive mayor del 100 % en rotores salientes) dado por [19]

$$(\%) |\vec{\beta}| = \frac{|\vec{\beta} \vec{B}|}{|\vec{B}|} \times 100 \quad (2.45)$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Los vectores $\vec{A}$, $\vec{\alpha A}$, $\vec{B}$, y $\vec{\beta B}$, redibujados en la figura 2.10(e), dan el efecto de los pesos de prueba en los planos de balanceo sobre las vibraciones en los puntos de medición. Los vectores $\vec{\alpha}$ y $\vec{\beta}$ especifican la susceptibilidad de la máquina a los pesos de balance.

Habiendo determinado, en tres corridas de la máquina, las vibraciones las cuales se desea eliminar y la susceptibilidad de la máquina a los pesos de balance, es necesario calcular los pesos W_n y W_f y sus posiciones angulares para lograr un correcto balance del rotor [21].

Los pesos de prueba W'_n y W'_f y los pesos finales de corrección W_n y W_f requieren una especificación tanto de su magnitud como de su posición angular (o dirección). Los pesos representan cantidades vectoriales y deben ser tratados como tales [21].

Substituyendo los valores de los factores de influencia encontrados de las ecuaciones 2.38, 2.40, 2.43 y 2.44, en las ecuaciones 2.36 multiplicadas por -1, se tiene

$$\begin{cases} -\vec{N} = \left(\vec{A} / \vec{W}'_n \right) (-\vec{W}_n) + \left(\vec{\beta B} / \vec{W}'_f \right) (-\vec{W}_f) \\ -\vec{F} = \left(\vec{\alpha A} / \vec{W}'_n \right) (-\vec{W}_n) + \left(\vec{B} / \vec{W}'_f \right) (-\vec{W}_f) \end{cases} \quad (2.46)$$

Ya que $e^{i\pi} = \cos \pi + i \sin \pi = -1$ del análisis de la ecuación 2.46 se desprende que se obtendrán efectos opuestos que anularán simultáneamente a las vibraciones originales, si se colocan pesos de corrección a 180° de los pesos desbalanceados, es decir con direcciones opuestas a las definidas por la ecuación 2.34, cuya expresión en forma de fasores es:

$$\begin{aligned} -\vec{W}_n &= -W_n e^{i\gamma_n} = W_n e^{i\gamma_n} e^{i\pi} = W_n e^{i(\gamma_n + \pi)} = W_n e^{ia_n} \quad , \quad a_n = \gamma_n + \pi \\ -\vec{W}_f &= -W_f e^{i\gamma_f} = W_f e^{i\gamma_f} e^{i\pi} = W_f e^{i(\gamma_f + \pi)} = W_f e^{ia_f} \quad , \quad a_f = \gamma_f + \pi \end{aligned} \quad (2.47)$$

Cada peso final puede ser derivado a partir de su peso de prueba correspondiente mediante una traslación en ángulo y una multiplicación. Entonces se puede introducir dos nuevos operadores vectoriales $\vec{\theta}$ y $\vec{\phi}$ tales que [21, 22]

$$\begin{cases} -\vec{W}_n = \vec{\theta} \vec{W}'_n \\ -\vec{W}_f = \vec{\phi} \vec{W}'_f \end{cases} \quad (2.48)$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Asumiendo que las amplitudes de vibración son directamente proporcionales a las fuerzas que las causan, cualquier operación vectorial $\vec{\theta}$ sobre un peso de prueba W'_n , por ejemplo, resultará en la misma operación vectorial sobre los vectores de efecto $\vec{A}$ y $\vec{\alpha}\vec{A}$ de este peso de prueba [21].

El planteamiento fundamental para lograr el balanceo del rotor puede ser expuesto como que los operadores vectoriales $\vec{\theta}$ y $\vec{\phi}$ aplicados a los efectos $\vec{A}$, $\vec{\alpha}\vec{A}$, $\vec{B}$ y $\vec{\beta}\vec{B}$, de estos pesos de prueba, producirán nuevos efectos iguales y opuestos a los dos vectores $\vec{N}$ y $\vec{F}$ generados por las vibraciones originales [21].

El objetivo es por lo tanto conseguir los operadores vectoriales $\vec{\theta}$ y $\vec{\phi}$ que aplicados a los pesos de prueba $\vec{W}'_n$ y $\vec{W}'_f$, respectivamente, produzcan los pesos de corrección buscados. Substituyendo los operadores vectoriales definidos por la ecuación 2.48 dentro de las ecuaciones 2.46, se llega a la siguiente formulación matemática [21].

$$\begin{cases} \vec{A}\vec{\theta} + \vec{\beta}\vec{B}\vec{\phi} = -\vec{N} \\ \vec{\alpha}\vec{A}\vec{\theta} + \vec{B}\vec{\phi} = -\vec{F} \end{cases} \quad (2.49)$$

El anterior sistema de ecuaciones puede ser expresado en notación matricial como [23]

$$\begin{bmatrix} \vec{A} & \vec{\beta}\vec{B} \\ \vec{\alpha}\vec{A} & \vec{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\theta} \\ \vec{\phi} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \vec{N} \\ \vec{F} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Cuando la matriz de los coeficientes de influencia es conocida se puede calcular el vector de corrección del desbalance [17]. Aquí es conocida la matriz de vectores de efecto. La interpretación de un vector como un número complejo permite usar el álgebra de los números complejos con el fin de resolver estas ecuaciones para los operadores vectoriales $\vec{\theta}$ y $\vec{\phi}$ [24-26]. Así, de la primera ecuación de 2.49 se despeja

$$\vec{\theta} = \frac{(\vec{N} + \vec{\phi}\vec{\beta}\vec{B})}{\vec{A}} \quad (2.51)$$

substituyendo este valor en la segunda ecuación de 2.49 se tiene

$$\vec{\phi}\vec{B} - \vec{\alpha}(\vec{N} + \vec{\phi}\vec{\beta}\vec{B}) = -\vec{F} \quad (2.52)$$

y desarrollando la expresión anterior se llega a

$$\vec{\phi}\vec{B} - \vec{\alpha}\vec{N} - \vec{\alpha}\vec{\phi}\vec{\beta}\vec{B} = -\vec{F} \quad (2.53)$$

Licencia Creative Commons:

Siendo $\vec{U} = (1, 0) = 1 + 0i = 1e^{i0}$ el fasor unidad, donde $i = \sqrt{-1}$, por factorización

$$\vec{\phi} \vec{B} (\vec{U} - \vec{\alpha} \vec{\beta}) = \vec{\alpha} \vec{N} - \vec{F} \quad (2.54)$$

Despejando se obtiene el operador vectorial complejo [21, 22]

$$\vec{\phi} = \frac{\vec{\alpha} \vec{N} - \vec{F}}{\vec{B} (\vec{U} - \vec{\alpha} \vec{\beta})} \quad (2.55)$$

substituyendo el valor hallado dentro de la ecuación 2.51 se tiene

$$\begin{aligned} \vec{\theta} &= -\vec{A}^{-1} \left[\vec{N} + \frac{(\vec{\alpha} \vec{N} - \vec{F}) \vec{\beta}}{(\vec{U} - \vec{\alpha} \vec{\beta})} \right] \\ &= -\vec{A}^{-1} \left[\frac{\vec{N} - \vec{\alpha} \vec{\beta} \vec{N} + \vec{\alpha} \vec{\beta} \vec{N} - \vec{\beta} \vec{F}}{(\vec{U} - \vec{\alpha} \vec{\beta})} \right] \end{aligned} \quad (2.56)$$

de donde se encuentra el otro operador vectorial complejo [21, 22]

$$\vec{\theta} = \frac{(\vec{\beta} \vec{B} - \vec{N})}{(\vec{U} - \vec{\alpha} \vec{\beta}) \vec{A}} \quad (2.57)$$

Los operadores vectoriales $\vec{\theta}$ y $\vec{\phi}$ determinan mediante las ecuaciones 2.48 los pesos correctivos $-\vec{W}_n$ y $-\vec{W}_f$ a ser aplicados al rotor, y la colocación de estos pesos W_n y W_f en las posiciones angulares indicadas en las ecuaciones 2.47 completa el proceso.

El método descrito anteriormente se implementa para el instrumento virtual de balanceo de ROTOR 5000 en dos planos por su operabilidad vectorial y su procesamiento computacional eficiente. El capítulo 6 muestra profundamente como se diseñó el instrumento virtual con este método. La causa principal para la selección de este método es la facilidad de procesamiento de los datos con la matemática asociada al método.

Capítulo 3

Instrumentación

En el presente capítulo se desarrolla aspectos importantes en cuanto a instrumentación utilizada para el análisis de vibraciones y los instrumentos existentes en la universidad de los Andes para la realización práctica del proyecto.

Durante el desarrollo del proyecto se implementa una aplicación de instrumentación virtual, concepto propuesto por National Instruments para la adquisición de datos en un entorno industrial. Un instrumento virtual es un software que se ejecutará en un ordenador que tendrá alojado unos elementos de hardware concretos, tarjetas de adquisición de datos (analógicos y digitales), tarjetas de interfaz con los buses de instrumentación y unos canales de control también analógicos y digitales. El instrumento virtual permitirá manejar ese hardware mediante una interfaz gráfica de usuario (GIU) que se asemejará al panel de mandos de los aparatos habituales (Osciloscopio, multímetro, etc.) Mediante la representación en pantalla de los elementos gráficos de visualización y control que servirán de interfaz con el usuario, este observará los estados de las entradas seleccionadas en la pantalla e interactuará con las salidas directamente o mediante la ejecución de las rutinas que halla programado. Un instrumento virtual es en este caso la interfaz gráfica que permite comunicar al usuario con el proceso a medir o controlar según sea la aplicación. El software se puede programar en diferentes lenguajes tales como: LabVIEW, LabWindows/CVI, Visual Studio 6.0 y Visual C++, para el caso en particular el software a utilizar es LabVIEW ya que se posee la licencia en el laboratorio de Mecánica adquirida junto con la instrumentación adecuada para la

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

toma de medidas de vibraciones. Durante este capítulo se describen los instrumentos utilizados y sus características. LabVIEW es un programa creado por National Instruments para realizar Instrumentos Virtuales basado en programación Gráfica con el objetivo de disminuir tiempo de desarrollo en programación y por ende menor tiempo en la implementación de una adquisición de datos.

3.1. Sistemas de Adquisición de Datos

El esquema general de una cadena de medida cuya misión es la adquisición de datos se muestra en la figura 3.1:

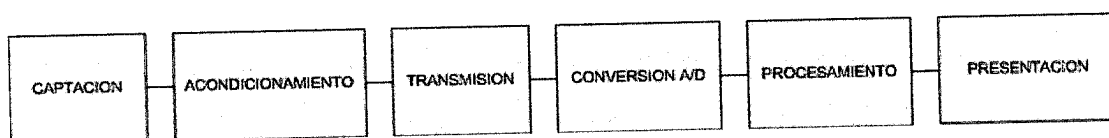


Figura 3.1: Diagrama de Bloques: Esquema general de un sistema de adquisición de datos

Este es un esquema general de adquisición de datos en un proceso industrial sin tener en cuenta cual sea la variable a medir ni como sea el proceso. Para la aplicación del presente proyecto se tiene un proceso compuesto por el ROTOR 5000 mostrado en el capítulo 5 como planta y un sistema de medición de vibraciones para obtener la data necesaria.

Estos sistemas son empleados para controlar, conocer, o supervisar las variables de procesos físicos y está compuesto por 4 etapas como se muestra en la Figura 3.2

1era etapa: se emplean dos transductores, uno de velocidad y otro de aceleración para capturar la información relacionada con la vibración proveniente del sistema rotacional.

2da etapa: Se acopla la señal proveniente de los transductores para que pueda ser procesada por la tarjeta de adquisición de datos.

3era etapa: La señal acoplada entra a la tarjeta de adquisición de datos de forma analógica, para ser procesada y convertida en una señal digital que es enviada via USB al computador.

4ta etapa: La señal digital proveniente de la tarjeta es capturada por el computador para su procesamiento y análisis [27].

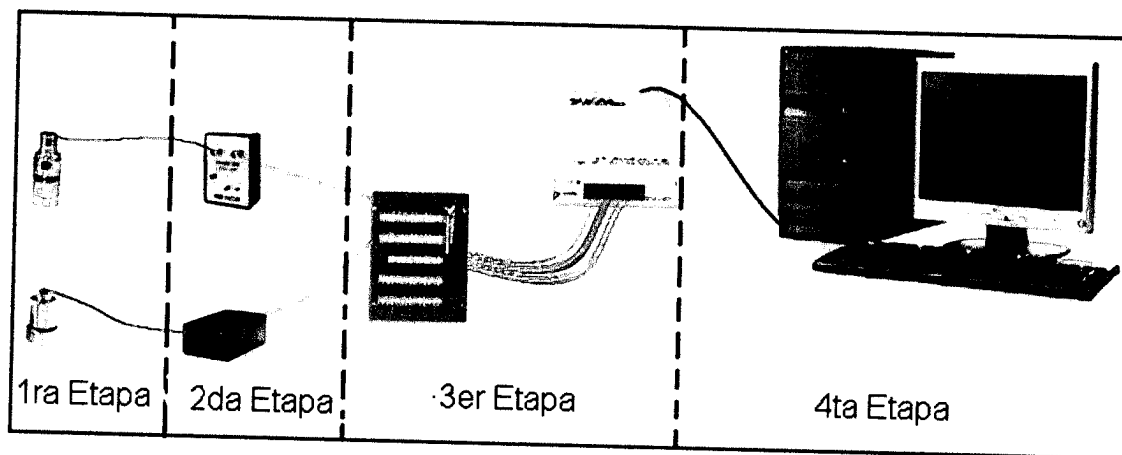


Figura 3.2: Etapas de la adquisición de datos en el laboratorio. Tomado de [27]

3.2. Tarjeta de Adquisición de Datos DAQpad-6020E

Una tarjeta de adquisición de datos es un dispositivo electrónico capaz de tomar señales de sistemas dotados de instrumentación para medición. Ya a un nivel mas avanzado se aplican para controlar los procesos medidos ya que poseen salidas que pueden llevar a cabo una tarea de control. Las tarjetas de adquisición de datos tienen diferentes módulos comúnmente conocidos como puertos los mismos se dividen según la señales que admiten en módulos de entrada-salida digitales y analógicos, particularmente National Instruments el fabricante de la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E divide el modulo análogo en dos módulos según sea entrada o salida. En la figura 3.3 se muestra el diagrama de bloques de la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E donde se puede ver la configuración interna de la misma.

En primera aproximación, se puede dividir las tarjetas de adquisición de datos genéricas en los siguientes bloques básicos:

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- **Entradas analógicas:** Se realiza la conversión a valores discretos de las señales analógicas de entrada.
- **Salidas analógicas:** Se convierten valores discretos en señales analógicas. En la figura 3.3 se observan dos canales de salida analógicos llamados DAC0 y DAC1.
- **Entradas/salidas digitales:** Para la adquisición/generación de señales digitales.
- **Control:** Circuitería encargada de controlar todo el flujo de datos entre los distintos bloques incluyendo la temporización de las conversiones A/D y D/A.
- **Interfaz con el bus:** Se encarga de realizar las tareas de comunicación entre la tarjeta y el bus del ordenador [28].

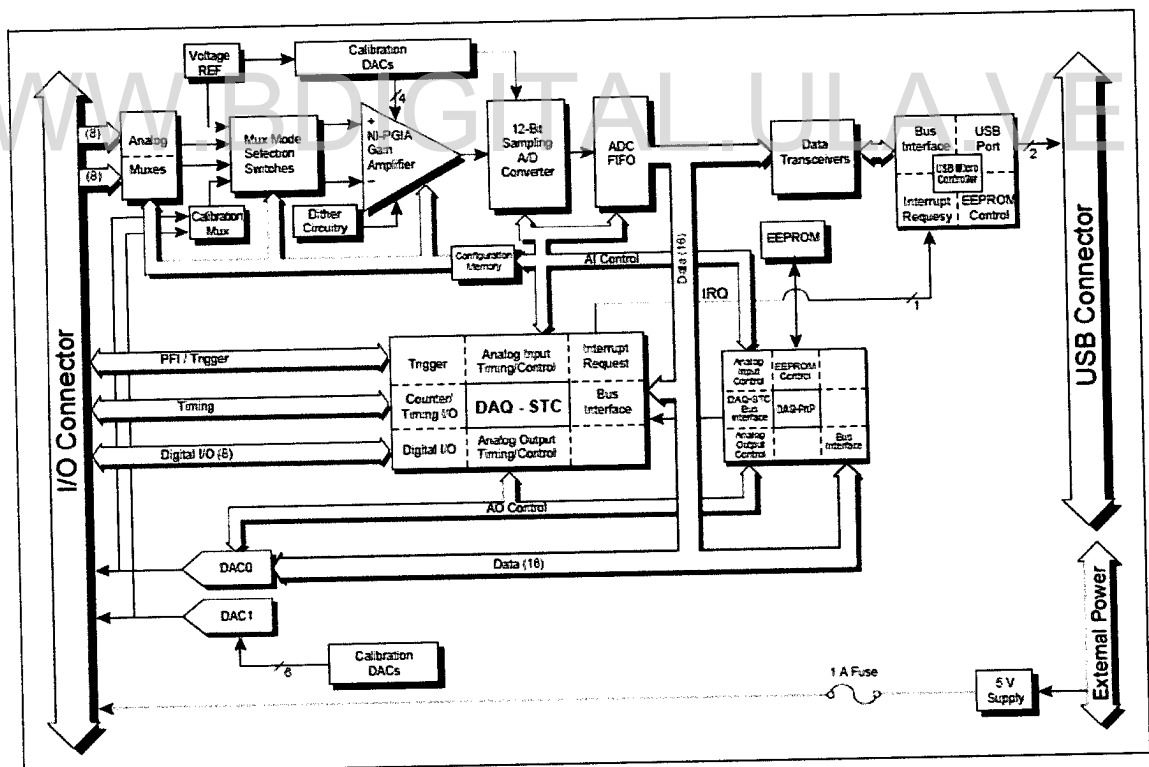


Figura 3.3: Diagrama de bloques de tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E Tomado de [29].

3.2.1. Características de Tarjeta de Adquisición de Datos DAQpad-6020E

La tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E posee los siguientes módulos de entrada salida.

- 16 canales simples de entrada análoga ó 8 entradas análogas de tipo diferencial configurable por software con una resolución de 12 bits y una tasa máxima de muestreo de 100000 muestras por segundo.
- 2 canales de salida análoga con una resolución de 12 bits y una tasa de 20 muestras por segundo.
- un puerto de 8 entradas salidas digitales configurable por software.
- 2 contadores que se pueden configurar como temporizadores de ascenso y descenso de 24 bits.

3.2.2. Entradas Analógicas

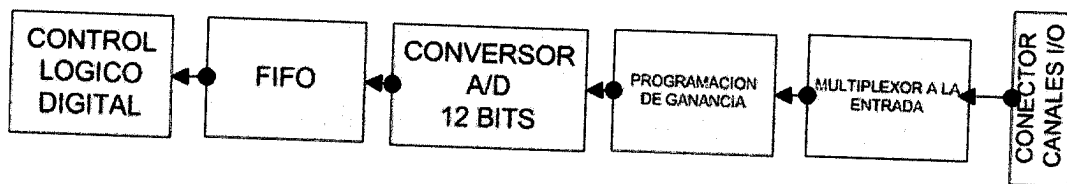


Figura 3.4: Entrada análoga común en una DAQ.

La figura 3.4 muestra la configuración interna de un canal analógico digital en una tarjeta de adquisición de datos, es decir, como hardware interno separado en bloques por módulos los cuales se explican a continuación:

Multiplexor Análogo

Los equipos de instrumentación que constan de varios canales incluyen en su mayoría multiplexores analógicos que permiten abaratar el coste por canal, es decir este multiplexor se encarga de direccionar por separado cada canal hacia el mismo conversor analógico digital con una principal desventaja ya que este tiene un tiempo mínimo para conmutar cada canal y presentarle al canal una señal estable del pin medido reduciendo la frecuencia de muestreo de la tarjeta de adquisición de datos.

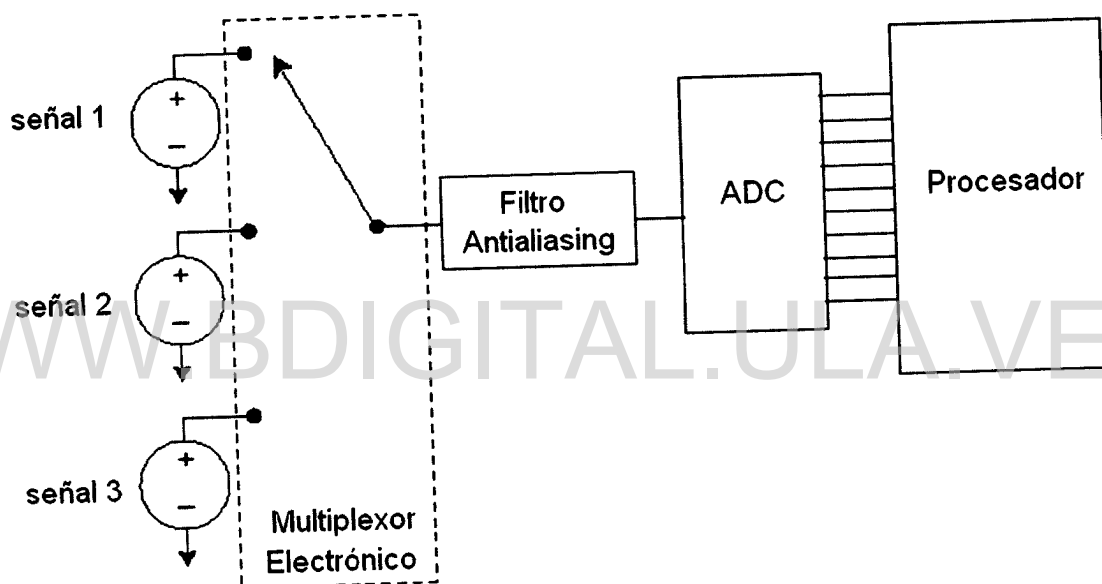


Figura 3.5: Ejemplo de sistema de adquisición de datos con multiplexor analógico.

Programación de Ganancia del canal

El canal A/D posee una ganancia de voltaje configurable según la tabla 3.1 se especifica las ganancias para el amplificador de Instrumentación interno llamado PGIA de la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E.

- Cuando se muestrean varios canales A/D se toma una muestra de un canal e inmediatamente el multiplexor se encarga de conmutar la entrada del conversor para capturar la señal del siguiente canal.

Tabla 3.1: *Ganancias de PGIA configurable por Software.*

Rango de Configuración	Ganancia	Rango actual de entrada	Resolución
0 a +10V	1.0	0 a +10V	2.44mV
	2.0	0 a +5V	1.22mV
	5.0	0 a +2V	488.28 μ V
	0.0	0 a +1V	244.14 μ V
	0.0	0 a +500mV	122.07 μ V
	50.0	0 a +200mV	48.83 μ V
	100.0	0 a +100mV	24.41 μ V
-5 a +5V	0.5	-10 a +10V	4.88mV
	1.0	-5 a +5V	2.44mV
	2.0	-2.5 a +2.5V	1.22mV
	5.0	-1 a +1V	488.28 μ V
	10.0	-500 a +500mV	244.14 μ V
	20.0	-250 a +200mV	122.07 μ V
	50.0	-100 a +100mV	48.83 μ V
	100.0	-50 a +50mV	24.41 μ V

- La velocidad de muestreo hay que dividirla entre el número de canales multiplexados, es decir, Si se quiere muestrear los 8 canales, la máxima frecuencia por canal será de 12,5 KHz para una tarjeta de adquisición que tiene 100Khz como máxima frecuencia de muestreo, caso tal de la DAQpad-6020E.

Conversor Analógico Digital

La conversión analógica digital implica la conversión de señales analógicas a palabras binarias. Para la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E la resolución del conversor es de 12 Bits, por ende, si se muestrea con un rango de 0 a +10V el mínimo valor que se puede leer es 2.44mV como se muestra en la tabla 3.1. Éste es el bloque mas importante para realizar el proceso de adquisición de datos ya que la mayoría de las señales proporcionadas por los sensores y transductores de vibración son de tipo analógico y este dispositivo lo convierte a un valor manipulable por un computador

con su contenido binario.

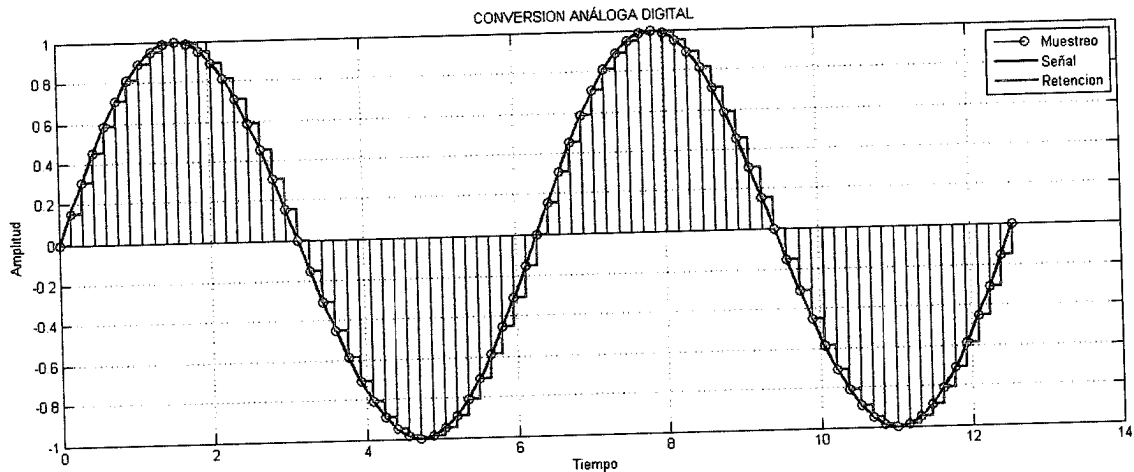


Figura 3.6: Ejemplo conversión analógica a digital.

En la figura 3.6 se muestra el proceso paso a paso de la lectura de un canal analógico digital donde la señal de color azul muestra el tiempo en que se inicia la adquisición del valor leído en el puerto de entrada, la señal de color rojo muestra una retención de dicho valor con el objetivo de estabilizar este valor para que la medida sea eficaz y la señal de color negro es la señal presente en el puerto de entrada analógico.

FIFO

Los FIFOs se usan comúnmente en circuitos de electrónica para almacenamiento y control de flujo de datos. Consiste básicamente en un conjunto de punteros de lectura/escritura, almacenamiento y lógica de control. Éste puede ser SRAM, flip-flops, latches o cualquier otra forma adecuada de almacenamiento. En los FIFOs de un tamaño importante se usa una SRAM de doble puerto, donde uno de los puertos se usa para la escritura y el otro para la lectura. Un FIFO sincrónico maneja el mismo reloj (clock) tanto para las lecturas como para las escrituras. Un FIFO asincrónico es aquel que utiliza diferentes relojes (clocks) uno para lectura y otro para la escritura. Una implementación común de un FIFO asincrónico usa un Código Gray (o cualquier código con unidad cuantitativa) para los punteros de lectura y escritura de modo de asegurarse una generación de banderas (flags) segura/estable.

Resolución

Cuando la entrada varía continuamente en todo el intervalo, las señales de salida de algunos sensores pueden cambiar en pequeños escalones. Un ejemplo es el potenciómetro con devanado de alambre: la salida aumenta escalonada conforme el cursor del potenciómetro pasa de una vuelta del devanado a otra. Es el cambio mínimo del valor de entrada capaz de producir un cambio detectable en la salida. Por ejemplo, la resolución de un potenciómetro con devanado de alambre podría ser 0.5° , o quizás un porcentaje de la desviación de escala total [30].

Se refiere al incremento mínimo de tensión detectable, que coincidirá con el valor del bit menos significativo (LSB). Sin embargo, en tarjetas de adquisición de datos la resolución suele expresarse como el número de bits del conversor A/D. Para el caso particular de la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E que tiene una resolución de 12 bits del conversor A/D indica que es capaz de representar 4096 combinaciones binarias, es decir, 1 parte entre 4096. La ecuación 3.1 indica como se halla el valor de la resolución según el rango de voltaje seleccionado para trabajar con ella:

$$resolucion = \frac{V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}}}{4096} \quad (3.1)$$

Rango

Como puede verse en la tabla 3.1, el rango de entrada viene determinado por la ganancia seleccionada para el amplificador PGIA. La resolución máxima coincide con el valor de $1/2$ LSB, pero no siempre es así debido a tensiones de offset, ruido, derivas térmicas, etc. El producto Ganancia * Rango de entrada es constante: Rango configurado = Ganancia * Rango de entrada. El rango de entrada es el rango de trabajo para adquirir la señal en el canal análogo digital y rango permitido para adquirir la señal del sensor.

Conector

En la figura 3.7 se observa el conector de la tarjeta de adquisición de datos con todos sus periféricos de entrada salida para las diferentes conexiones posibles en la

DAQ-pad6020E. Si se desea profundizar en el mismo ver [29]. cada uno de los pines de este conector tienen una función de entrada salida diferente según como se configure la tarjeta de adquisición. En el capítulo 5 se describen los pines utilizados para la tarea de adquisición de datos de vibración y su configuración para enlazar los canales.

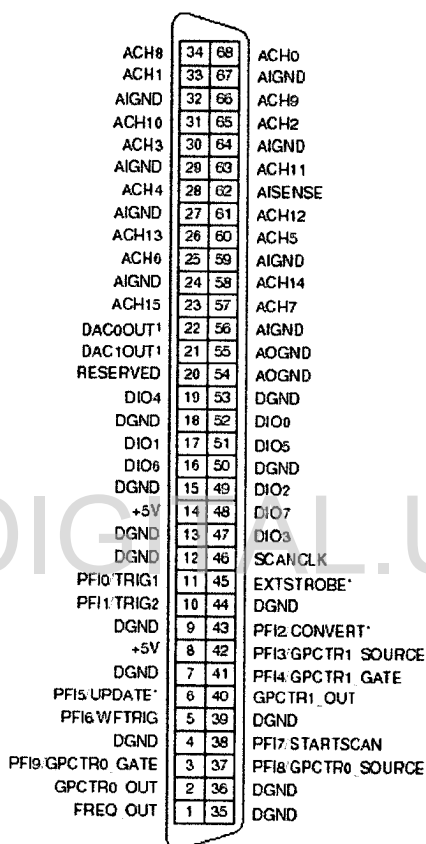


Figura 3.7: Conector Tarjeta de Adquisición de datos NI-6020E.

3.2.3. Velocidad de Muestreo

Una característica muy importante a la hora de adquirir datos por un canal analógico es la velocidad o tasa de muestreo, ya que se debe seleccionar una velocidad adecuada para garantizar la lectura correcta de la señal tomada por el canal. Para la selección de la tasa de muestreo existe un teorema muy importante planteado por Harry Nyquist en 1928 presentado a continuación:

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Teorema de Nyquist

Establece que para poder reconstruir una señal muestreada, la velocidad de muestreo f_s debe ser al menos el doble de la mayor de las componentes de la señal muestreada:

$$f_s \geq 2 * f_{max} \quad (3.2)$$

En la práctica se toma al menos entre 3 y 5 veces mayor que la frecuencia máxima. Esto evita que las frecuencias superiores cercanas a la máxima produzcan el fenómeno de aliasing que se explicará en la sección 3.2.3.

El teorema demuestra que la reconstrucción exacta de una señal periódica continua en banda base a partir de sus muestras, es matemáticamente posible si la señal está limitada en banda y la tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda. Dicho de otro modo, la información completa de la señal analógica original que cumple el criterio anterior está descrita por la serie total de muestras que resultaron del proceso de muestreo. No hay nada, por tanto, de la evolución de la señal entre muestras que no esté perfectamente definido por la serie total de muestras.

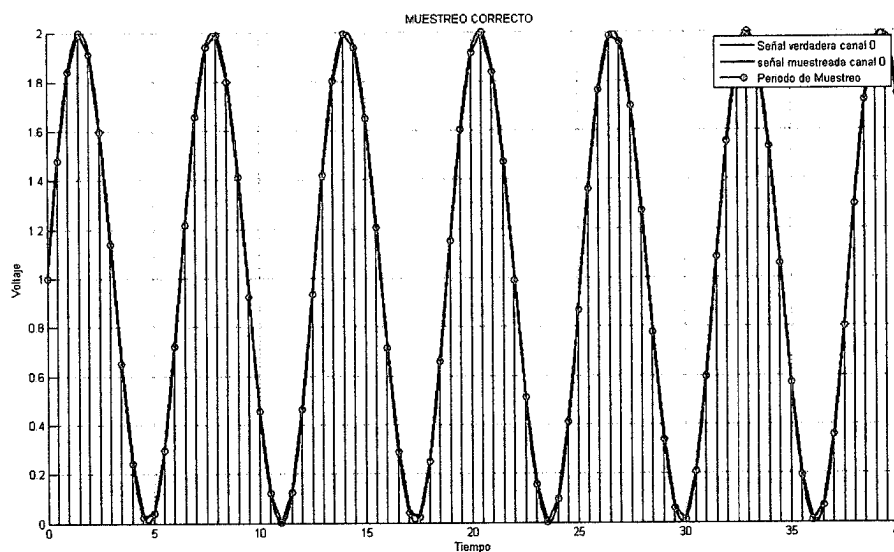


Figura 3.8: Señal muestreada a frecuencia superior a la de Nyquist.

En la figura 3.8 se observa una señal muestreada a una frecuencia superior a la frecuencia de Nyquist. La señal de color Negro es la señal verdadera presente en el

conector y la señal de color azul es la señal leída por el canal. Al reconstruir la señal se observa que son muy parecidas en cuanto a amplitud y frecuencia por lo tanto se asume que esta frecuencia es correcta para adquirir la señal por el canal. Las líneas de color rojo muestran los intervalos de tiempo para la toma de medida del canal análogo o periodo de muestreo.

Aliasing (solapamiento) Respuesta en el Tiempo

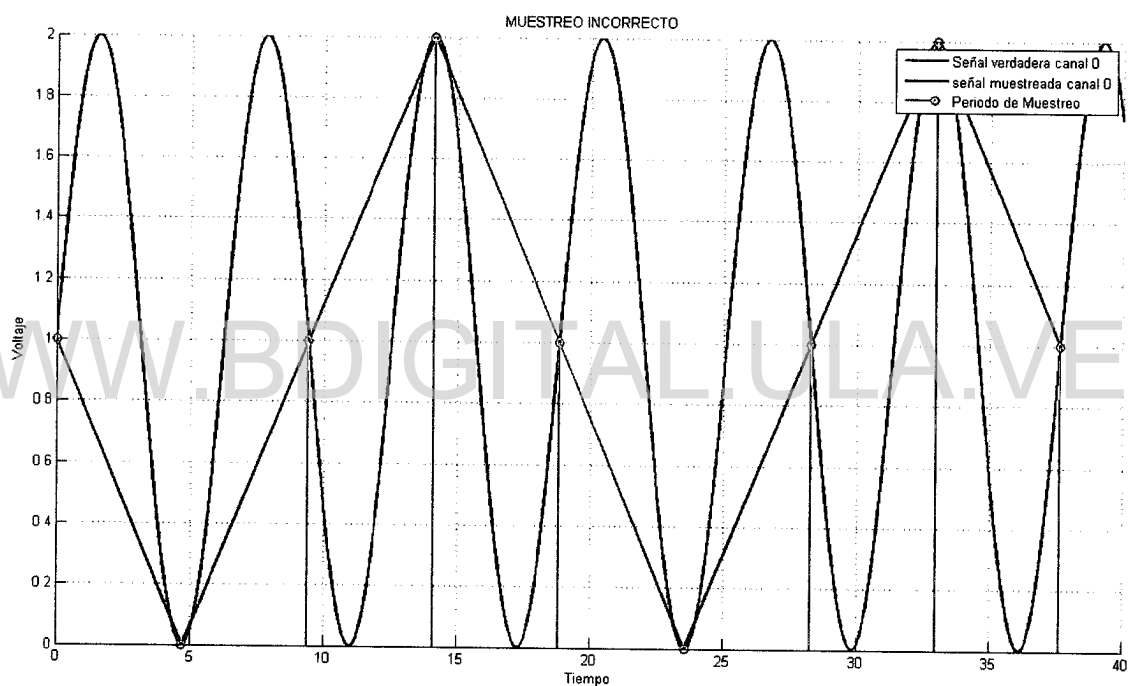


Figura 3.9: Señal muestreada a frecuencia inferior a la de Nyquist, aparece el aliasing: Al reconstruir la señal se obtiene otra frecuencia inferior.

El fenómeno de alias o aliasing se presenta cuando no se cumple la tasa mínima de muestreo descrita por el teorema de Nyquist obteniendo una señal falsa en el canal medido a intervalos muy grandes. Si se reconstruye la señal se tiene una señal muy diferente en tiempo a la original. En la figura 3.9 se muestra una señal muestreada con una frecuencia inferior a la frecuencia de Nyquist, por lo tanto se obtiene una señal falsa o diferente a la que esta presente en el conector. La línea negra es la señal verdadera o la presente en el exterior del instrumento de medida y la señal de color azul es la

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

señal que está viendo el canal análogo digital del instrumento. Allí se observa una clara falla de adquisición del dato por una mala selección de la frecuencia de muestreo. La línea roja representa el periodo de muestreo en conjunto con los símbolos circulares del mismo color, debido al periodo de muestreo esta señal se construye con errores muy elevados por aliasing.

Respuesta en Frecuencia

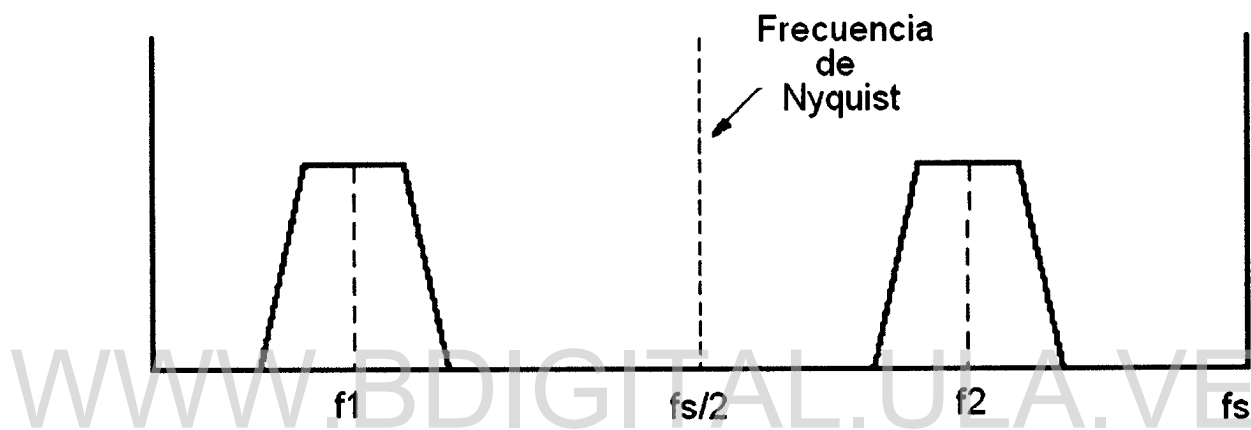


Figura 3.10: Señal muestreada a frecuencia superior a la de Nyquist. sin solapamiento

La figura 3.10 muestra un comportamiento normal en cuanto a la señal muestreada con la frecuencia superior a la de Nyquist. Una visualización correcta en un diagrama frecuencial indicará rápidamente errores de muestreo ya que se deben observar espectros que se solapan, y si no se observan, se dice que la data se está adquiriendo a una buena tasa de muestreo.

Cuando una señal de frecuencia f_x se muestrea a una velocidad f_s , su espectro aparece reflejado en $f_x - f_s/2$ como puede apreciarse en la figura 3.11. En este caso, al muestrear la señal f_1 , el espectro reflejado $f_1 - f_s/2$ queda a la izquierda del origen de frecuencias, por lo que no hay problema. Sin embargo al muestrear la señal f_2 su espectro reflejado $f_2 - f_s/2$, se solapa con f_1 confundiendo con él. De esta forma, la señal f_2 interfiere con la señal útil f_1 .

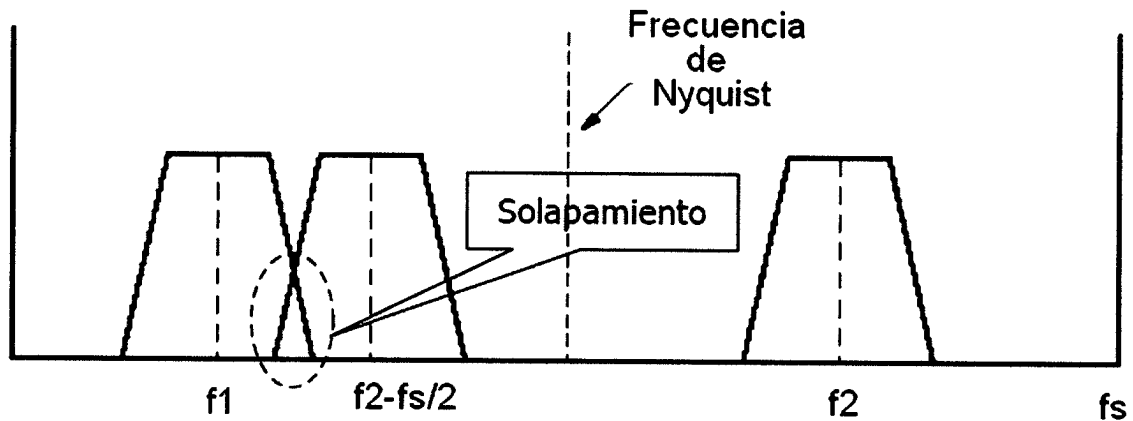


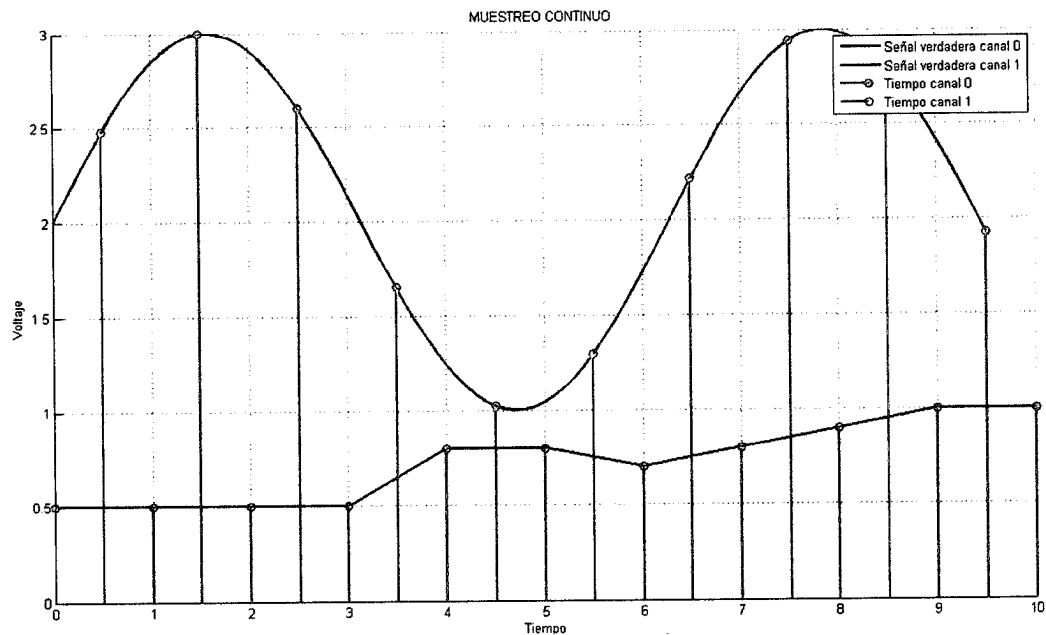
Figura 3.11: Señal muestreada a frecuencia inferior a la de Nyquist, se solapan ambos espectros.

3.2.4. Métodos de muestreo de varios canales

Muestreo Continuo

Las muestras se toman a intervalos regulares sin tener en cuenta la separación de canales es decir la frecuencia de muestreo se divide entre los canales de entrada en la figura 3.12 se muestra la manera en la que se adquieren dos señales con muestreo continuo la señal de color negro es la señal presente en el canal 0 y la señal de color azul la del canal 1 los intervalos observados de color rojo corresponde al periodo de muestreo para el canal 0 y la señal de color verde es el periodo de muestreo para la señal del canal 1, allí se puede observar que el conversor análogo digital se comparte para los dos canales en periodos iguales a este tipo de muestreo se le conoce como continuo.

Inconvenientes: Cuando se necesita analizar la relación de fase entre señales se debe realizar un muestreo simultaneo de ellas. En este caso la multiplexación impediría dicho análisis. para el desarrollo de la tesis sería uno de los inconvenientes de tipo práctico. En la sección 3.2.4 se muestra la mejor opción para adquirir la data de vibración y fase.

Figura 3.12: *Muestreo Continuo*

Muestreo Simultáneo

Las muestras se toman simultáneamente, ya que cada canal tiene su propia circuitería (n° de conversores A/D = n° de canales). Se tiene un aumento de costo. Es necesario cuando se pretende analizar la relación de fase de las señales AC en el dominio temporal. Este muestreo es el mas conveniente para medir la fase de vibración ya que todos los métodos de balanceo de rotores requieren esta medida para realizar la corrección de manera correcta. Lamentablemente la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E no tiene este tipo de adquisición ya que tiene un solo conversor análogo digital, por tal razón se debe realizar la toma de la data con una frecuencia un poco alta para evitar errores de adquisición de la medida de fase, se realiza de esta forma debido a que la frecuencia de la velocidad del rotor no llega a 100 Hz de cualquier otra manera no se podría realizar análisis de fase con este dispositivo. En la figura 3.13 se puede observar como se muestrea simultáneamente los canales análogos digitales, la línea roja y verde se solapan indicando que la muestra se toma al mismo tiempo.

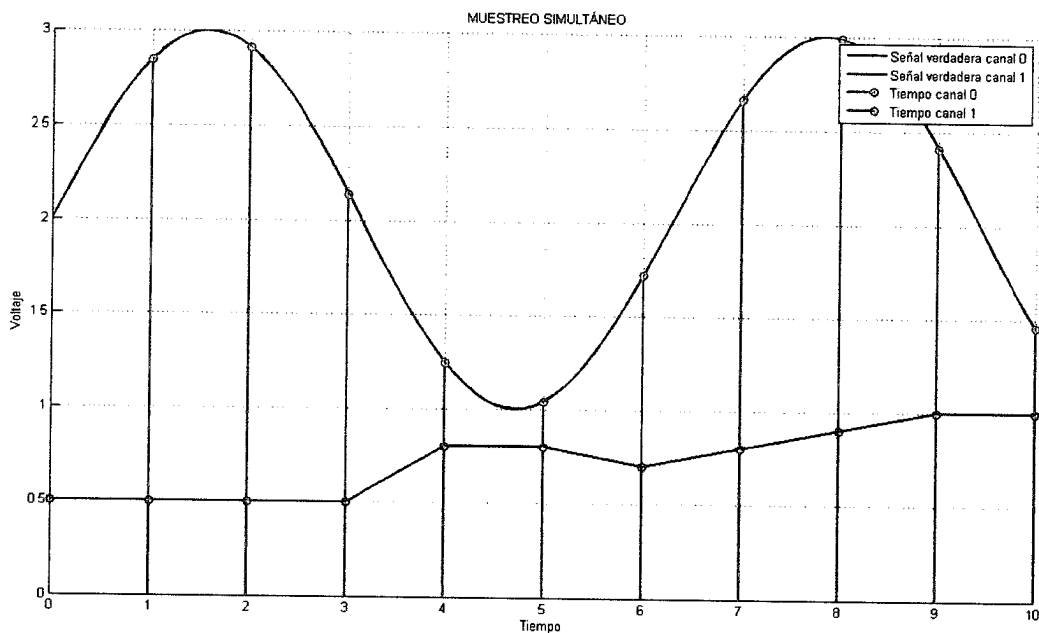


Figura 3.13: Muestreo Simultáneo

Muestreo A Intervalos

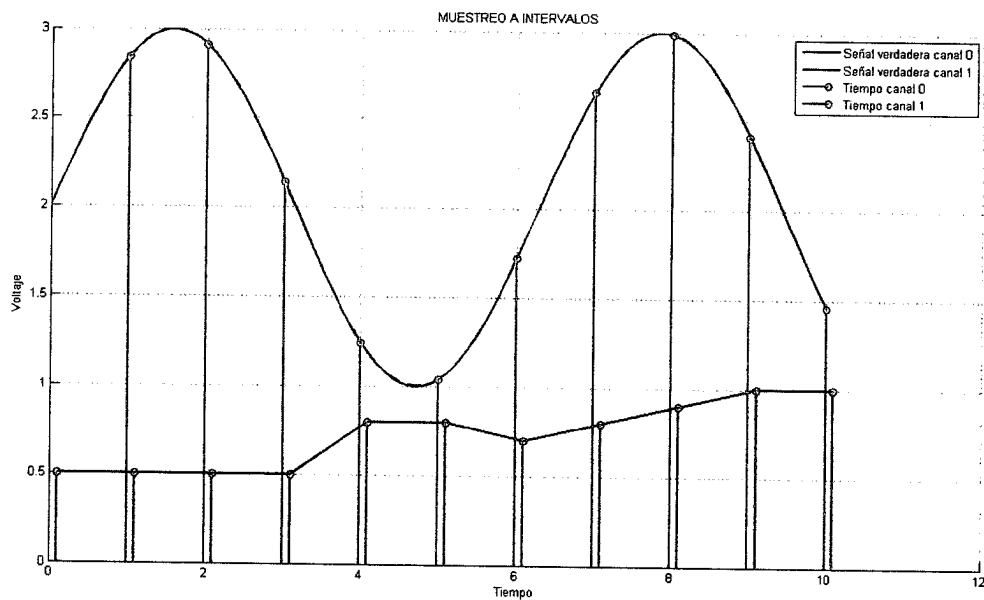


Figura 3.14: Muestreo a Intervalos

A intervalos regulares se muestrean rápidamente con diferencias de microsegundos todos los canales. Se obtienen las ventajas del muestreo simultaneo manteniendo los costes del muestreo continuo. Válido para señales de baja frecuencia como las medidas de temperatura o presión en el caso particular del ROTOR 5000 la frecuencia a tomar es menor a 100Hz por lo tanto se puede muestrear de esta manera. La figura 3.14 muestra la diferencia entre el tiempo de muestreo de la señal del canal 0 y el canal 1 con la líneas roja y verde.

3.3. Software

En la figura 3.15 se observa los niveles de comunicación entre el instrumento virtual con el entorno a medir. Básicamente, el software se encargará de comunicar la interfaz de usuario de la computadora con el hardware de adquisición de datos dotando a la aplicación la funcionalidad requerida. Se puede realizar una separación de las capas o partes del software: Programa de aplicación, controladores de dispositivo (drivers) y librerías de aplicación (API's). Para la aplicación requerida en el desarrollo de la tesis se tiene el software LabVIEW presente en la primera capa y los drivers son los de la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E en la capa inferior esta se ubica con los plug-ins de las tarjetas. El programa de aplicación, también llamado instrumento virtual, consta de dos partes: interfaz de usuario y funcionalidad de la aplicación:

Interfaz de Usuario

Básicamente la interfaz de usuario se caracteriza por:

- Permite la interacción de la aplicación con el usuario.
- Básicamente consta de controles e indicadores para visualización e introducción de datos.
- La mayoría de entornos de programación disponen de librerías de controles e indicadores creados que evitan una gran cantidad de trabajo al usuario.

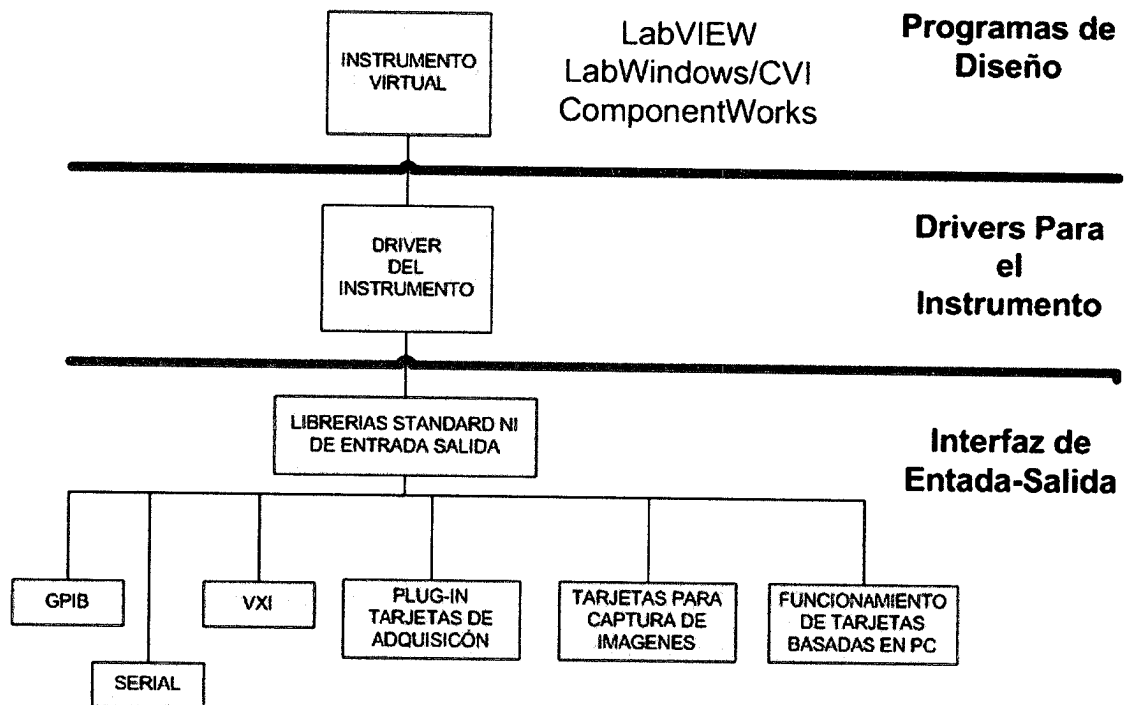


Figura 3.15: Capas de enlaces de software y hardware de Instrumentación Virtual

Funcionalidad de la aplicación

- Una de las funciones básicas será la de obtener datos del hardware de forma transparente al usuario.
- La funcionalidad del programa incluye tratamiento de señal, control del flujo de programa, control de errores y demás acciones de compilación del mismo.
- Puede implementarse en lenguajes basados en texto (Visual Basic, C++, LabWindows/CVI, etc.) o puede utilizar lenguaje gráfico como LabVIEW, Snap Master, DasyLab, HP-VEE, Visual Designer de Burr Brown y demás.

3.4. Transductores e Instrumentación Adicional

En las secciones 3.2.1, 3.2.2, 3.2.4, 3.2.3 y 3.3 se muestra la tarjeta de adquisición de datos y el software utilizado para la programación de la tarea de adquisición. A continuación se observa la etapa de sensores y acondicionamiento de señal para que la

medida tomada sea la mas óptima posible. En la figura 3.16 se muestran los diferentes transductores, fuentes y conector de la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E.

3.4.1. Transductor Piezoeléctrico

Los elementos piezoeléctricos son materiales cristalinos, que al deformarse físicamente por acción de una presión, generan una señal eléctrica. Dos materiales típicos en los transductores piezoeléctricos son el cuarzo y el titanato de bario, capaces de soportar temperaturas del orden de 150° C en servicio continuo y de 230° C en servicio intermitente. Son elementos ligeros, de pequeño tamaño y de construcción robusta. Su señal de respuesta a una variación es lineal y son adecuados para medidas dinámicas, al ser capaces de proporcionar respuestas frecuenciales de hasta un millón de ciclos por segundo. Tienen la desventaja de ser sensibles a los cambios de temperatura y de experimentar deriva en el cero y precisar ajuste de impedancias en caso de fuerte choque. Asimismo su señal de salida es relativamente débil por lo que precisan de amplificadores y acondicionadores de señal que pueden introducir errores en la medición. En la figura 3.17 se puede observar la disposición de un cristal piezoeléctrico [31].

3.4.2. Transductor de Velocidad

Es un dispositivo capaz de medir la velocidad de un cuerpo. En el caso del transductor piezoeléctrico están formados por una bobina de alambre y de un imán, colocados de tal manera que si se mueve el carter, el imán tiende a permanecer inmóvil debido a su inercia. El movimiento relativo entre el campo magnético y la bobina induce una corriente proporcional a la velocidad del movimiento. De esta forma, la unidad produce una señal directamente proporcional a la velocidad de la vibración. En este trabajo se empleará un velocímetro modelo 793V marca Wilcoxon que posee las siguientes características:

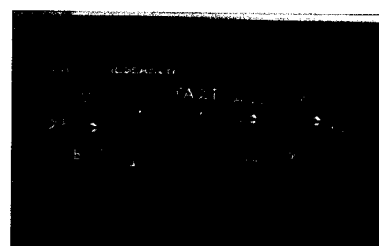
- Sensibilidad $\pm 10\%$ a 25C de 100 mV/in/sec.
- Rango de velocidad: 50 in/sec peak.
- Frecuencia de resonancia: 15 kHz.



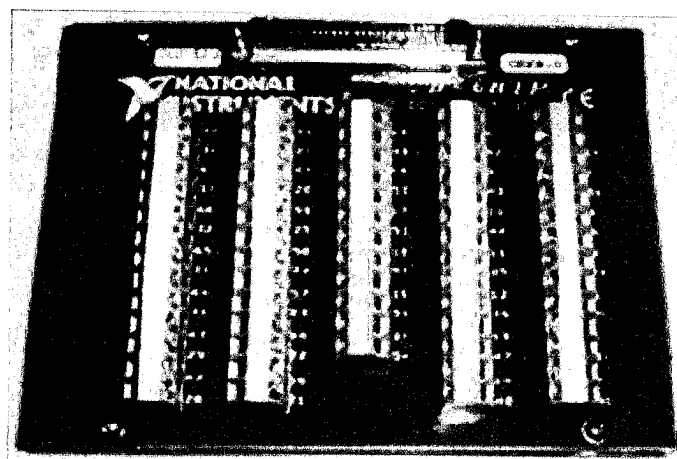
(a) Velocímetro

(b) Acelerómetro
736T

(c) Fuente 704B



(d) Fuente 702B



(e) Conector GPT-150A-2

Figura 3.16: Transductores y fuentes que deben conectarse al sistema de adquisición de datos.

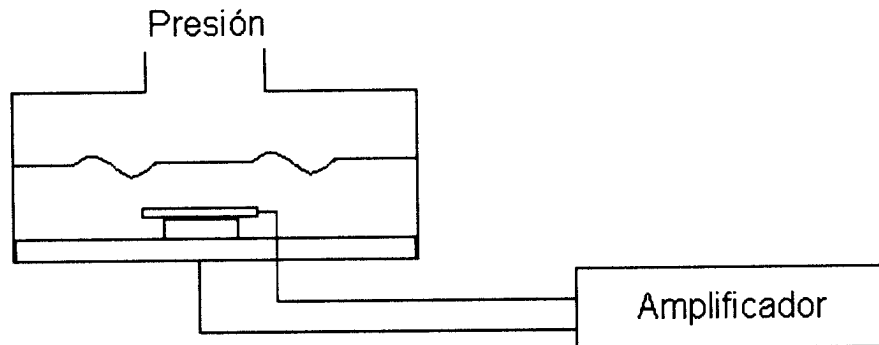


Figura 3.17: Transductor piezoeléctrico

- Frecuencia de respuesta $\pm 10\%$: 3-3500 Hz. ± 3 dB 2,5-7000 Hz.
- Respuesta Temperatura. -50°C : -5% . $+80^{\circ}\text{C}$: $+3\%$. $+120^{\circ}\text{C}$: -5% .
- Requerimientos de alimentación: 18 a 30 Vdc.
- Peso: 145 gramos.
- Material de construcción: Acero Inoxidable 316L
- Cable recomendado: J9T2A.
- Rango de temperatura: -50 a 120°C .
- Vibración limite: 250 g pico.
- Impacto limite: 2,500 g pico.

3.4.3. Transductor de Aceleración

El acelerómetro de tipo de compresión como se muestra en la figura 3.18 fue el primer tipo a ser desarrollado. Por lo general se prefiere el acelerómetro del tipo de cizallamiento, configurado de tal manera que el elemento activo esta sujeto a fuerzas de cizallamiento. También hay otros tipos de diseños para acelerómetros. Se puede considerar al acelerómetro piezoeléctrico como el transductor estándar para medición de vibración en máquinas. Se produce en varias configuraciones, pero la ilustración del tipo

a compresión sirve para describir el principio de la operación. La masa sísmica está sujeta a la base con un perno axial, que se apoya en un resorte circular. El elemento piezoeléctrico está ajustado entre la base y la masa. Cuando una materia está sujeta a una fuerza, se genera una carga eléctrica entre sus superficies. Hay muchas materias de este tipo. Cuarzo se usa más. También hay materiales piezoeléctricos sintéticos que funcionan bien y en algunos casos son capaces de funcionar a temperaturas más altas que el cuarzo lo puede hacer. Si se incrementa la temperatura de un material piezoeléctrico, se va llegar al llamado “punto curie” o “temperatura curie” y se pierde la propiedad piezoeléctrica. Una vez que esto pasa, el transductor está defectuoso y no se puede reparar. Cuando se mueve el acelerómetro en la dirección arriba abajo, la fuerza que se requiere para mover la masa sísmica esta soportada por el elemento activo. Según la segunda ley de Newton, esa fuerza es proporcional a la aceleración de la masa. La fuerza sobre el cristal produce la señal de salida, que por consecuente es proporcional a la aceleración del transductor.

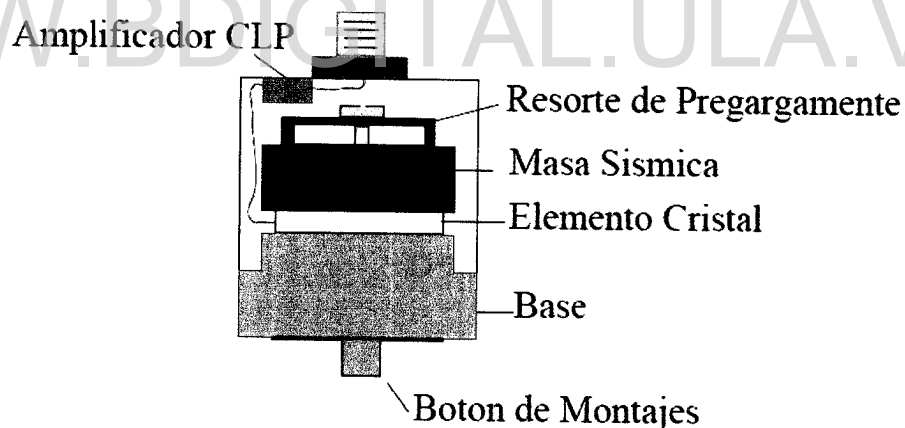


Figura 3.18: *Acelerómetro Piezoeléctrico.*

Los acelerómetros son lineales en el sentido de la amplitud, lo que quiere decir que tienen un rango dinámico muy largo. Los niveles más bajos de aceleración que puede detectar son determinados únicamente por el ruido electrónico del sistema, y el límite de los niveles más altos es la destrucción del mismo elemento piezoeléctrico. Este rango de niveles de aceleración puede abarcar un rango de amplitudes de alrededor de 10 , lo que es igual a 160 dB. Ningún otro transductor puede igualar esto. El acelerómetro

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

piezoeléctrico está muy estable sobre largos periodos. Mantendrá su calibración si no se le maltrata. Las dos maneras de que se puede dañar un acelerómetro son la exposición a un calor excesivo y la caída en una superficie dura. Si se cae de una altura de mas de un par de pies, en un piso de concreto, o en una cubierta de acero, se debe volver a calibrar el acelerómetro para asegurarse que el cristal no se cuarteó. Una pequeña cuarteadura causará una reducción en la sensibilidad y también afectará de manera importante a la resonancia y a la respuesta de frecuencia. Es una buena idea calibrar los acelerómetros una vez al año, si están en servicio con colectores de datos portátiles. [8]. El acelerómetro utilizado para el desarrollo del proyecto se visualiza en la figura 3.16(b) con serie 736T marca Wilcoxon Research con las siguientes características:

- Sensibilidad $\pm 5\%$ a 25°C de 100 mV/g .
- Rango de velocidad: 50 g peak .
- Frecuencia de respuesta $\pm 5\%$: $1\text{-}15000\text{ Hz}$. $\pm 3\text{ dB}$ $2\text{-}25000\text{ Hz}$.
- Frecuencia de resonancia: 60 kHz .
- Respuesta Temperatura. -50°C : -10% . $+120^{\circ}\text{C}$: -5% .
- Requerimientos de alimentación: $18\text{ a }30\text{ Vdc}$.
- Peso: 13 gramos .
- Material de construcción: Acero Inoxidable 316L
- Cable recomendado: J93.
- Rango de temperatura: $-50\text{ a }120^{\circ}\text{C}$.
- Vibración limite: 500 g pico .
- Impacto limite: 5000 g pico .

Parte II

Diseño de tacómetro, Instalación de equipos y programación del Instrumento Virtual.

Capítulo 4

Diseño e implementación de tacómetro

La medición de velocidad en la industria se efectúa de dos formas: con tacómetros mecánicos y tacómetros eléctricos. Los primeros detectan el número de vueltas del eje de la máquina por medios exclusivamente mecánicos pudiendo incorporar o no la medición conjunta del tiempo para determinar el número de revoluciones por minuto (r.p.m.), mientras que los segundos captan la velocidad por sistemas eléctricos. Para usos industriales se suelen utilizar tacómetros eléctricos porque permiten la transformación directa de la señal para alimentar los instrumentos registradores o controladores de panel. Un caso de aplicación típica lo constituye la medición de la velocidad de giro del eje de una turbina en una central de energía, ver [31].

4.0.1. Tacómetro de frecuencia o frecuencímetro

Mide la frecuencia de la señal de corriente alterna captada por transductores de tipo electromagnético, capacitivo u óptico que dan impulsos cuyo número es proporcional a la velocidad de giro de la máquina. El transductor no tiene contacto mecánico con el eje rotativo. La medida de frecuencia puede pasarse a un contador electrónico basado en la medida de las revoluciones por unidad de tiempo. Otro tacómetro de frecuencia mide ópticamente la velocidad. Dispone de un disco opaco perforado periféricamente y acoplado al eje cuya velocidad desea medirse, de una fuente de luz y de una fotocélula.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Esta genera una frecuencia dependiente de los impulsos luminosos que pasan a través del disco, es decir es función de la velocidad [31]. En la figura 4.1 se muestra el tacómetro electromagnético y el tacómetro óptico.

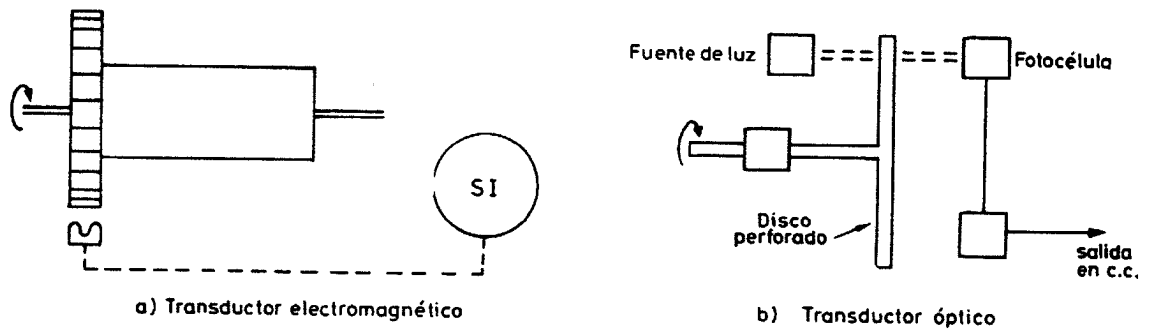


Figura 4.1: Tacómetros de frecuencia

4.1. Criterio de selección de tacómetro

Un parámetro importante para la medición de vibración y en especial para el desbalance en una máquina rotor-dinámica es la medición de ángulo de fase con respecto a la frecuencia de la señal de vibración por ello se toma la decisión de diseñar un tacómetro óptico como mejor opción para la toma de la data de velocidad aprovechando el punto de medida o de interrupción del haz luminoso como referencia para medir la fase, es decir, este punto es el ángulo 0° para la medición de fase. Así se está obteniendo la medida de velocidad del rotor y la medida de fase con la misma señal. Bajo este argumento se procede a diseñar el tacómetro de frecuencia [32].

4.2. Diseño electrónico de tacómetro óptico

El principio de funcionamiento se describe en la sección 4.0.1, se debe contar con un emisor de un rayo de luz y un receptor del mismo que va a interrumpirse cuando pase un objeto oscuro cortando la señal generando un cambio cada vez que este haz luminoso cambie de estado.

Para desarrollar el tacómetro se seleccionó un emisor de luz infrarroja y un fototransistor como receptor del haz luminoso que conmute cada vez que detecte un objeto obstaculizando el mismo. Para diseñar y simular el circuito se utilizó el programa ISIS de Proteus. En la figura 4.2 se muestra los dispositivos electrónicos necesarios para obtener el circuito interruptor del haz luminoso.

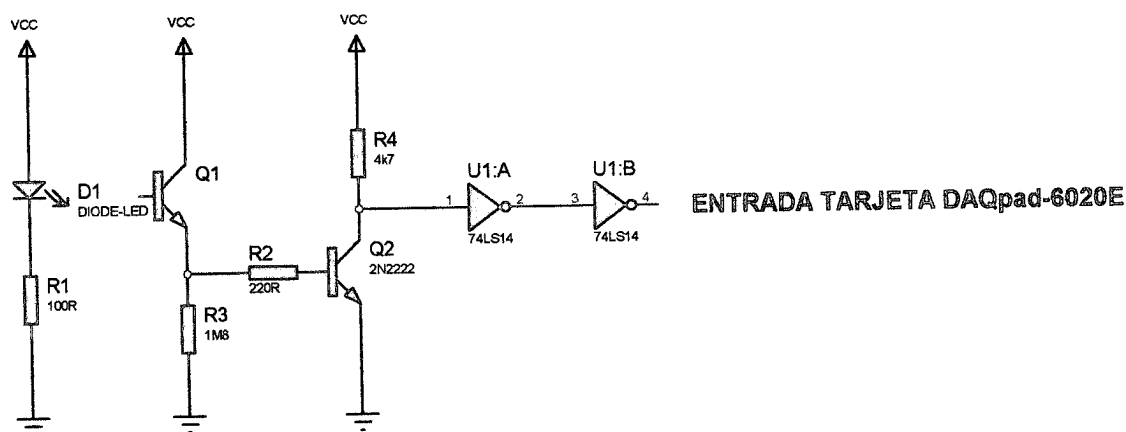


Figura 4.2: Diseño electrónico del tacómetro. ISIS Proteus.

donde D1 es el diodo emisor de haz infrarrojo Q1 es el fototransistor y Q2 es un transistor para acoplar la impedancia de la señal de salida de Q1 las resistencias se diseñaron de acuerdo a la configuración de emisor común para aplicaciones como interruptor. La resistencia de 1.8 MΩ se selecciona para tener una mejor respuesta del fototransistor a una distancia de 1 cm. del diodo emisor y así ubicar el elemento físico que interrumpe el haz luminoso con una holgura de esta distancia (este valor de resistencia se determinó de manera experimental).

En la figura 4.3 se muestra el comportamiento de la salida con respecto a la señal de entrada. Se simula el diodo emisor y el fototransistor con el elemento U1 de la figura y la señal de entrada es un tren de pulsos ya que cuando se interrumpe el haz luminoso ocurre un flanco de bajada en la señal del fototransistor, al transportar la misma hacia el transistor 2N2222 se invierte para que la salida sea un tren de pulsos que corresponda al paso del obstáculo en medio del haz infrarrojo, luego a la salida del transistor se agregan dos compuertas complementarias smith trigger 74LS14 denotadas como U2 para que la señal de salida corresponda a valores compatibles con la familia lógica

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

TTL (0-5V). Cabe destacar que como elemento de obstrucción se agrega una lamina de aluminio con un peso aproximado de 2gr. en el extremo lejano del eje para medir la velocidad evitando condiciones de desequilibrio en cuanto a vibraciones debidas a la masa agregada al eje. La figura 4.4 muestra con mas detalle la señal de salida simulada del tacómetro evidenciando el comportamiento digital que tiene una amplitud 5V cada vez que pase el obstáculo por el haz luminoso.

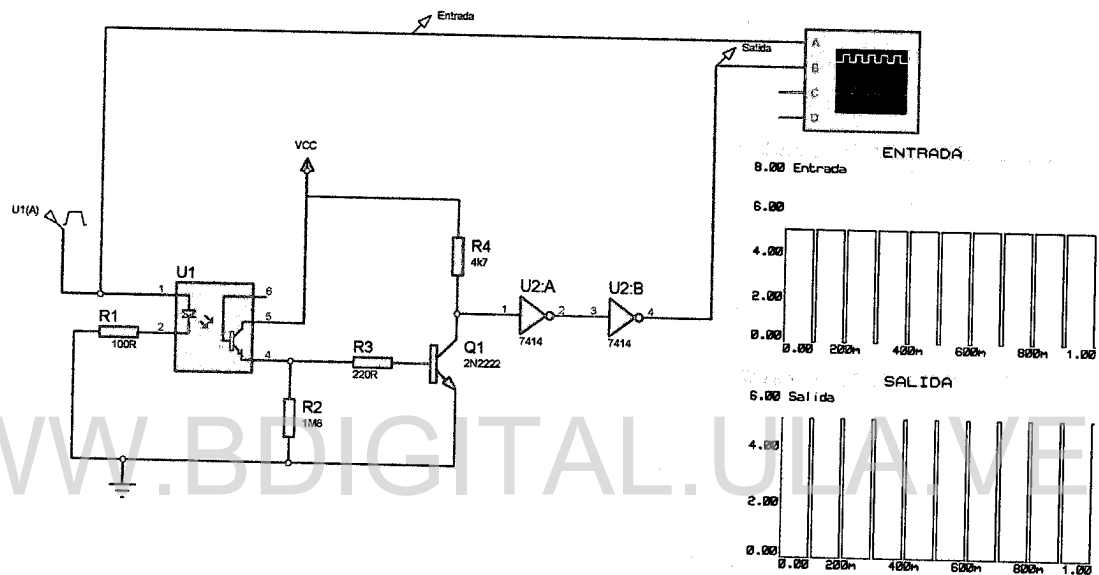


Figura 4.3: Simulación de diseño electrónico del tacómetro.

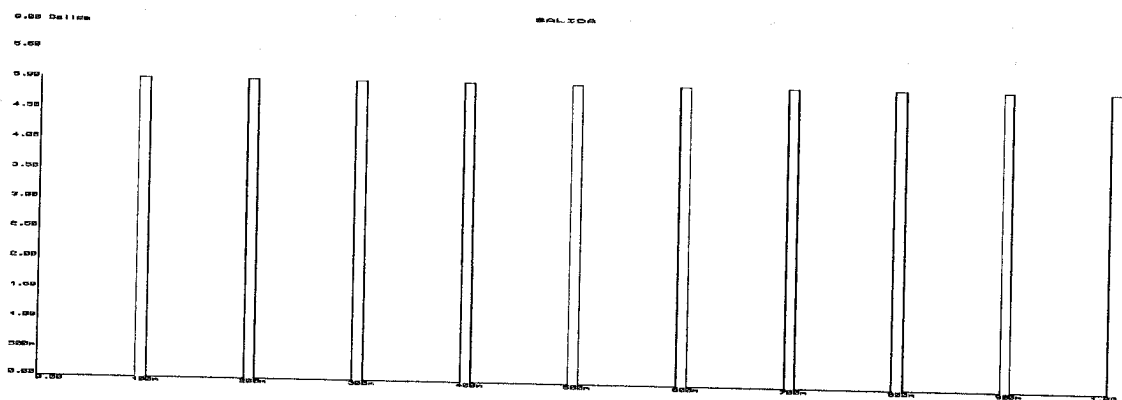


Figura 4.4: Señal de salida de tacómetro simulada en ISIS proteus 7.

Para sujetar el fototransistor y el diodo emisor infrarojo se construyó una base de aluminio con una distancia entre sus dos extremos de emisor y receptor de 1 cm. como

se muestra en la figura 4.5. Esta base se coloca en el extremo inferior del apoyo del rodamiento lejano a la ubicación de la sensórica para evitar que la masa agregada con la lámina interfiera en la medida de vibración.

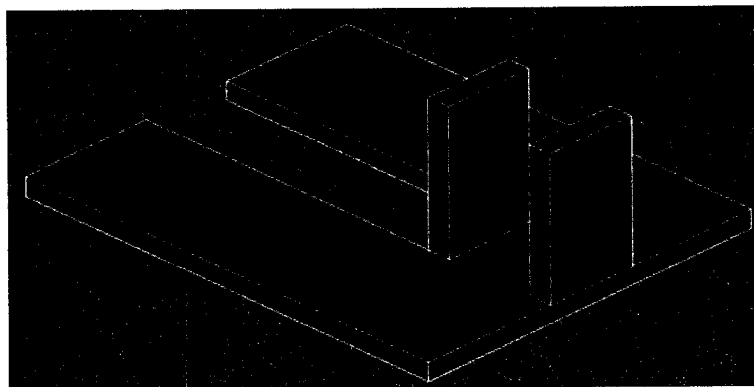


Figura 4.5: Base para sujetar emisor y receptor infrarojo.

El tacómetro se ubicó de como se indica en la figura 4.6 en el Rotor 5000 del laboratorio de mecánica de la facultad de ingeniería. El objeto utilizado para interrumpir el haz infrarojo es de aluminio como se puede ver, con una dimensión de 1 cm. de ancho para que el ancho del pulso generado por la salida del circuito eléctrico tenga un nivel aceptable en la medida, este ancho de pulso será variable con la velocidad del rotor ya que a medida que disminuye el periodo de la señal generada disminuye el ancho del pulso porque aumenta la frecuencia.

4.3. Lectura de tacómetro óptico con DAQpad-6020E

Para la lectura del tacómetro con la tarjeta de adquisición de datos se utilizaron dos programas diferentes para comparar prestaciones y tiempo de desarrollo. Estos software son LabWindows/CVI 8.5 y LabVIEW 8.6 de National Instruments. Las siguientes secciones explican el diseño del Instrumento Virtual en las dos plataformas de desarrollo.

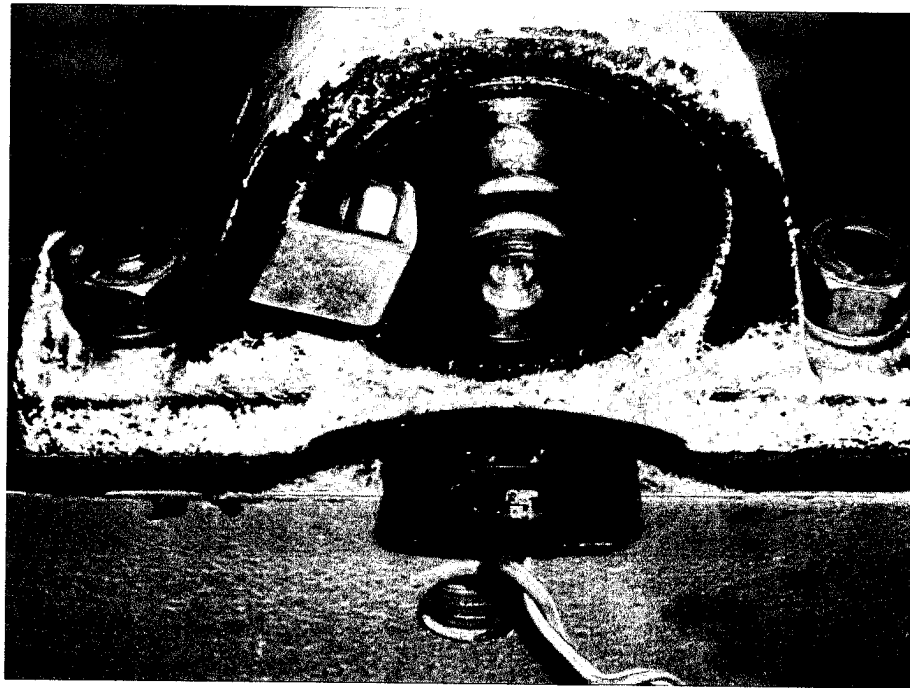


Figura 4.6: Posición Final del Tacómetro en el Rotor 5000.

4.3.1. Instrumento Virtual Programado en Labwindows/CVI

8.5

Los lenguajes de programación para la tarjeta de adquisición de datos entre ellos LabWindows/CVI y LabVIEW, se utilizan para configurar la tarjeta de adquisición de datos y programación de tareas de medición. Una prueba inicial de la tarjeta de adquisición de datos se realizó con el software Measurement & Automation Studio de National Instruments para probar todas las entradas y salidas de la tarjeta de adquisición de datos. Estas pruebas se muestran con mas detalle en el manual de prueba y calibración del sistema de adquisición de datos de Rotor 5000 ver apéndice C.

LabWindows/CVI se utiliza para programar la interfaz gráfica del instrumento de medición en el computador, su lenguaje de programación es ANSI C para todo lo relacionado con la interfaz de usuario. Este instrumento se puede realizar de diferentes maneras gracias a la flexibilidad del lenguaje de programación y a las entradas de la tarjeta de adquisición de datos, Es posible medir la frecuencia de una señal digital

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

utilizando las entradas de contador de la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E de la siguiente manera:

- Conectando la señal proporcionada por el tacómetro en el pin llamado PFI9/GPTR0_GATE se puede obtener el periodo de la señal ya que internamente la tarjeta tiene un reloj u oscilador configurable de 100Khz o 20Mhz [29], el mismo cuenta el tiempo que pasa de un flanco a otro de la señal de entrada a la tarjeta.
- También se puede medir la frecuencia de una señal directamente conectando la señal en el pin PFI8/GPTR0_SOURCE a diferencia que esta señal será medida durante un tiempo continuo y luego emite el valor de la frecuencia contrario a lo que sucede con medirlo en el terminal PFI9/GPTR0_GATE que con 2 flancos se puede tener un valor del periodo de la señal y por consiguiente la frecuencia de la misma.

Existen dos maneras de medir frecuencia en una señal digital. Para la primera prueba del tacómetro se ingresa la señal en el terminal PFI9/GPTR0_GATE para obtener una lectura actualizable rápidamente, como la aplicación es para frecuencias inferiores a 1Khz se puede trabajar con el reloj de 20Mhz como frecuencia de muestreo de la señal teniendo una frecuencia de muestreo aproximadamente igual a 20000 veces la frecuencia de la señal a medir para no tener inconvenientes con el muestreo según la sección 3.2.3. La figura 4.7 muestra la interfaz gráfica diseñada para probar el tacómetro y su correcta medición de velocidad de rotación del eje. Este instrumento se realizó en LabWindows/CVI para medir la velocidad del eje con la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E con el objetivo de verificar la estabilidad de la medida y del circuito implementado. Se observa un indicador tipo reloj para visualizar por parte del usuario el valor de la velocidad del eje con el principio de funcionamiento antes mencionado.

El segmento de código se muestra en el apéndice ?? fue elaborado para crear esta interfaz gráfica con lenguaje ANSI C para LabWindows.

El programa tiene una función que utiliza un temporizador por software para la ejecución de la visualización porque la señal siempre es medida y el valor es cargado internamente en la tarjeta de adquisición de datos, pero para no dejar ocupado el

computador en esta lectura se refresca la pantalla de la interfaz gráfica cada 100ms. tomando el valor de la velocidad en r.p.m. Esta fue la primera prueba que se realizó con la tarjeta de adquisición de datos y el circuito diseñado.

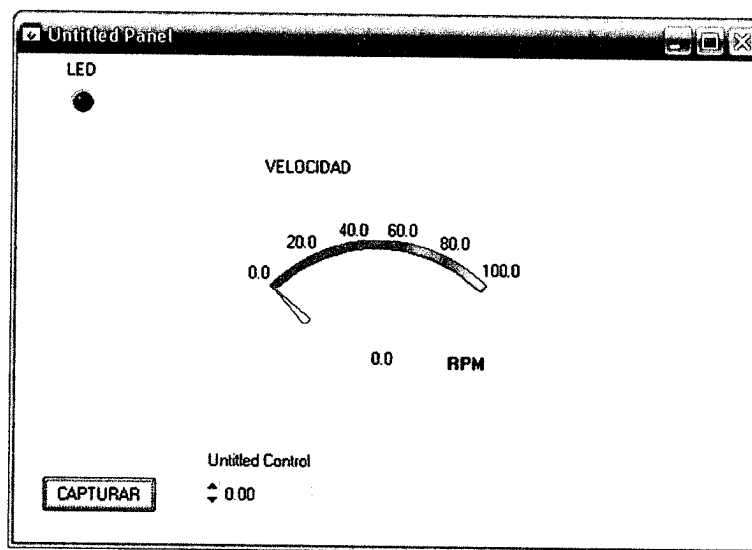


Figura 4.7: Interfaz gráfica inicial tacómetro.

4.3.2. Instrumento Virtual Programado en LabVIEW 8.6

Una segunda prueba del tacómetro se realizó en el software LabVIEW conectando la señal del tacómetro en el pin PFI9/GPTR0_GATE y midiendo el periodo de la señal para obtener la frecuencia de giro en ciclos por segundo para obtener las revoluciones por minuto el eje en cuestión. Básicamente el programa tiene al igual que labWindows un panel frontal ó Interfaz Gráfica con el usuario y un panel de programación que para el caso de labWindows es la ventana de programación en ANSI C, y para LabVIEW es la ventana de diagrama de bloques en la figura 4.8 se muestra el panel frontal del instrumento y en la figura 4.9 el diagrama de bloques en labVIEW.

Para la elaboración del programa se plantearon las mismas premisas del programa de labWindows/CVI, un temporizador de 100ms para refrescar pantalla y la medición del periodo de la señal entregada por el circuito a la tarjeta de adquisición de datos. En la figura 4.8 se observa la interfaz gráfica diseñada para el tacómetro con un reloj tipo tacómetro de automóvil para medir las r.p.m del rotor 5000.

Licencia Creative Commons.

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

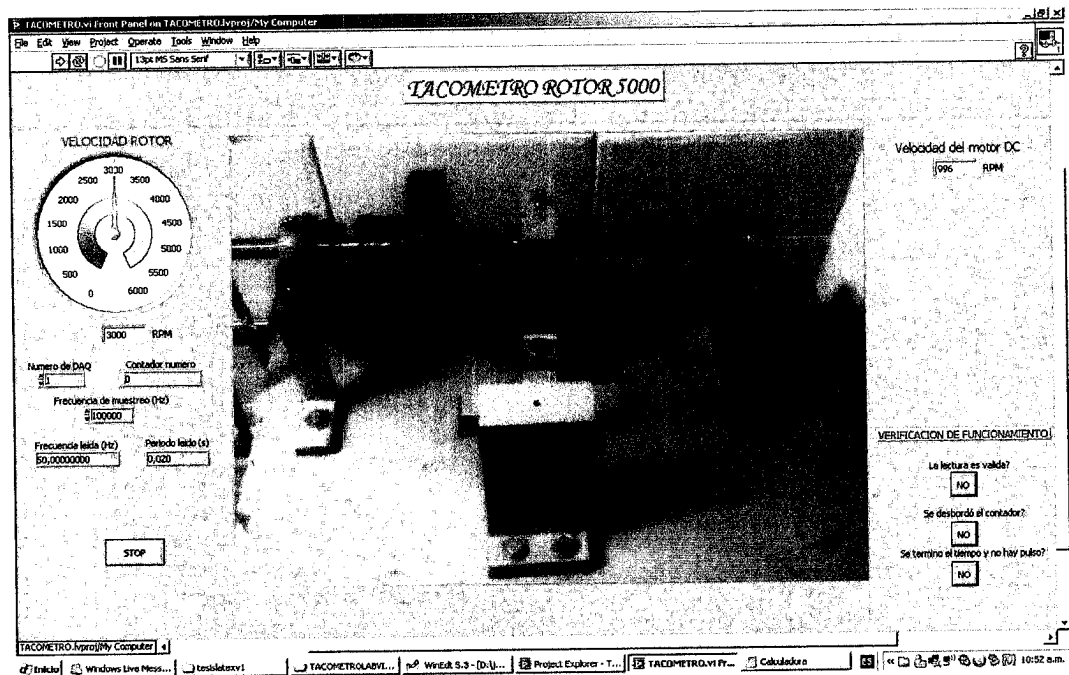


Figura 4.8: Panel Frontal en LabVIEW.

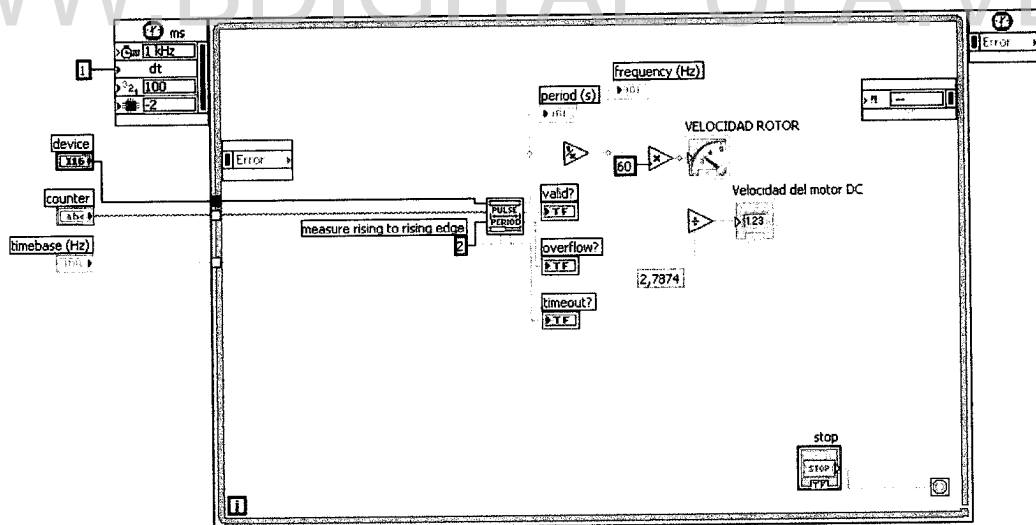


Figura 4.9: Diagrama de Bloques en LabVIEW.

En la figura 4.9 se observa el diagrama de bloques o programa para el Instrumento Virtual del tacómetro. Teniendo la medición de la velocidad del rotor y el primer problema solucionado se procede a evaluar la mejor manera de medir las otras variables

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

necesarias para obtener el desbalance del Rotor 5000 que son, la fase y la amplitud de vibración conceptos claves para la realización de los métodos de Balanceo y el Instrumento Virtual correspondiente al proyecto, ver [33].

En la figura 4.9 se muestra el diagrama de bloques que realiza la tarea de programación. Se utilizó un temporizador por software a una frecuencia de 1Khz para realizar la lectura cada 0.1 s. Se utiliza un bloque llamado “pulse period” para hallar el periodo de la señal leída en el pin de contador. Luego se opera matemáticamente el inverso para hallar la frecuencia de la señal proporcionada por el tacómetro. El segmento de código es muy corto en comparación con el programa realizado en labwindows/CVI ver apéndice A.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Capítulo 5

Instalación de Equipos en el laboratorio

Este capítulo contempla los diferentes pasos para la puesta a punto de la máquina denominada ROTOR 5000 diseñada con el objetivo de medir vibraciones de un rotor homogéneo en el LABMM y realizar prácticas con el objetivo de formar profesionales con experiencia en el análisis de vibraciones y dinámica de rotores y lograr una mejor aplicación de la teoría.

Uno de los factores importantes a la hora de implementar el instrumento virtual es la correspondiente instalación y puesta a punto de los dispositivos de medición y estructura física del banco de pruebas. Para ello luego de diseñar el tacómetro se agrupa el mismo en el conjunto de instrumentos presentes en el laboratorio de la escuela de ingeniería mecánica, es decir, (Tarjeta de adquisición de datos, transductores, fuentes, motor, ajuste de estructura física y demás).

Esta etapa del proyecto se trabajó en paralelo con el diseño del instrumento virtual ya que para efectuar las diferentes pruebas se debe tener una correcta instalación según la normativa recomendada por el fabricante de los transductores de este tipo de pruebas, a lo largo del capítulo se tratarán cada una de las recomendaciones. Según el orden de ejecución se debe realizar el siguiente procedimiento:

- Instalación eléctrica para alimentar el motor en su nuevo sitio de trabajo. Se realizó una acometida eléctrica con el fin de proveer de electricidad la división

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

del laboratorio para análisis de vibraciones.

- Montaje y cimentación del banco de pruebas en nuevo lugar de trabajo ya que este sitio es el más idóneo para realización de prácticas de vibraciones, y debido al nivel de seguridad que se tiene, es decir, un sitio independiente para los instrumentos de medida. Este montaje lleva consigo la inclusión de amortiguamiento a la cimentación de la máquina, en cada uno de los apoyos se ingresó un separador de goma situado entre el suelo y el apoyo de la máquina. El diseño del banco de pruebas contempla 4 apoyos simples a los cuales se recomienda realizar una estructura con el fin de reducir vibraciones axiales en la máquina ya que se observa un pequeño movimiento en esta dirección.
- Instalación de los transductores en cada uno de los apoyos para obtener medición en uno y dos planos respectivamente teniendo en cuenta que hay dos acelerómetros y un velocímetro para efectuar dichas mediciones.
- Instalación del tacómetro en el rotor para efectuar las mediciones de velocidad de giro con el instrumento diseñado e implementado en el laboratorio.
- Instalación de la tarjeta de adquisición de datos en el laboratorio de vibraciones como sitio final contiguo a la computadora destinada para la tarea de medir como se muestra en la figura 5.1, el medio de comunicación entre la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E es un puerto USB y es configurado con los correspondientes drivers de la tarjeta provistos por National Instruments.

5.1. Instalación Eléctrica Laboratorio de Análisis de Vibraciones

Como primer paso para la instalación de la máquina ROTOR 5000 se debe tener una correcta alimentación para el motor que impulsa el rotor, el tipo de alimentación es corriente continua o DC con una velocidad nominal de 1750 RPM a 0,5 HP. Adicional al mismo se encuentra una fuente convertora de 110 V AC a corriente DC. En la figura 5.2 se puede visualizar la fuente cuya marca es BALDOR.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

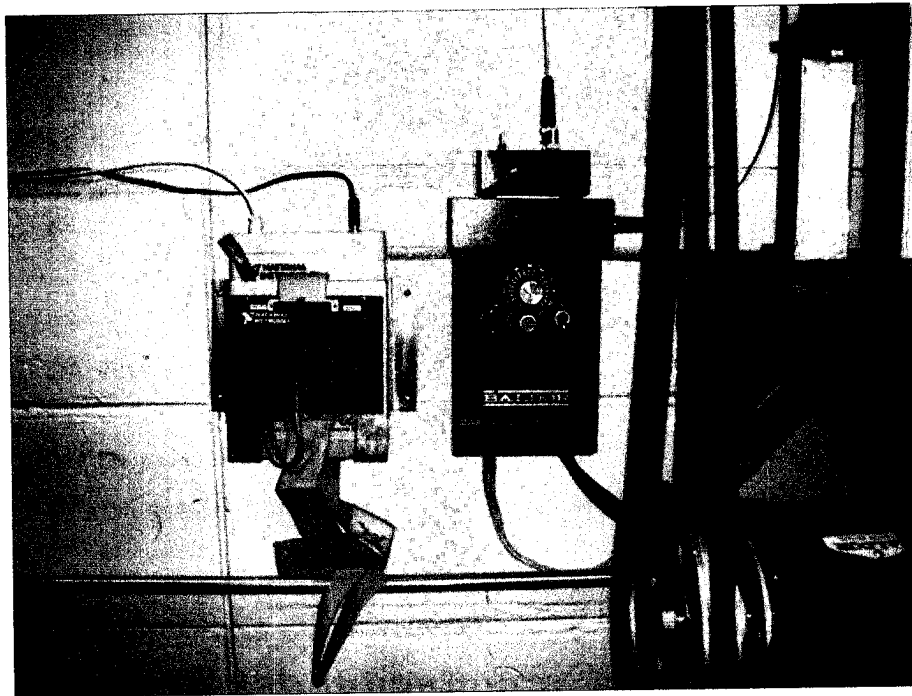


Figura 5.1: Instalación de tarjeta de adquisición de datos.

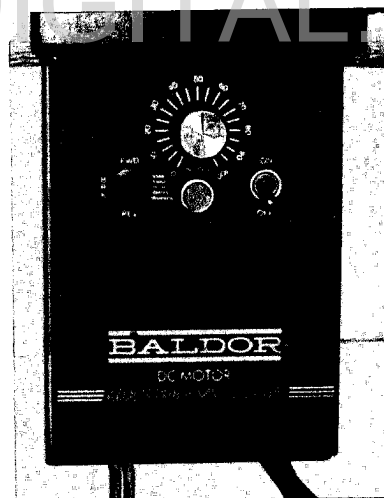


Figura 5.2: Fuente Convertora de AC-DC para el motor con control de velocidad de 0-100 %.

Lo anterior indica que se debe tener una alimentación de Voltaje de 110 V AC para energizar el motor y por ende la máquina ROTOR 5000. También se debe tener alimentación de la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E en el sitio ya que esta funciona con una fuente de alimentación convertidor de 110 V AC a 12 V DC.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)



Figura 5.3: Punto de toma de alimentación doble de 110V AC.

La correspondiente instalación se realiza como se muestra en la figura 5.3 para la alimentación del motor y de la tarjeta de adquisición de datos como un punto doble de alimentación.

5.2. Montaje y Cimentación del Banco de Pruebas

El montaje del Banco de pruebas lleva consigo el trabajo de anclar la estructura de la máquina a su base o para este caso al suelo del laboratorio con RawlPlugs Metálicos con un diámetro externo de 1/2 pulgada e interno de 1/4 de pulgada acordes para la tarea de sujetar la máquina restringiendo los movimientos horizontal y vertical.

También se tiene en cuenta que la energía transmitida de la máquina a la cimentación debe ser amortiguada ya que de lo contrario se tendrá mayor transmisión de vibraciones de la estructura produciendo ruidos extremados en funcionamiento normal, porque es un apoyo demasiado rígido afectando directamente a la máquina teniendo mayores vibraciones. Para ello se utilizaron entre el apoyo de la máquina y el suelo para amortiguamiento pasivo de la máquina. “Esta es una recomendación práctica a la hora de montar cualquier tipo de máquina rotativa”. En la figura 5.4 se muestra el montaje final de los diferentes apoyos de la máquina a su base.

Otro aspecto importante a la hora de ajustar la máquina es la alineación de la correa de transmisión del motor al eje del rotor. En la figura 5.5 se muestra los diferentes tipos de desalineamiento de la . La banda de transmisión es tipo V dentada para mayor agarre y con una longitud de 121cm, la relación de transmisión que se obtiene es:

$$i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{18\text{cm}}{6\text{cm}} = 3 \quad (5.1)$$

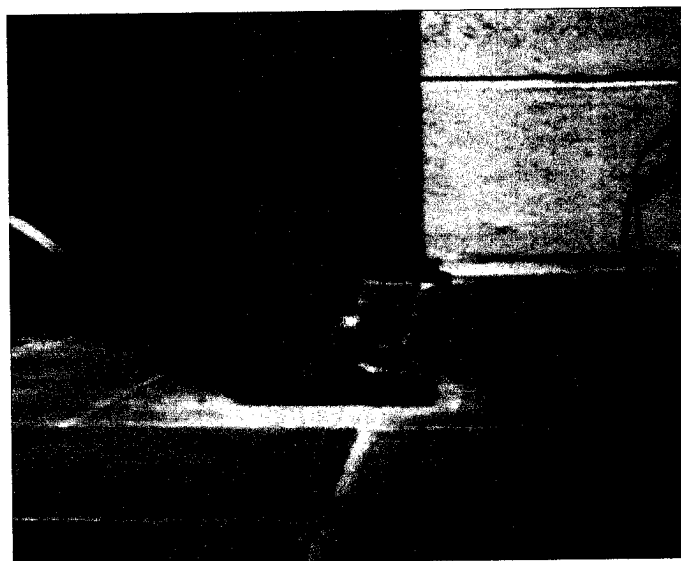


Figura 5.4: Apoyo con separador de goma y Rawlplug.

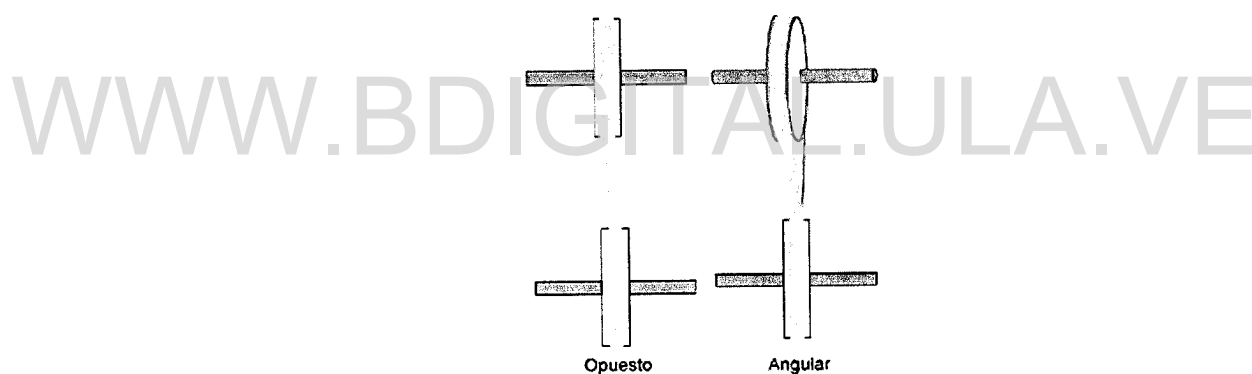


Figura 5.5: Tipos de des-alineamiento de las bandas de transmisión.

donde $d1 = 17,5\text{cm}$ es el diámetro del eje conductor y $d2 = 6,5\text{cm}$ es el conducido. La relación de transmisión i es 1:3 lo cual indica que la máxima velocidad del rotor será 5250 RPM.

5.3. Montaje e Instalación de Transductores

Para realizar el montaje de los transductores se tomó en cuenta las notas técnicas del fabricante de los mismos en este caso Wilcoxon Research, acerca de como se debe

realizar la instalación de los transductores, según [34] se deben seguir unos criterios de selección del sitio y cuidados con los cables. Para la aplicación práctica se trabajó con los instrumentos existentes en el laboratorio.

5.3.1. Requerimientos eléctricos del transductor

La mayoría de los amplificadores internos de los transductores de vibración requieren de una constante de corriente continua (CC), con un rango de voltaje de 18 a 30 V. con un de 2-10 mA. (ver figura 5.6). Para utilizar otra fuente de alimentación es recomendable comunicarse con el fabricante [34].

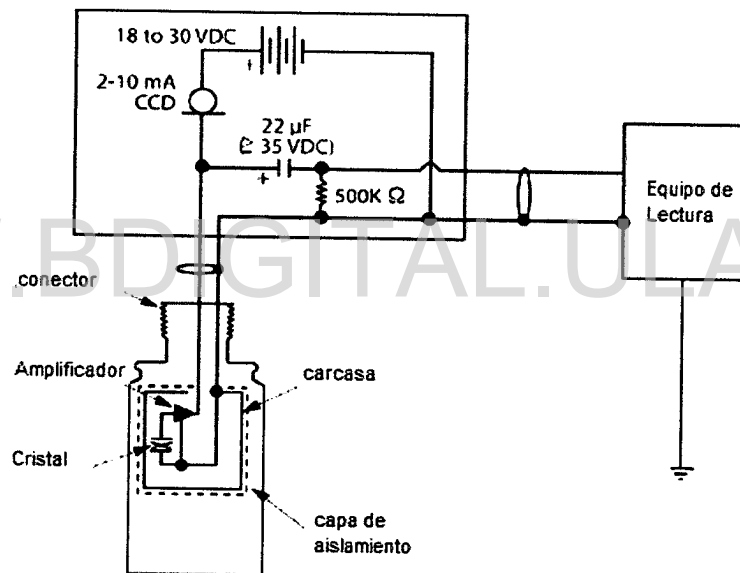


Figura 5.6: Fuente de alimentación del amplificador interno del Transductor. Tomado de [34]

Para evaluar la posible fuente de alimentación alternativa es necesario conocer la señal entregada y tratada por la misma:

Acoplamiento AC y la tensión de Polarización de CC

La salida del sensor es una señal de CA proporcional a la vibración aplicada. Esta señal de CA se superpone a una tensión de polarización de CC (también conocido como voltaje de polarización de salida (BOV)). La componente de CC de la señal es

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

bloqueada por un condensador dejando la señal de salida de CA. La mayoría de los colectores de datos de vibración, monitores, unidades de potencia y el sensor contiene un condensador de bloqueo interno para el acoplamiento de CA. Si no se incluye, un condensador de bloqueo debe ser instalado en campo [34].

Rango de Amplitud y Fuente de Voltaje

El fabricante de los sensores por lo general establece la mitad del entre las tensiones de corte inferior y superior (aproximadamente 2 V por encima de la referencia y de unos 2 V por debajo de la tensión de alimentación mínima). La diferencia entre el voltaje de polarización y el voltaje de corte determina la onda de salida del sensor. La onda de salida determina el rango de amplitud de vibración máxima.(ver figura 5.7). Así, un acelerómetro con una sensibilidad de 100 mV / g, y una onda de salida máxima de 5 voltios, tendrá un rango de amplitud de 50g pico. Si se utiliza una fuente con un valor inferior a 18 V a su salida el rango de tensión variaría de acuerdo al nivel bajo de alimentación [34].

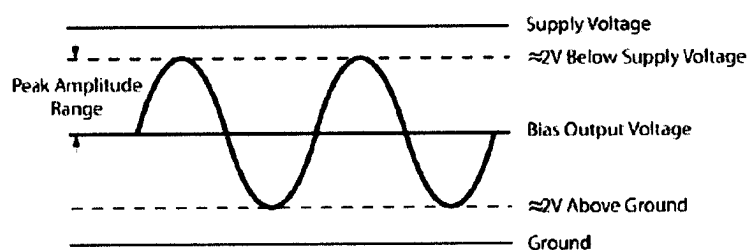


Figura 5.7: Onda de salida de transductor ideal. Tomado de [34]

Diodos de Corriente constante

Prácticamente todos los transductores de vibración con amplificador interno requieren fuentes de alimentación que están reguladas por el . El CCD limita la corriente suministrada al sensor. El uso de fuentes sin límite de corriente puede ocasionar daños en el amplificador del transductor.

Por esta razón, la mayoría de los recolectores de datos disponibles en el comercio y

los monitores de vibraciones tienen circuitos de alimentación que incluye un CCD que regula la potencia suministrada al sensor. La potencia suministrada es casi siempre un rango de 2 - 10 mA. La mayoría de las fuentes de alimentación de batería contiene un CCD de 2 mA para asegurar la vida útil de la batería. Para un suministro de alimentación de línea (donde el consumo de energía no es un problema) debe contener un diodo CCD de 6-10 mA para conducir por cables largos. Para el funcionamiento por encima de 100 ° C se debe limitar la corriente a menos de 6 mA para reducir el calentamiento. Si la fuente de alimentación no es de corriente limitada, se debe colocar un CCD en serie con la salida de voltaje de la fuente. [34].

5.3.2. Requerimientos de Cableado

El cableado es uno de los aspectos más importantes de la instalación de sensores de vibración. Es necesario prestar cuidadosa atención a cuatro aspectos principales: la longitud del cable y capacitancia, ruta, puesta a tierra, y el anclaje.

Longitud del cable y capacitancia

Todos los cables tienen , sin embargo esta capacitancia aumenta con la longitud del cable. Generalmente esta capacitancia es de 30 pf por pie, dependiendo de la construcción del cable, se debe tener especial cuidado en la longitud del cable porque si la capacitancia es grande puede existir perdidas en amplitud y frecuencias altas de vibración.

En aplicaciones industriales normalmente se tienen rangos de medida de 10 Khz y potencia con 2-10 mA. En estas aplicaciones el efecto de la carga capacitiva no es problema para cables menores a 250 pies de largo entre el sensor y la fuente de alimentación [34].

Rango de Amplitud frente a capacitancia del cable

Cuando la capacitancia del cable no se puede cargar lo suficientemente rápido para seguir la señal de vibración, se produce distorsión de la señal y causar señales falsas que aparecen en frecuencias bajas. Fuentes de sobrecarga de alta frecuencia pueden

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ser impactos severos en engranajes e impactos en la banda ancha de una válvula de vapor pero la gran mayoría de los transductores Wilcoxon están protegidos de estas sobrecargas por un filtro [34].

Acometida de Cables e interferencia electromagnética

Lo primero que se asegura es la alta calidad del del cable a implementar, de realizarse empalmes con cables se debe constatar que el blindaje se mantenga. Se debe evitar el cruce de los cables de AC y si existe el cruce que sea en ángulo recto. Siempre que sea posible, proporcionar un conducto separado a tierra para incluir el cable del sensor. Además se debe mantener alejado de los equipos de radio transmisión, los motores del generador, y transformadores. También es recomendable evitar la instalación del cable a través de las zonas propensas a la descargas electrostáticas (ESD). A pesar de que el sensor está protegido contra fallas de ESD, puede ocurrir distorsión de la señal temporal como resultado de una ESD grave [34].

Cable a tierra y Lazos de Tierra

A fin de proporcionar protección adecuada y prevenir los bucles de tierra, el cable de tierra debe ser cuidadosamente considerado. Los lazos de tierra se desarrollan cuando una línea común (es decir, retorno de la señal / escudo) se basa en dos puntos de diferente potencial eléctrico (ver figura 5.8). Para sensores con cable coaxial, el conductor central lleva la señal y la potencia, mientras que la trenza externa proporciona protección y la señal de retorno. Normalmente, la pantalla del cable está aislado eléctricamente de la caja del sensor. Esto aísla el escudo desde el punto de montaje de la máquina e impide los lazos de tierra. Si un se utiliza, se recomienda utilizar una almohadilla separador de montaje independiente para romper los lazos de tierra posibles [34]. Para sensores con dos conductores de cable blindado, se llevan la- señal y la potencia en un cable y la señal común por el otro. La pantalla del cable sirve para proteger la señal de ESD. El blindaje debe estar conectado a tierra en un solo punto, normalmente con el equipo de lectura (ver la figura 5.9). En todos los casos, es muy importante terminar el apantallamiento del . Si no lo hace en alta frecuencia en ambientes de ESD puede dañar la electrónica del sensor [34].

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

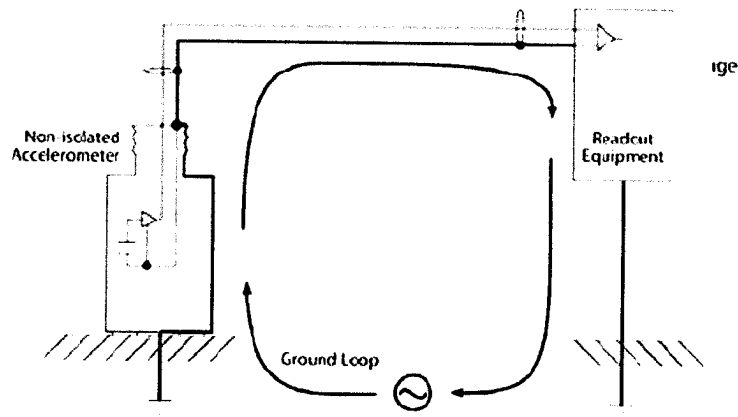


Figura 5.8: Lazo de Tierra y tomas de tierra incorrecta. Tomado de [34]

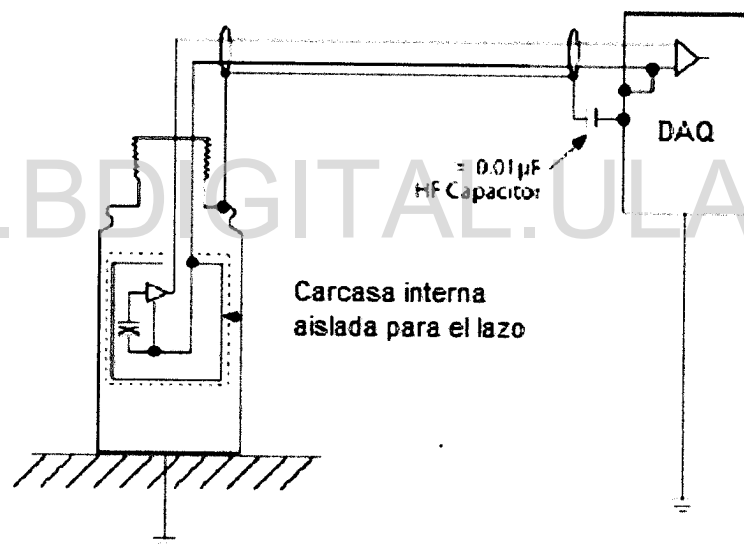


Figura 5.9: Configuración multi-conductor blindado. Tomado de [34]

Anclaje del cable

Después de montar el sensor, el cable debe estar anclado a reducir el esfuerzo en las terminaciones del cable para evitar señales falsas debido a la vibración del cable. Al asegurar el cable, se debe dejar suficiente holgura para permitir el movimiento libre del acelerómetro, en la figura 5.10 se muestra el anclaje recomendado para los diferentes tipos de sensores [34].

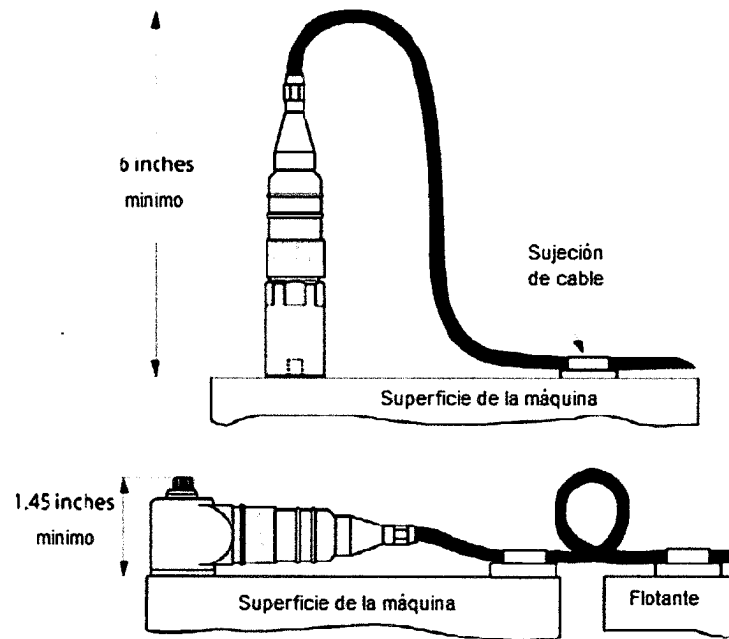


Figura 5.10: Anclaje de cable. Tomado de [34]

5.3.3. Montaje

La configuración de montaje depende principalmente de los requisitos de medición dinámica, como la frecuencia y el rango de amplitud. Otros factores a considerar son la ubicación de montaje, las prohibiciones, la accesibilidad, y la temperatura. En general, hay cuatro técnicas para el montaje de sensores de vibración: varillas roscadas, adhesivos, imanes, y puntas con sondas. La figura 5.11 muestra el efecto de la resonancia de montaje y rango típico de frecuencias utilizables asociadas a cada una de estas técnicas de montaje.

Montaje cimentado (Stud)

Un espárrago roscado de montaje permite la más amplia gama de medición dinámica. Se recomienda para los sistemas de monitoreo permanente, las pruebas de alta frecuencia, y ambientes hostiles. La superficie debe ser enfrentado 1,1 veces mayor que el diámetro de la superficie de montaje del sensor. Para las medidas que implican frecuencias superiores a 1 kHz, la superficie debe ser plana dentro de 1 mil y tienen

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

textura de la superficie no superior a 32 micropulgadas.

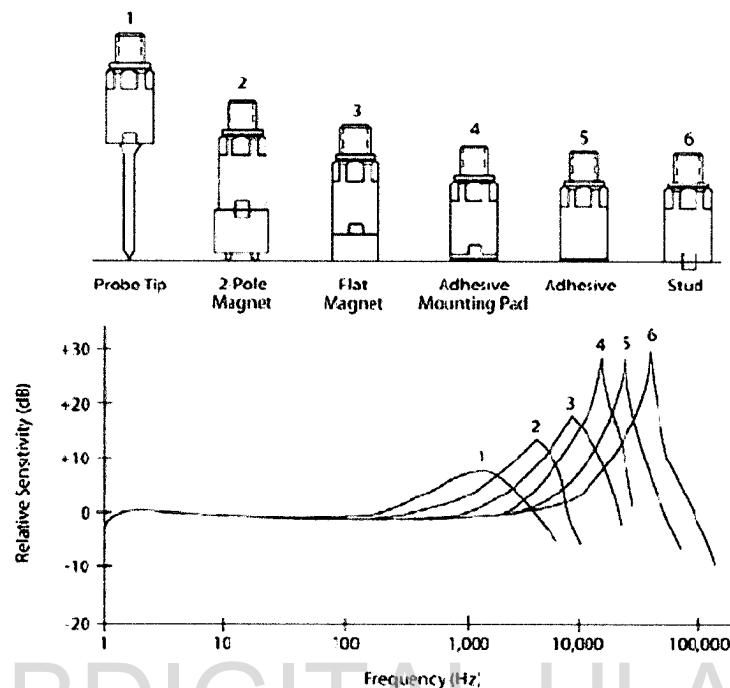


Figura 5.11: Técnicas de Montaje y Efecto de Resonancia en la superficie. Tomado de [34]

La rosca debe ser perpendicular 1° del punto de montaje y al menos dos veces más profundo que el montante. Esto evitará una brecha entre el sensor y la superficie de montaje.

Es necesario un par adecuado en el espárrago de montaje. Aprietes menores reduce la rigidez de la unión del sensor. También el exceso de apriete puede causar daños permanentes en el hilo del sensor. Véase la figura 5.12 para la preparación de la superficie y el valor del esfuerzo de torsión que se aplica a la aplicación en este caso el torque necesario es 20 lb-in en los acelerómetros y 26 lb-in para el velocímetro.

Antes del espárrago de montaje del acelerómetro se debe colocar un líquido de acoplamiento que se aplica a las superficies de contacto. El líquido de acoplamiento protege la superficie de montaje y optimiza la respuesta de frecuencia mediante el aumento de la rigidez de acoplamiento. Los fluidos sugeridos de acoplamiento son el aceite de máquina o grasa. Se recomienda un adhesivo, como el pegamento Loctite 222 de fibra, para utilizar en el perno de montaje permanente [34].

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

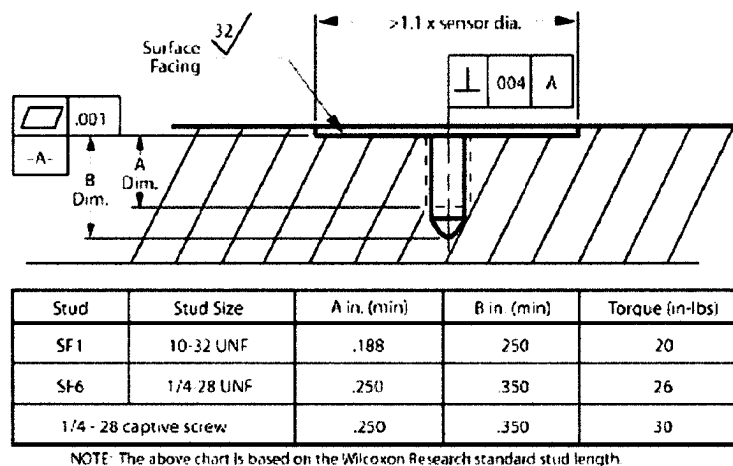


Figura 5.12: Montaje cimentado: preparación de la superficie. Tomado de [34]

Montaje con adhesivo

Si la máquina no puede ser perforada como se describe en la sección de montaje cimentado, el adhesivo de montaje es una alternativa. El acelerómetro se podría unir a la máquina con pegamento, si bien, este método suele dañar el acelerómetro en utilización permanente. Un adhesivo de montaje pad o en la figura 5.11 “mounting pad” es la mejor alternativa después del perno de montaje.

El adhesivo de montaje es un disco, generalmente de acero inoxidable, que es plano en un lado y tiene un tornillo con la rosca del sensor en el otro lado. Existen pastillas de montaje para las que se tiene un agujero roscado a excepción de los acelerómetros con un tornillo de sujeción [34].

Para un rendimiento óptimo, la superficie de la máquina deben ser enfrentados de la misma manera descrita en la subsección Montaje Cimentado (stud) . Si esto no es posible, se debe preparar la superficie de montaje de la máquina mediante la eliminación de óxido, pintura suelta o suciedad. Lijar la superficie para permitir la máxima adhesión. Limpiar el área preparada con el disolvente. Colocar la placa de montaje a la máquina con una amplia cantidad de adhesivo (seguir las indicaciones de fabricante para el uso de adhesivo). Hay una variedad de adhesivos diferentes que se pueden utilizar. Después de que el adhesivo se haya curado, aplique una fina capa de líquido de acoplamiento a la cara del acelerómetro y la placa de montaje. Pasar el

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

acelerómetro en la plataforma de montaje y fijar al valor recomendado como se indica en la figura 5.12.

Normalmente, cuando se engancha la placa de montaje en esta configuración, la plataforma de montaje no puede ser eléctricamente conectado a la máquina. Esto podría ser un problema si la aplicación requiere el caso que el acelerómetro debe ser conectado a tierra. Se Prueba la continuidad entre la plataforma de montaje y la superficie de la máquina desnuda. Si el caso se requiere de conexión a tierra y la plataforma de montaje está aislada de la máquina, se debe utilizar un conjunto de cables que le permiten hacer esta conexión. Normalmente, esto sería en un cable blindado de dos conductores, con el escudo atado eléctricamente a la cubierta de los sensores. La almohadilla de montaje eléctrico debe estar atado a la máquina, es importante que la conexión a tierra sea proporcionada por el conjunto de cables [34]. Debido a los diferentes inconvenientes que presenta el montaje con adhesivo en la aplicación del ROTOR 5000 es recomendable realizar un montaje cimentado. Pero antes de tomar una decisión definitiva se debe observar otro tipo de montaje.

Montaje magnético y Puntas de Prueba

En los programas de medición en tornos los soportes magnéticos y puntas de prueba pueden ser utilizados. El rango de frecuencias de ambos métodos de montaje se reduce drásticamente en comparación a los estudios con adhesivo o monturas. Los soportes magnéticos están disponibles con superficies de piso en lugares planos o dos configuraciones de poste para superficies curvas. Las puntas de prueba deben ser de acero y no podrá exceder de seis pulgadas [34]. Por factores relacionados a la frecuencia de trabajo y ubicación del banco de pruebas del ROTOR 5000, se encontró recomendable por el fabricante tener un montaje cimentado.

Verificación de Operación

Una vez completada la instalación, se recomienda que el transductor de vibración de una prueba del correcto funcionamiento. Para hacer la respectiva prueba se debe medir la diagonal de la CC del voltaje de salida (*BOV*) de alimentación del transductor y conectar un voltímetro en señal del transductor y la referencia común. La *BOV*

Licencia Creative Commons.

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

debe descansar en un ± 2 V de la nota el valor de la hoja de especificaciones (normalmente de 8 a 12 V) [34]. Para los transductores utilizados (736T y 793V) las fuentes de alimentación tienen un voltaje de polarización de 10V DC por lo tanto corresponde al valor intermedio del rango normal de trabajo.

Sugerencias de diagnóstico

Si el BOV es igual a 0 V y la fuente de alimentación está correctamente conectado el circuito puede estar en corto, se debe ensayar las conexiones de cable y fuente de alimentación. Si el BOV es igual a la tensión de alimentación, el circuito puede estar abierto, se prueba las conexiones de cable. Si el cable tiene su alimentación normal, el amplificador del sensor puede estar defectuoso. Para confirmar la operación del amplificador del transductor, se sustituye temporalmente el sensor del cual se tiene sospecha por una unidad nueva y se mide nuevamente los BOV. Si el BOV es correcta, entonces se debe comprobar la sensibilidad de las vibraciones [34]. Esta prueba se realizó de manera sencilla debido a que se cuenta con dos transductores de aceleración 736T y uno de velocidad de vibración 793V. Los tres transductores arrojaron resultados positivos durante el diagnóstico.

Para probar la sensibilidad de vibración, se debe tocar la superficie de la máquina cerca del transductor. Observar la señal en un osciloscopio para asegurar que el transductor capta las vibraciones. Es recomendable tomar las mediciones de un transductor instalado recientemente para determinar si su producción es razonable [34].

5.4. Instalación del Tacómetro en Rotor 5000

En el capítulo 4 se explicó la etapa de diseño del tacómetro como hardware y software necesario para la medición de velocidad rotacional en el ROTOR 5000. En la figura 4.6 se muestra como se instaló físicamente. El lugar destinado para la instalación se tomó en relación a que es el apoyo mas lejano de la toma de medida que conduce este eje, es decir, el extremo posterior del rotor 5000. En la figura 5.13 se muestra el lugar donde se montó el sensor, se instaló en este sitio para evitar problemas de interferencia de vibraciones debidas a la lámina de aluminio que lleva en un extremo el hardware del

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

tacómetro. El punto de referencia está ubicado en la parte inferior del rotor, es decir, si se tiene una vista frontal del disco y como referencia un plano cartesiano el 0° estaría ubicado en la parte inferior (Para efectos prácticos el punto de referencia tiene especial interés ya que para medir el ángulo de posición de nuevos pesos de balanceo se debe tener claro este punto). Otro aspecto importante al instalar el tacómetro es el color de los cables de alimentación y señal del mismo ya que se utilizó un cable tipo Ribbon de tres hilos de conducción con tres colores diferentes no convencionales para señales de este tipo en la tabla 5.1 se especifica los colores de conexión del tacómetro.

Tabla 5.1: Descripción colores de cables utilizados en tacómetro.

Color	Conexión	Pin Tarjeta DAQpad-6020E
Gris	Tierra	7
Blanco	5V	8
Negro	salida Sensor	68

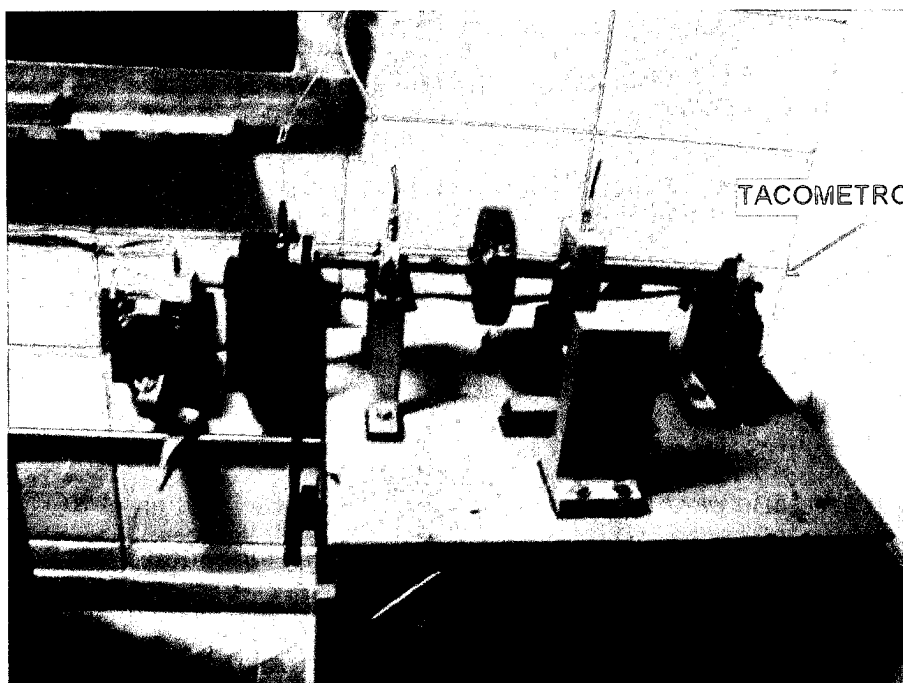


Figura 5.13: Lugar de instalación del Tacómetro en ROTOR 5000.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La conexión del tacómetro a los pines 7 y 8 respectivamente de la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E indica que la misma está alimentando la etapa electrónica del sensor con un nivel de voltaje de 5V DC compatible con señales digitales TTL proporcionados por la misma. En el capítulo 4 se observaron las diferentes señales entregadas por el transductor.

5.5. Instalación de Tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E en el LABMM

La tarjeta de adquisición de datos se instaló en el LABMM como sitio fijo junto a la estructura mecánica del ROTOR 5000 como se muestra en la figura 5.1 y junto a una computadora destinada al análisis de vibraciones. El lugar de instalación se seleccionó con el objetivo que los cables de la tarjeta y adicionales alcanzaran sin necesidad de realizar extensiones de los mismos, es decir, (cable USB, cable de transductores y fuentes, cable de tacómetro y demás), respetando los protocolos antes mencionados acerca de longitud de los cables y así evitar los efectos de carga capacitiva e interferencia electromagnética en cada uno de ellos. En la figura se puede observar que el control de velocidad del motor y la tarjeta de adquisición de datos están puestos juntos para facilitar al usuario el control de velocidad del motor y encendido de la tarjeta de adquisición de datos sin desplazamientos largos. Los cables se ajustaron de manera fija en los canales correspondientes a cada conexión de transductores según las especificaciones del programa que se explicara en el capítulo 6 de la siguiente manera:

Para el correcto funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E se debe instalar el software LabVIEW de National Instruments, el cual incluye un paquete muy importante para probar la tarjeta y todos sus canales llamado Measurement & Automations. Para la instalación correcta de LabVIEW 8.6 se debe ver el manual [35] que indica el uso del programa y tipo de programación del mismo.

Después de instalar LabVIEW se debe instalar el driver de la tarjeta de adquisición de datos para enlazar las herramientas que configuran o integran la tarjeta DAQpad-6020E con el programa LabVIEW e implementar el software para este mismo hardware.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Existen dos drivers disponibles para instalar y se clasifican según la tarjeta de adquisición de datos que estemos utilizando, el que utiliza la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E se llama Traditional NI-DAQ(legacy). Para profundizar acerca de la instalación de este software ver [36], luego de instalar el software en una computadora se puede conectar la tarjeta en un puerto USB y la misma será reconocida plug and play por el computador ya que el driver realiza dicha función. Cuando la tarjeta es reconocida por la computadora se debe seguir el procedimiento descrito en el manual de calibración de la tarjeta de adquisición de datos ver apéndice C.

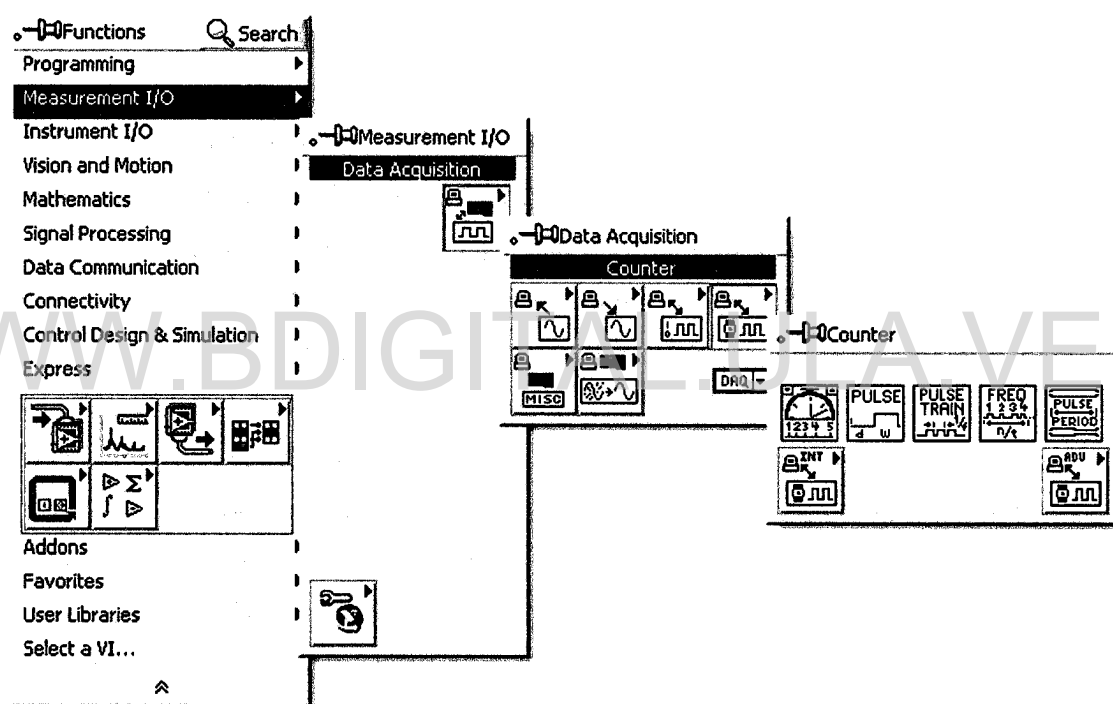


Figura 5.14: Bloque de configuración de tarjeta DAQpad-6020E.

El driver traditional NI-DAQ(legacy) agrega una paleta dentro del software LabVIEW que es llamada “Data Adquisition” visible en el diagrama de bloques de programación gráfica de LabVIEW como se muestra en la figura 5.14 donde se encuentran todas las funciones para manipulación de la tarjeta de adquisición de datos, es decir, manejo de entradas salidas digitales, entradas analógicas, contadores, salidas analógicas y demás módulos internos de la tarjeta.

Utilizando esté módulo se puede configurar cada uno de los canales de la tarjeta para

pruebas de la misma y demás como se muestra en el manual de prueba y calibración del sistema ROTOR 5000 anexo a este documento. Para la elaboración del programa concerniente al trabajo de esta tesis se tiene en cuenta los conceptos de instrumentación virtual y programación gráfica que se pueden profundizar en [33,35].

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Capítulo 6

Programación del Instrumento Virtual para Medición de Vibraciones y Balanceo del Rotor 5000

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

En este capítulo se explica de manera clara y sencilla la elaboración del programa de adquisición y procesamiento de datos en la computadora con el diseño de la interfaz gráfica del mismo para interactuar con el usuario final. Durante el desarrollo del programa se obtuvo una variedad de versiones anteriores a la presentada finalmente corrigiendo errores de diseño, probando la instrumentación y midiendo las diferentes tensiones equivalentes al nivel de vibración proporcionada por cada uno de los transductores de aceleración mostrados en el capítulo 5.

El capítulo se divide en tres grandes secciones según los módulos trabajados en la tesis que son, balanceo en un plano, balanceo en dos planos y evaluación de severidad de vibración. Los diferentes módulos fueron diseñados de acuerdo a las acciones de cada uno de los métodos y a criterio de las diferentes normas para balancear rotores (norma 10816). Cabe destacar que los métodos implementados para el balanceo del rotor, en un plano y dos planos son netamente vectoriales y como tal se trabajaron en el entorno de programación de LabVIEW implementando las diferentes herramientas presentes en

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

el software. Para realizar el balanceo en un plano se realizó el programa por el método vectorial de balanceo de rotores visto en la sección 2.2.3, y el balanceo en dos planos se realizó por el método de coeficientes de influencia visto en la sección 2.3.3 que es el mas utilizado para programas de este tipo ya que toda la manipulación es vectorial y desde el punto de vista computacional se trabaja fácilmente con el contenido de las variables [4]. El módulo de severidad vibratoria se diseñó de acuerdo a la norma ISO 10816 para los límites permitidos de vibración en los diferentes tipos de máquinas según su aplicación revisada en [37].

Interfaz de Usuario de INVIBA e INVIBRA

El software diseñado para la tarea de balancear el rotor esta compuesto de dos sub-instrumentos llamados **INVIBA** (Instrumento Virtual Para Balancear ROTOR-5000) e **INVIBRA** (Instrumento Virtual Para la medición de vibraciones), esta distinción se realiza ya que son dos módulos independientes pero trabajan de la mano para la tarea final que es balancear la máquina ROTOR 5000. El módulo INVIBA se ejecuta en el instante que se inicia el programa de balanceo como se muestra en la figura 6.1. Esta ventana indica al usuario que tarea desea realizar mostrando tres opciones principales que son:

- Balancear en un Plano
- Balancear en Dos Planos
- Evaluar severidad vibratoria

Luego de seleccionar la acción a realizar, el usuario debe pulsar el recuadro siguiente que abrirá inmediatamente el sub-instrumento virtual llamado INVIBRA el cual según sea la tarea a realizar posee algunas rutinas diferentes para finalizar el trabajo. En la figura 6.2 se observa la interfaz de INVIBRA para todas las opciones. En cada uno de los módulos de las siguientes secciones del capítulo se explicará de manera detallada las funciones utilizadas en la adquisición y procesamiento de datos.

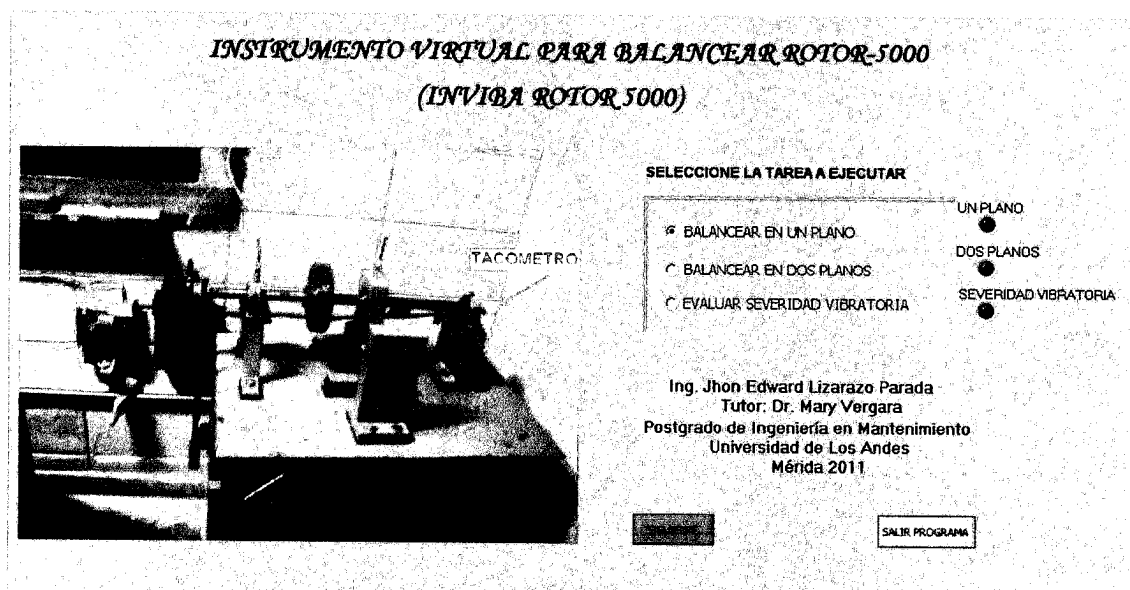


Figura 6.1: Interfaz gráfica inicial de INVIBA.

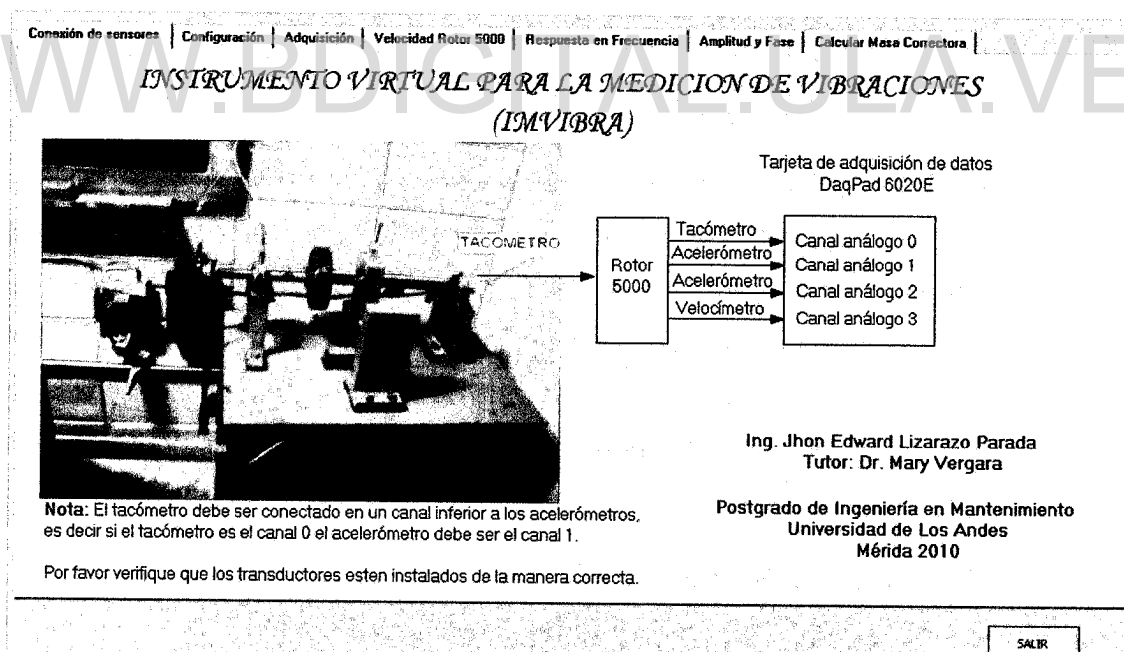


Figura 6.2: Interfaz gráfica INVIBRA para medición de vibraciones.

6.1. Módulo Balanceo en un plano

Este módulo se realizó con el procedimiento visto en la sección 2.2.3 como balanceo vectorial en el cual se toman mediciones de vibración inicial y con una masa de prueba,

captando amplitud y fase para cada una de las muestras.

La interfaz gráfica consta de IMVIBRA que es el instrumento virtual para medir vibraciones y adicionalmente el método de balanceo a trabajar. La interfaz esta descrita en la figura 6.1. En ella se puede observar siete etiquetas superiores llamadas (Conexión de sensores, configuración, Adquisición, Velocidad Rotor 5000, Respuesta en frecuencia, Amplitud y fase y calcular masa correctora) las cuales tienen las siguientes funciones:

- **Conexión de sensores** Esta etiqueta es de carácter informativo y se puede observar en la figura 6.2 donde se visualiza una imagen del Rotor 5000 al lado izquierdo indicando la posición del tacómetro, al lado derecho la información de las conexiones de la tarjeta, esto para presentar una mejor comprensión de como se debe conectar los transductores a la tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E. En la parte inferior se realiza una nota aclaratoria de como se debe instalar el tacómetro en comparación con los transductores de aceleración en conjunto con un texto que indica que este instrumento virtual es de propiedad de la universidad de los Andes y el nombre de sus realizadores.
- **Configuración** Esta etiqueta indica todos los parámetros que se pueden modificar de la tarjeta de adquisición de datos para realizar la tarea de toma de data de vibración. Se ingresan datos tales como la frecuencia de muestreo, el numero de dispositivo o de tarjeta, cuantos pulsos por revolución se obtienen por cada vuelta del rotor y los canales de entrada de medida para los acelerómetros. En la figura 6.3 se muestra los campos para modificar cada una de las variables de la adquisición de datos.
- **Adquisición** Esta etiqueta es la mas importante en cuanto a interacción con el usuario se refiere, ya que indica según sea la selección de los planos a analizar cuanto tiempo se va a tomar y almacenar data, de igual manera muestra una gráfica de los datos adquiridos para este tiempo, en el tacómetro y el acelerómetro correspondiente a dicho análisis.

En la figura 6.4 se muestra la ventana desplegada de la etiqueta. En la parte inferior se observan cinco botones de comandos para ejecutar tareas de muestreo y retención de datos, los cuales llevan nombres según la tarea que ejecutan. El botón

llamado INICIAR ENSAYO es utilizado para inicializar las variables utilizadas en el programa como también para habilitar el botón procesar sin masa el cual corresponde al primer paso del método de balanceo en un plano. Se recomienda pulsar este botón cada vez que se inicie un procedimiento de balanceo en un plano. También se encuentra otro botón llamado Adquirir datos, el cual se debe pulsar luego de configurar cuanto tiempo se desea tomar data de los acelerómetros y tacómetro el valor por omisión es 5 segundos. El mismo inicia la toma de data en los canales análogos de la tarjeta configurada en la etiqueta Configuración. Al finalizar el tiempo de toma de la data, la gráfica llamada “Gráfico de adquisición en tiempo de los canales” es actualizada con la data recientemente adquirida. Cabe destacar que este botón es solo para adquirir la data sin ninguna clase de procesamiento, en general, es la data cruda de los canales o lo que se esta viendo en los transductores de aceleración y el tacómetro. Para procesar los datos es necesario pulsar el botón llamado “procesar sin masa de prueba” como paso inicial en el procesamiento. Este botón procesa la Transformada de Gabor para obtener los diferentes espectros que tiene la señal y obtiene los órdenes de vibración que no son mas que el valor de la transformada, normalizando de acuerdo a la velocidad del rotor los contenidos espectrales de la señal obtenida en los canales. Estos diagramas se podrán observar en la etiqueta Respuesta en frecuencia y sirven para determinar la amplitud de vibración por desbalance y verificar el funcionamiento del instrumento.

- **Velocidad Rotor 5000** En esta etiqueta se muestra un gráfico del perfil de velocidades leídas en los instantes de tiempo de toma de data y también una vista tacométrica de la velocidad promedio del ROTOR en este tiempo. En la figura 6.5 se muestra la etiqueta de velocidad de Rotor 5000.
- **Respuesta en frecuencia** En esta etiqueta se muestran los diagramas espectrales para los datos procesados en los transductores de aceleración. La gráfica llamada Respuesta en frecuencia de acelerómetro es un diagrama espectral donde sus ejes pueden ser seleccionados de acuerdo a los siguientes tipos: Orden-RPM, Frecuencia-RPM y RPM-Orden.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Conexión de sensores | Configuración | Adquisición | Velocidad Rotor 5000 | Respuesta en Frecuencia | Amplitud y Fase | Calcular Masa Correctora

INSTRUMENTO VIRTUAL PARA LA MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Configuración tarjeta de adquisición de Datos DAQPad-6020E

Número de tarjeta: Frecuencia de Muestreo: 10000 (Hz) Tacómetro Pulso/Rev: 1

Configuraciones de canales

	Color	Nombre	Canal Analógico de la DAQ	Alimentación de la DAQ	Acople de corriente	Configuración entrada	Range (V)	Sensitivity (mV/EU)	Unit
Tacómetro	Tach	0		DC	ref single-ended	10.00	1000.00	V	
Acelerómetro	SEV	1		DC	ref single-ended	10.00	1000.00	g	

Información de Canal

dB reference [EU]: 1.0E+0 weighting filter: Linear custom label: EU

Instrumento Virtual Para la Medición de Vibraciones

SALIR

Figura 6.3: Interfaz gráfica etiqueta configuración.

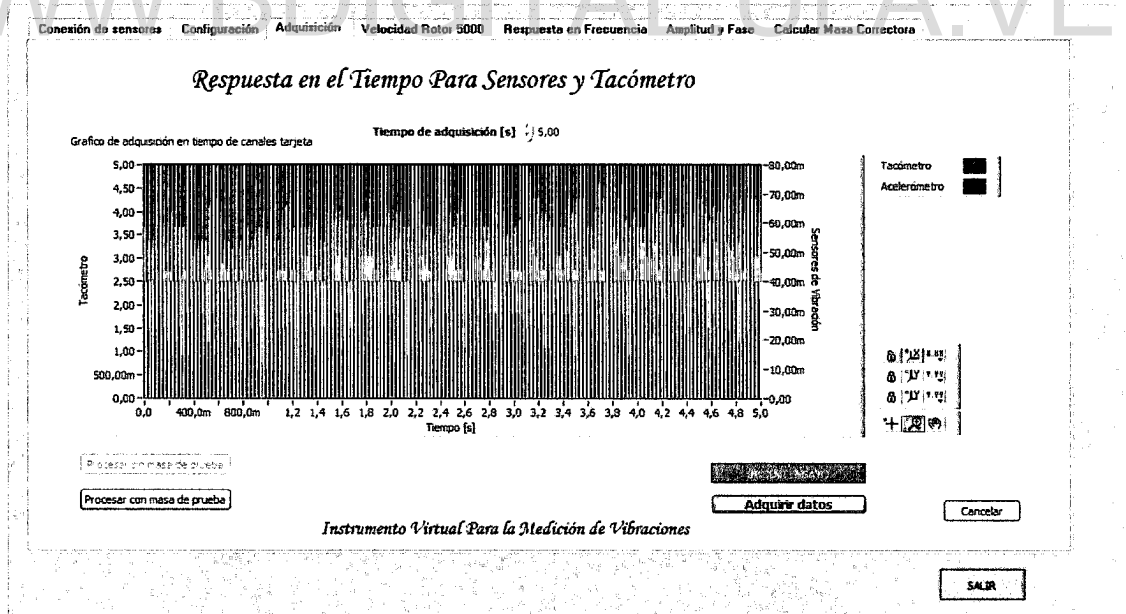


Figura 6.4: Interfaz gráfica etiqueta Adquisición.

En la figura 6.5 se observan los gráficos para diagramas de frecuencia. Al lado derecho se muestra una gráfica llamada espectro de orden para la vibración que

muestra el pico de vibración para el orden 1 que corresponde a la frecuencia de rotación de la máquina. También se puede observar un botón en la parte central llamado dB activo para observar la amplitud de vibración en unidades de decibeles o amplitud en gravedades.

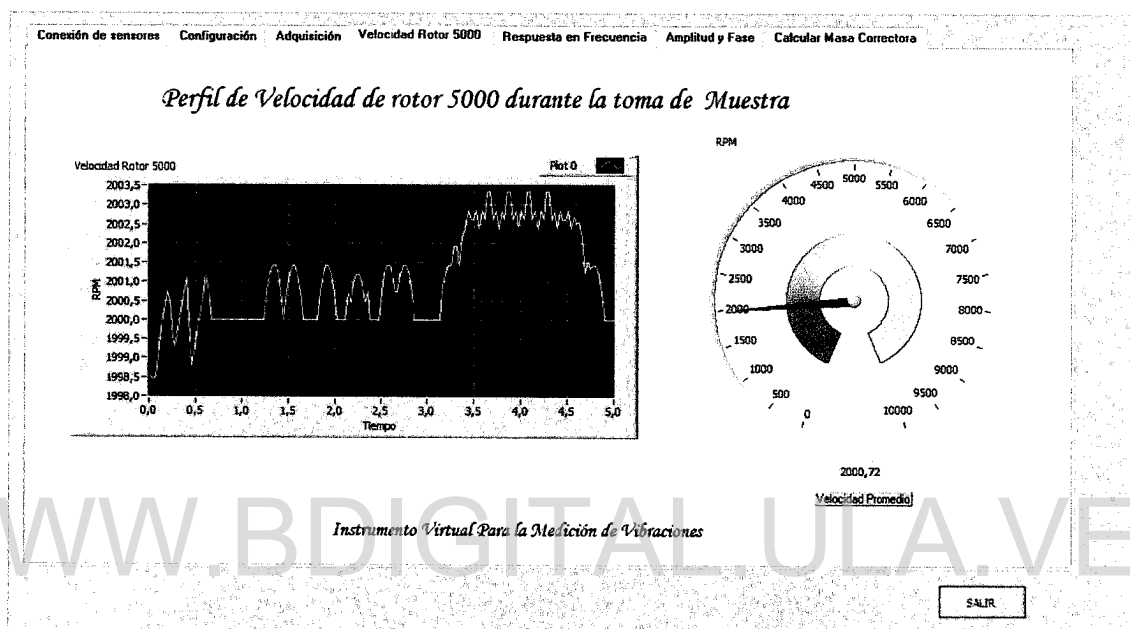


Figura 6.5: Interfaz gráfica etiqueta Velocidad Rotor 5000.

- **Amplitud y Fase** Esta etiqueta muestra los resultados calculados para el vector de amplitud y la fase leída en la señal de vibración. En la figura 6.7 se muestra el contenido de esta etiqueta con sus dos gráficos los cuales corresponden a los valores de amplitudes y fases leídas en cada uno de los lóbulos de la señal de vibración correspondientes a la velocidad de rotación. En la parte izquierda esta un gráfico de *Fase vs Tiempo* el cual calcula la diferencia de fase entre la señal de referencia proporcionada por el tacómetro y la señal de vibración proporcionada por el acelerómetro. En la parte derecha se encuentra un gráfico de *amplitud vs Tiempo* el cual se extrae de los picos de amplitud de vibración para la frecuencia de rotación del ROTOR 5000.

- **Calcular Masa Correctora** Esta etiqueta muestra los resultados de las mediciones para cada una de las corridas del programa en la parte inferior (AN (ángulo

1), AN1(Ángulo 2), AM(Amplitud 1), AM1(Amplitud 2)). También se tiene un botón llamado calcular masa de corrección para realizar los diferentes cálculos del método de balanceo en un plano, este botón será habilitado luego de tomar las dos corridas con masa de prueba y sin masa de prueba. En la figura 6.8 se observa el contenido de la interfaz correspondiente a los resultados calculados por el programa.

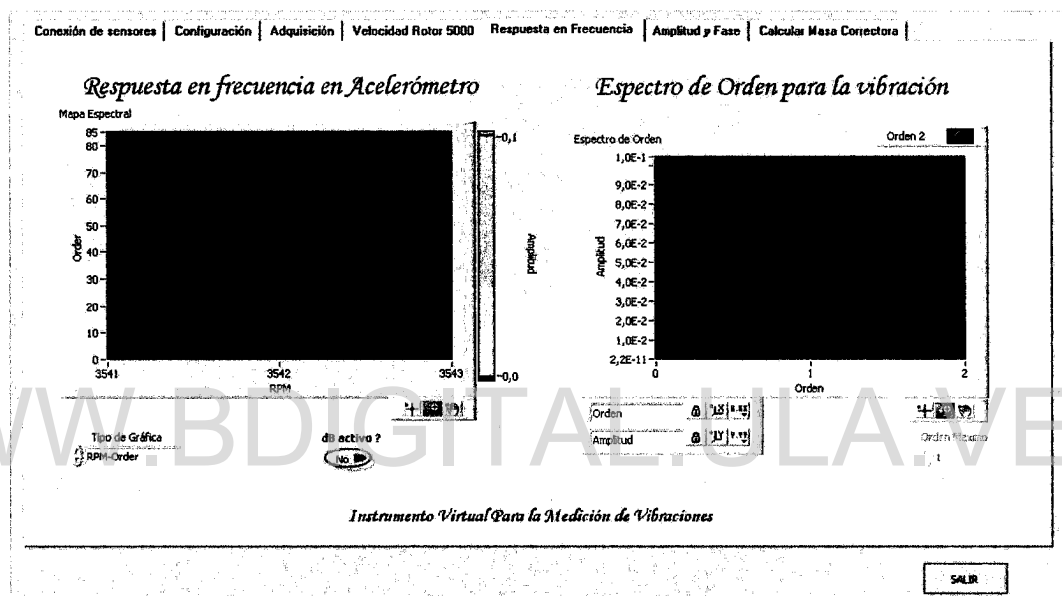


Figura 6.6: Interfaz gráfica etiqueta Respuesta en frecuencia.

La etiqueta llamada Calcular masa correctora se debe utilizar para calcular la posición donde se debe colocar la masa correctora y el valor de la misma, por tanto es el último paso para realizar la tarea de balancear el rotor 5000.

Las etiquetas que se presentan corresponden a la interfaz gráfica o interfaz de usuario del programa de balanceo en un plano, la misma necesita un algoritmo o programa que permita realizar todas las funciones anteriormente descritas. En el software LabVIEW esta distinción la realizan con dos ventanas llamadas (Panel frontal y Diagrama de Bloques). Hasta el momento se explicó lo concerniente al panel frontal sinónimo de interfaz gráfica.

En la ventana diagrama de bloques se realiza el algoritmo de programación gráfica para enlazar la interfaz gráfica con la tarjeta de adquisición de datos. Cabe destacar

que este tipo de programación hace muy flexible el sistema de adquisición de datos ya que se pueden realizar cambios posteriores al diseño de la interfaz presentada durante el desarrollo del trabajo de grado.

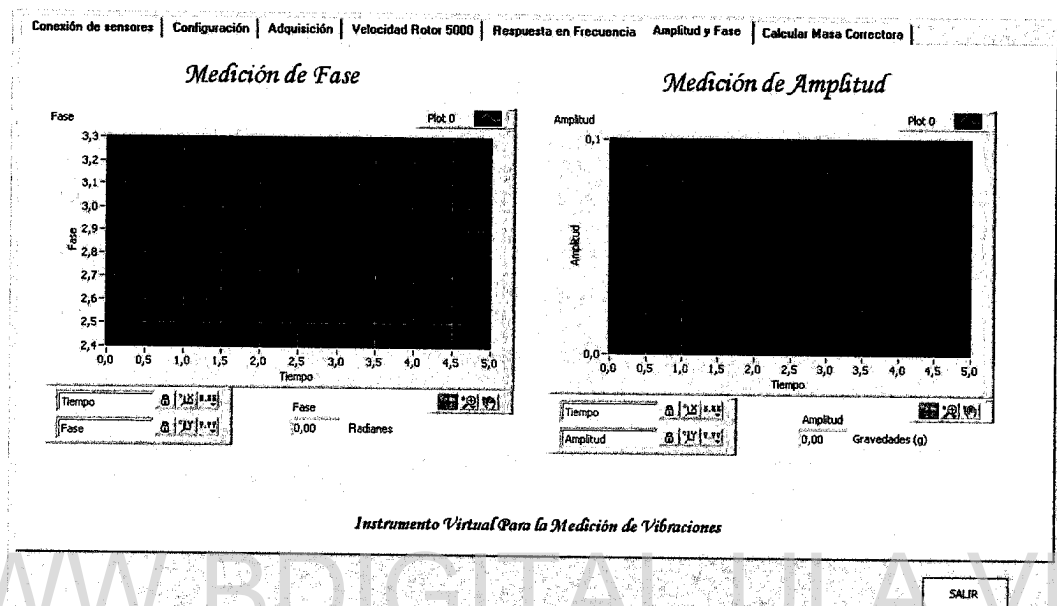


Figura 6.7: Interfaz gráfica etiqueta Amplitud y Fase.

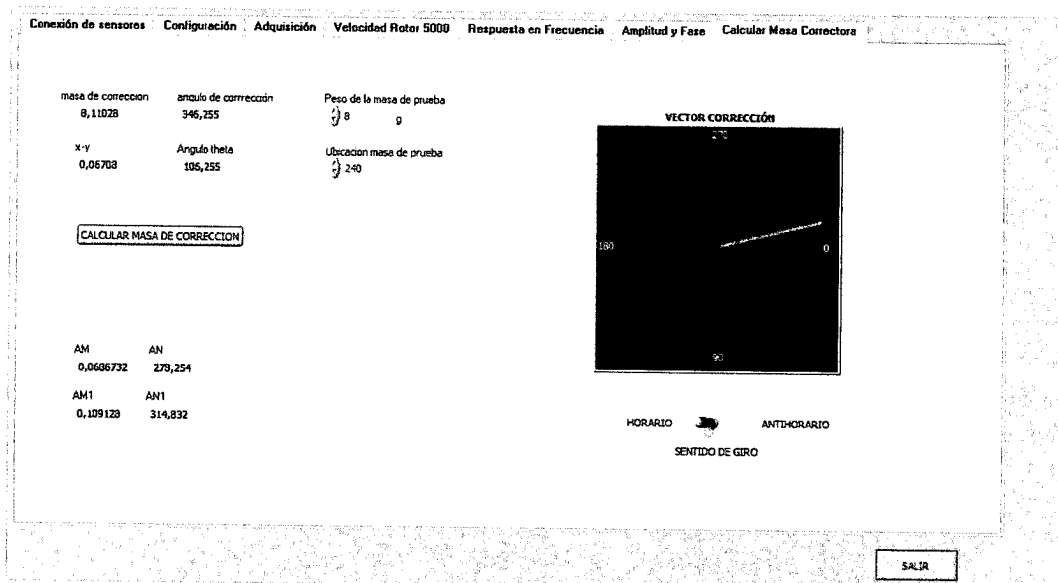


Figura 6.8: Interfaz gráfica etiqueta Calcular Masa Correctora.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

velocidad de giro del rotor en particular. En la figura 6.10 se muestra el enlace de los bloques para obtener el comportamiento deseado. Todo este bloque de programa se ejecuta cuando se oprime el botón procesar sin masa y procesar con masa, aquí se cargan los valores para graficar los espectros correspondientes para el tiempo de toma de data. Los subinstrumentos virtuales utilizados para dichos cálculos son extraídos del toolset de análisis de vibraciones de National Instruments.

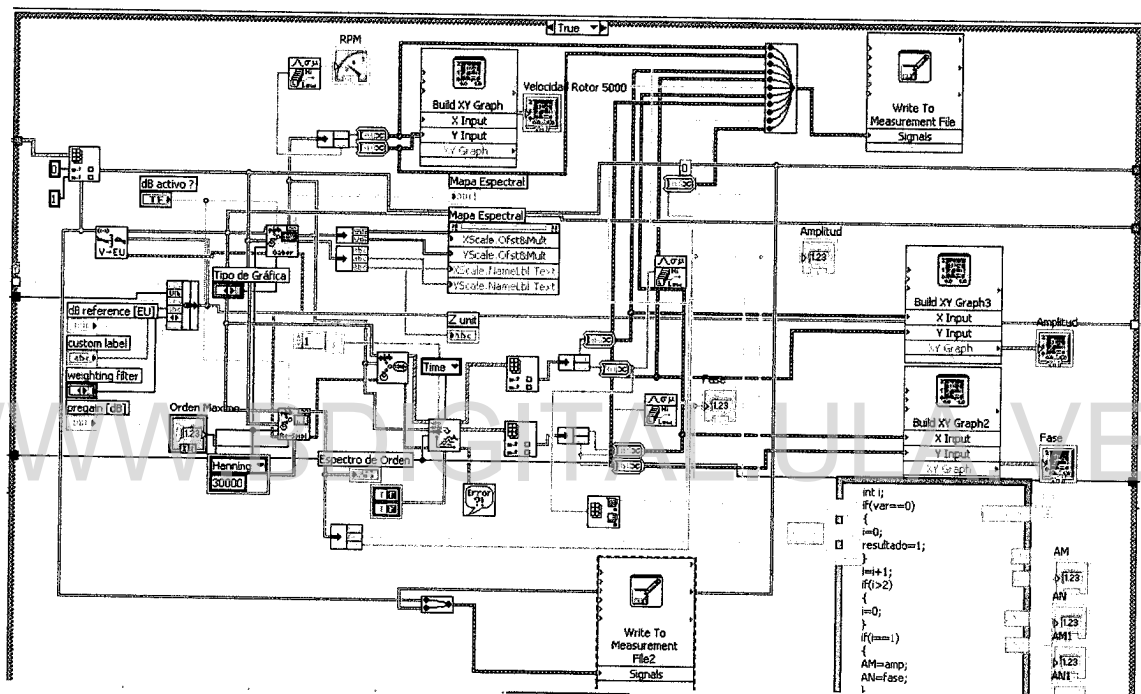


Figura 6.10: Diagrama de Bloques de procesamiento de datos.

En la figura 6.10 se observa un tipo de estructura llamada case structure o estructura de casos la cual tiene un comportamiento similar a un switch de AnsiC donde se ingresan dos casos posibles que son cuando el botón procesar sin masa está oprimido como un estado verdadero y cuando el botón procesar sin masa no se encuentra activo como un estado falso, por lo cual este tipo de estructura es muy útil para eventos del tipo secuencial como el implementado en el programa de balanceo del Rotor 5000.

En la parte inferior derecha de la figura 6.10 se observa un nodo llamado nodo fórmula en el cual se pueden ingresar variables y procesar ecuaciones con las mismas, para el caso particular las variables de entrada son var, amp y fase que corresponden a la cantidad de entradas en la subrutina y la amplitud y fase promedio leída en la

corrida del proceso. Este proceso se ejecuta cuando se oprime el botón llamado procesar sin masa de prueba y procesar con masa de prueba, cargan las diferentes medidas para calcular el balanceo en la siguiente etapa del programa. Estas variables son llamadas AM(amplitud sin masa de prueba), AM1(amplitud con masa de prueba), AN(ángulo de fase sin masa de prueba), AN1(ángulo de fase con masa de prueba) las cuales son cargadas en la ventana de calcular masa correctora.

Luego de adquirir, procesar y almacenar los datos obtenidos por los instrumentos de medida de vibraciones se procede a calcular la masa correctora y la posición en donde se debe ingresar dicha masa para balancear el rotor 5000. En la figura 6.11 se observa la implementación del algoritmo de cálculo por el método vectorial para el balanceo en un plano programado en LabVIEW con la información investigada en la sección 2.2.3. El procesamiento se facilita mucho ya que se trabajaron con sistemas de numeros complejos para especificar amplitud y ángulo realizando operaciones de manera sencilla en cuanto a ingreso de código.

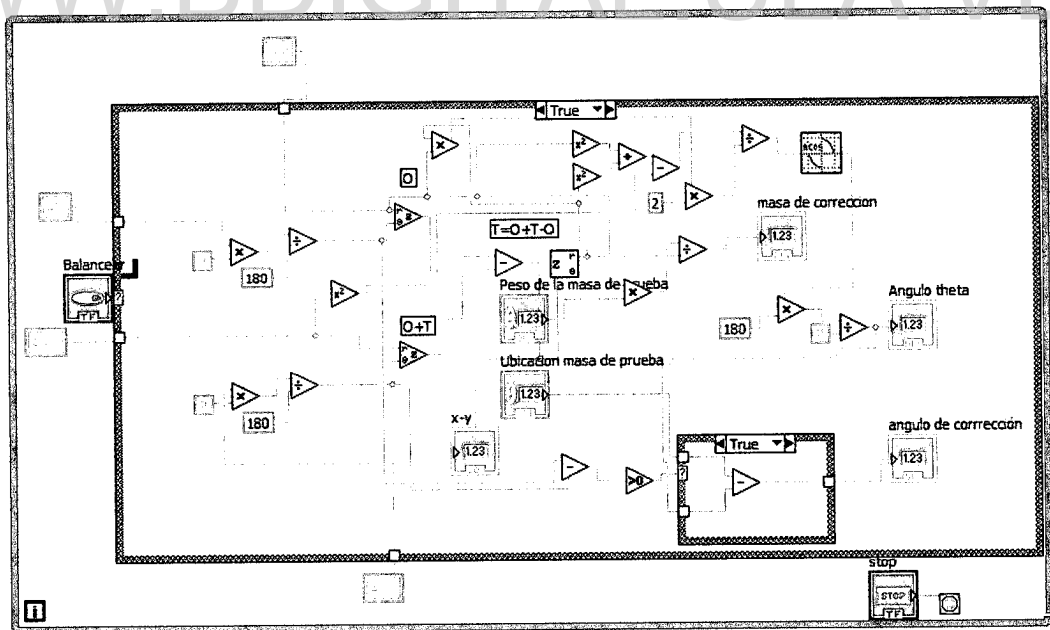


Figura 6.11: Diagrama de Bloques algoritmo balanceo en un plano.

de balanceo en un plano como código para lograr la ejecución de las tareas que se necesitan en el sistema de adquisición y procesamiento de datos de vibración.

6.2. Módulo Balanceo en dos planos

El instrumento virtual para balancear el rotor en dos planos por el método de coeficientes de influencia realizado consta de muchas partes semejantes al instrumento para balancear en un plano, con algunas diferencias correspondientes al método y algunos sistemas de gráficas descubiertos durante la fase exploratoria del toolset de vibraciones de National Instruments. En la figura 6.12 se puede observar la interfaz gráfica del instrumento virtual diseñado para balancear el rotor 5000 en dos planos de corrección. Consta al igual que el instrumento visto en la sección 6.1 de una serie de etiquetas nombradas de la misma forma con las mismas funciones que el balanceo en un plano. Para efectos prácticos solo se mencionarán las etiquetas donde se encuentran cambios notables con respecto al balanceo en un plano.

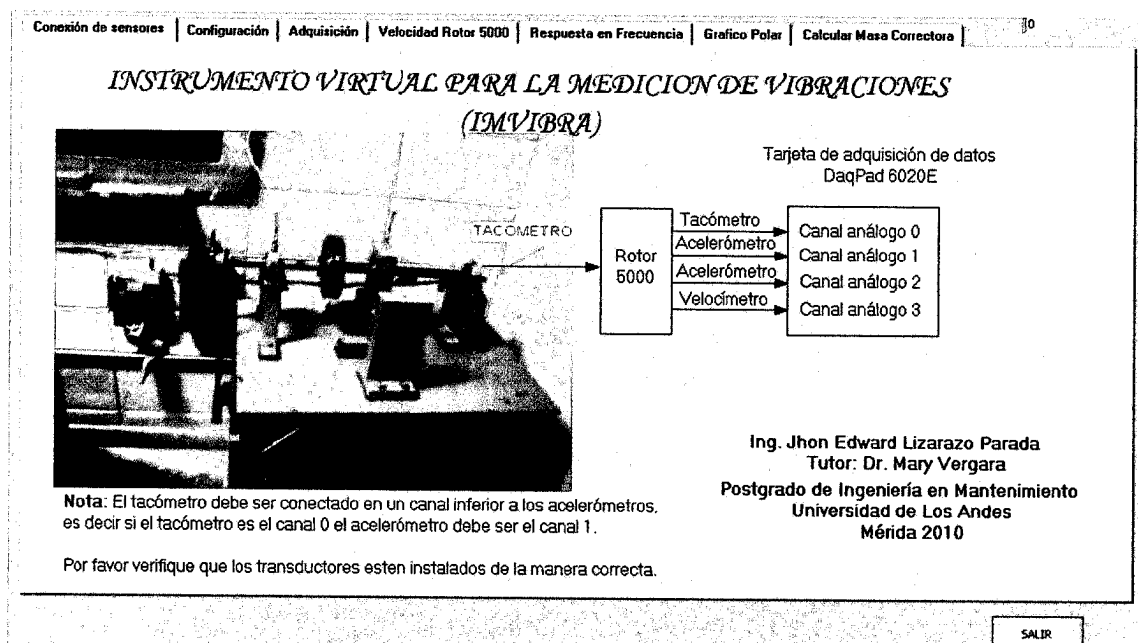


Figura 6.12: Interfaz gráfica para balanceo en dos planos.

En la parte superior observan los diferentes nombres de las etiquetas para este

instrumento virtual conexión de sensores, configuración, adquisición, velocidad Rotor 5000, Respuesta en frecuencia, Gráfico polar y Calcular masa correctora. Los cuales tienen las siguientes funciones:

- **Conexión de sensores** muestra como deben ser conectados los transductores al igual que la sección 6.1.
- **Configuración** Es semejante a la ventana configuración de la sección 6.1 con la única diferencia que se muestran mas canales porque se utilizan mas transductores para la operación, es decir, dos acelerómetros. En la figura 6.13 se observa la ventana con la etiqueta configuración.

Conexión de sensores | Configuración | Adquisición | Velocidad Rotor 5000 | Respuesta en Frecuencia | Gráfico Polar | Calcular Masa Correctora

INSTRUMENTO VIRTUAL PARA LA MEDICION DE VIBRACIONES
Configuración tarjeta de adquisición de Datos DAQPad-6020E

Número de tarjeta: 1 Frecuencia de Muestreo: 10000 (Hz) Tacómetro Pulso/Rev: 1

Color	Nombre	Canal Analógico	Alimentación de la DAQ	Acople de corriente	Configuración entrada	Range (V)	Sensitivity (mV/EU)	Unit
Tachómetro	Tach	0	+	DC	ref. single-ended	10.00	1000.00	1
Acelerómetro	56V	1	+	DC	ref. single-ended	10.00	100.00	g
Acelerómetro 2	56V	2	+	DC	ref. single-ended	10.00	100.00	g
Velocímetro	56V	3	+	DC	ref. single-ended	10.00	100.00	g

Información de Canal
dB reference [EU]: 1.0E+0 weighting filter: Linear custom label: EU

Instrumento Virtual Para la Medición de Vibraciones

SALIR

Figura 6.13: Interfaz gráfica Etiqueta Configuración.

- **Adquisición** Esta etiqueta es quizás la que varía más con respecto a la vista en la sección 6.1 ya que el procedimiento a seguir es mas largo que el anterior. Se deben tomar tres mediciones diferentes una sin masa de prueba para medir desbalance, otra con una masa de prueba en el plano cercano, y una última con una masa de prueba puesta en el plano lejano. Se le agrega un botón más llamado INICIAR ENSAYO el cual se encarga de inicializar las variables en cero para ser

trabajadas sin ningún valor anterior y también habilita el botón procesar sin masa de prueba para empezar el procesamiento de la data. En la figura 6.14 se muestra la ventana de la interfaz para la tarea de adquirir los datos de los acelerómetros y posterior procesamiento. También se muestran los gráficos del tacómetro y los acelerómetros para el tiempo de toma de la muestra.

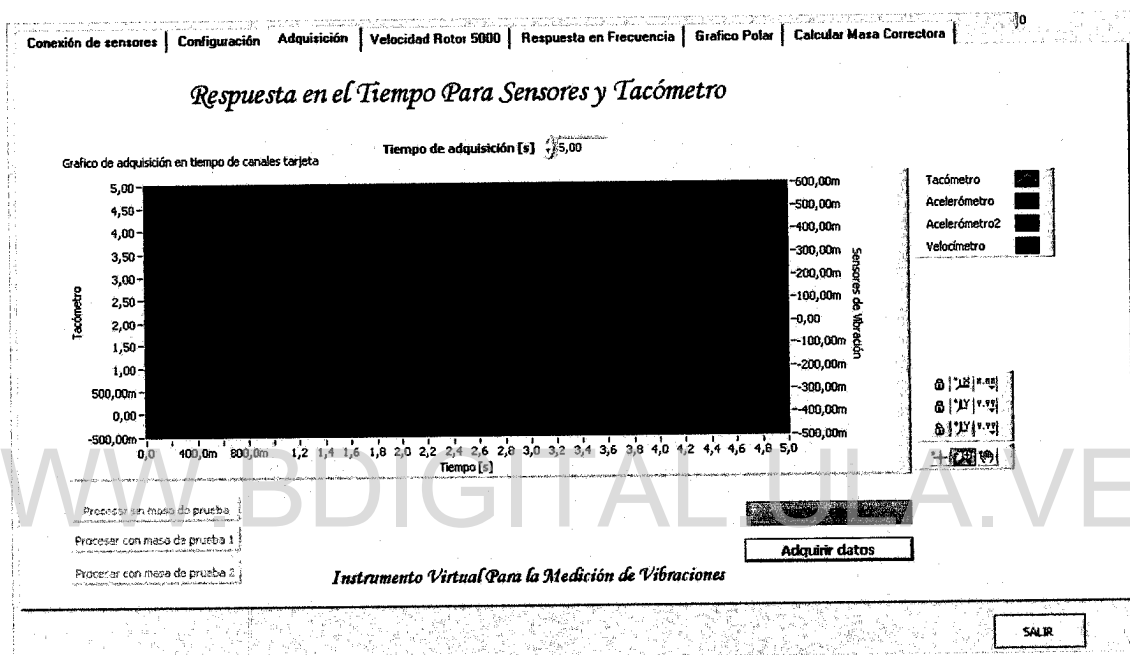


Figura 6.14: Interfaz gráfica Etiqueta Adquisición.

- **Velocidad Rotor 5000** Esta etiqueta es exactamente igual a la vista en la sección 6.1 para visualizar el perfil de velocidad del rotor durante la toma de la data.
- **Respuesta en frecuencia** Esta etiqueta en particular tiene una diferencia con la vista en la sección 6.1 ya que el diagrama espectral no se encuentra acotado en el rango visible sino que se muestra la frecuencia detectada a la misma velocidad de rotación para el plano del extremo cercano y otra gráfica para la frecuencia del plano del extremo lejano del rotor 5000. Aquí se puede observar la amplitud detectada en el orden 1 que corresponde a la amplitud de frecuencia a la misma velocidad de rotación. También se muestran opciones para modificar la cantidad

de órdenes que se desean ver en el gráfico y la configuración del filtro que se debe aplicar para separar dicha frecuencia sin interferencias o ruidos electromagnéticos, y los valores numéricos para la amplitud en gravedades como un promedio de los datos obtenidos y un valor para la velocidad de vibración en pulgadas por segundo como una integración numérica que se agregó para conocer dicho valor. En la figura 6.15 se muestra la etiqueta Respuesta en frecuencia con todos sus componentes.

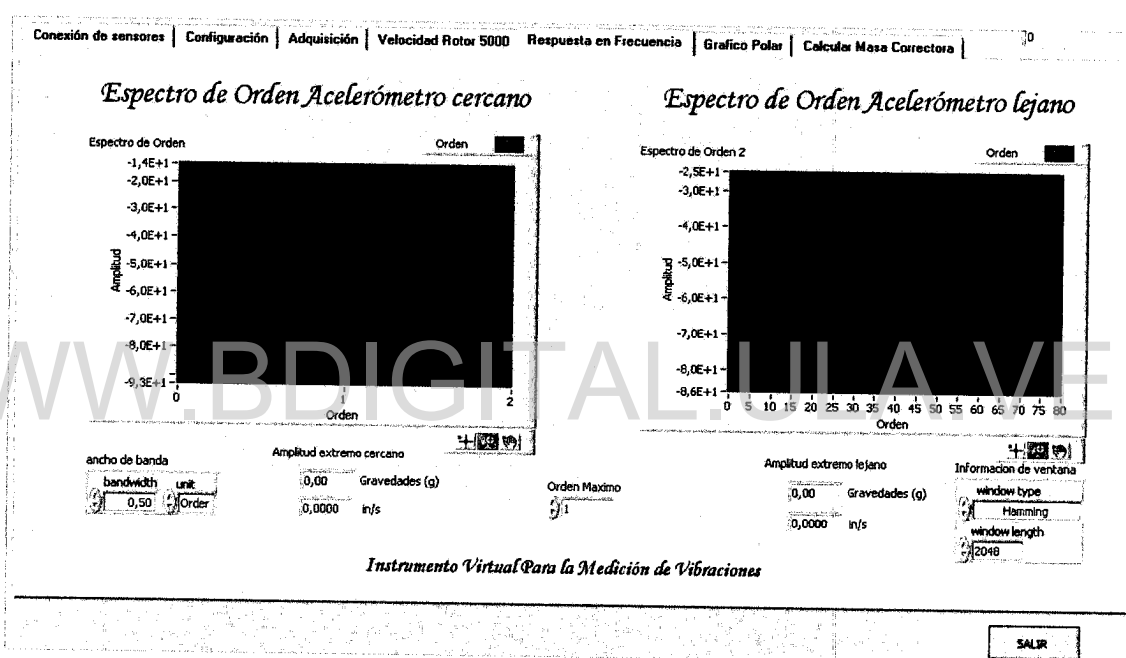


Figura 6.15: Interfaz gráfica Etiqueta Respuesta en Frecuencia.

- **Gráfico polar** Esta ventana es adicional al módulo de balanceo en un plano ya que es un gráfico informativo de la variación del ángulo de fase con respecto a la velocidad de rotación en cada uno de los planos de medición. Es uno de los gráficos mas utilizados para comprender la ubicación de la excentricidad de la masa con respecto al eje de rotación de la máquina. En la figura 6.16 se muestra la ventana de Gráficos polares para los dos planos de medición.
- **Calcular masa correctora** Esta ventana es ejecutada una vez que son tomadas todas las medidas y procesadas para calcular el desbalance entre cada medida.

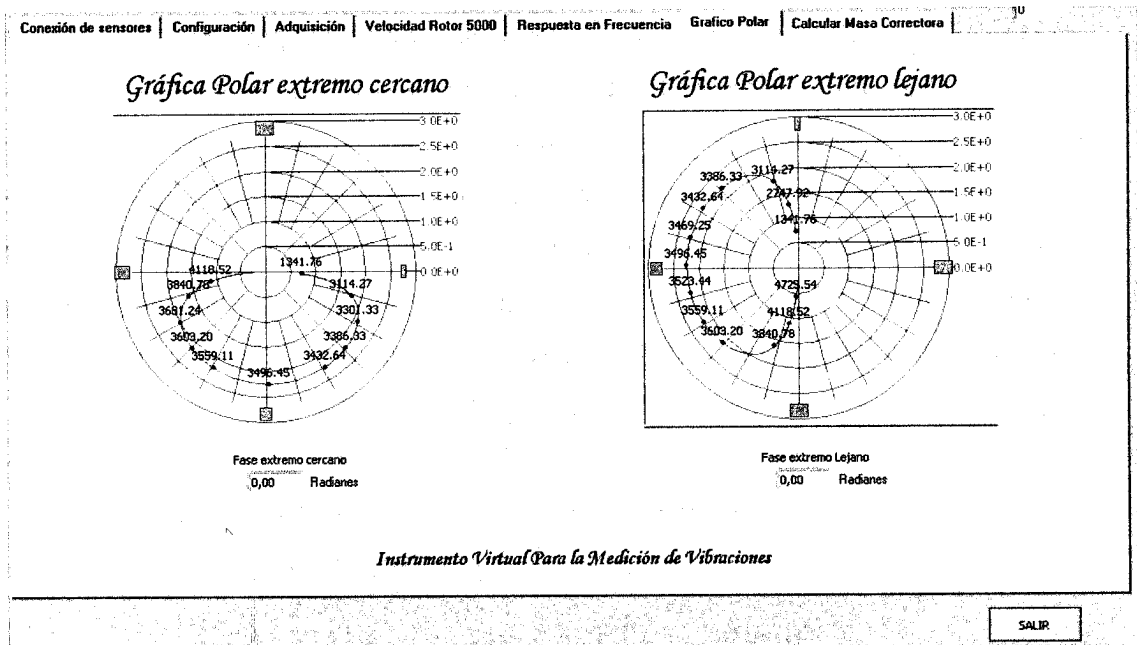


Figura 6.16: Interfaz gráfica Etiqueta Gráfico polar.

Cuando se pulsa el botón llamado CALCULAR MASA DE CORRECCIÓN se procesan los datos cargados en cada una de las medidas y se calcula un valor de la masa de corrección y ángulo de ubicación de la misma con respecto a la referencia para cada uno de los extremos lejano y cercano. En la figura 6.17 se muestra la etiqueta de calcular masa correctora con todos sus indicadores numéricos de las variables procesadas.

Como se indicó en la sección 6.1 labVIEW posee dos tipos de ventanas de programación para un instrumento virtual, una que es la correspondiente a la interfaz gráfica y otra al diagrama de bloques que hace que la interfaz gráfica funcione de la manera correcta o programada.

6.2.1. Diagrama de Bloques Para Balanceo en dos Planos

De manera similar al instrumento virtual para balancear el rotor 5000 en un plano se necesita un diagrama de bloques para programar todas las funciones de los eventos que realizan el proceso de balanceo en dos planos. En la figura 6.17 se muestra el diagrama de bloques correspondiente a la configuración de los canales analógicos digitales para leer

los transductores de aceleración 736T de wilcoxon provistos para esta tarea. A diferencia de la configuración del instrumento virtual para balancear en un plano se observa un subinstrumento virtual llamado “AI cfg” el cual contiene toda la información de los canales en un arreglo para presentar de una manera mas ordenada los enlaces del diagrama de bloques. Luego de pasar la información cargada en la ventana configuración por el AI cfg se genera una tarea que lleva toda esta información a un bloque de lectura de canal análogo digital (todo esto se carga luego de presionar el botón llamado adquirir datos en la ventana con etiqueta adquisición).

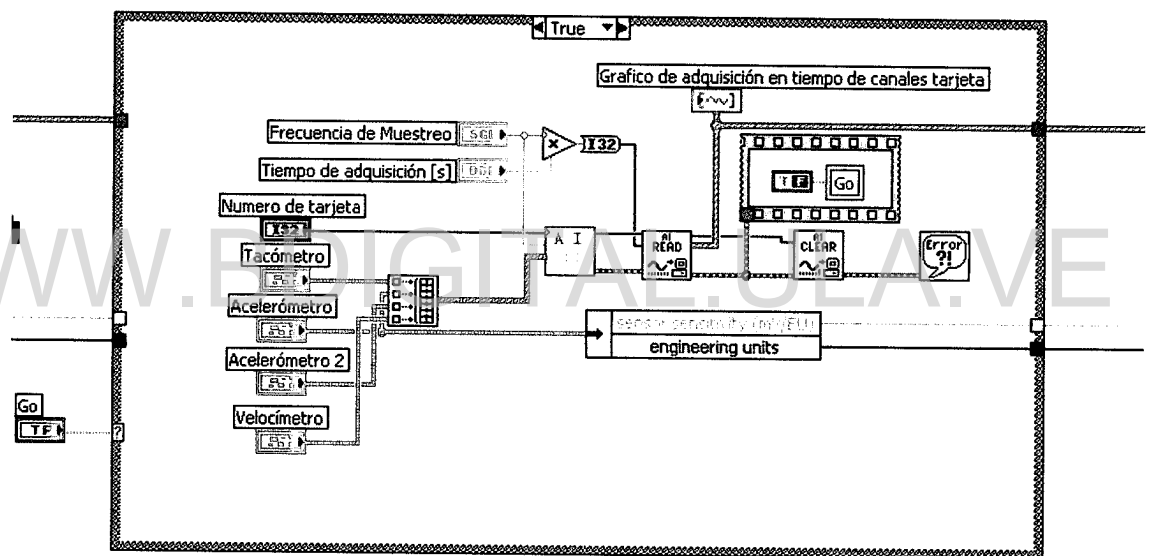


Figura 6.17: Diagrama de bloques configuración de los canales para balanceo en dos planos.

El diagrama de bloques de la figura 6.17 ejecuta las tareas de recolectar la data y almacenar en un buffer en la memoria de la computadora para luego procesarla presionando el botón de la interfaz gráfica llamado procesar sin masa de prueba, procesar con masa 1 y procesar con masa 2. Estos tres botones ejecutan la misma subrutina con algunas diferencias entre cada uno en cuanto a forma de almacenar la data en una variable tipo arreglo. En la figura 6.18 se muestra el fragmento de código principal para el almacenamiento de la data en variables y de la misma forma realizar los cálculos.

Se le llama procesar data específicamente a almacenar la data en las variables reconocidas de cada una de las medidas tomadas con el instrumento virtual para medir

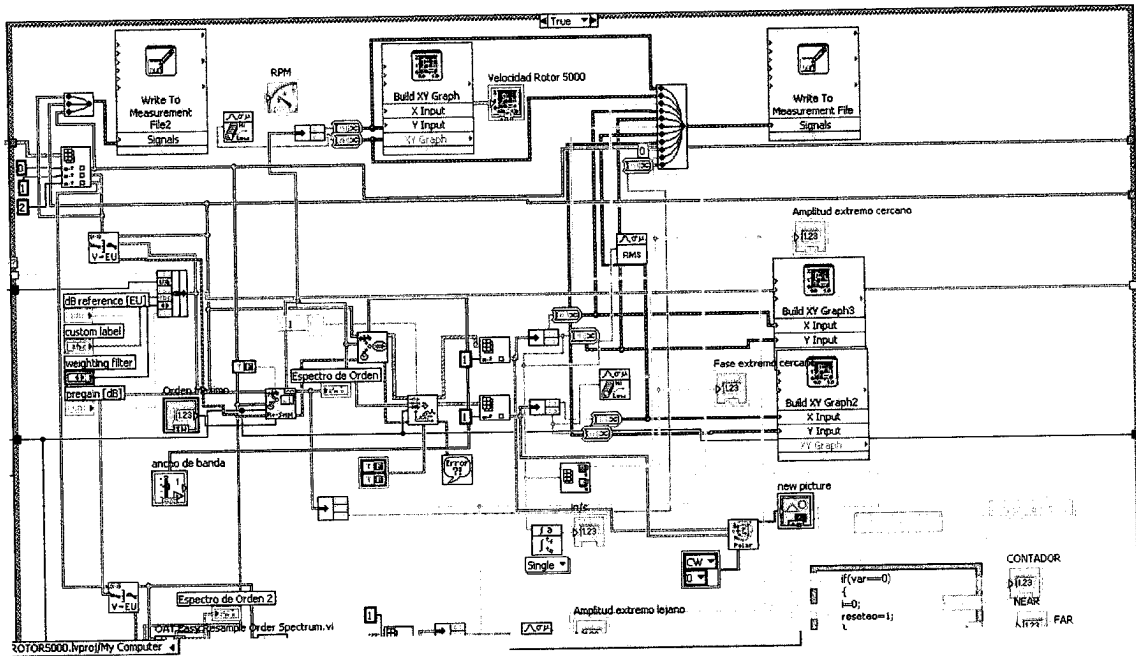


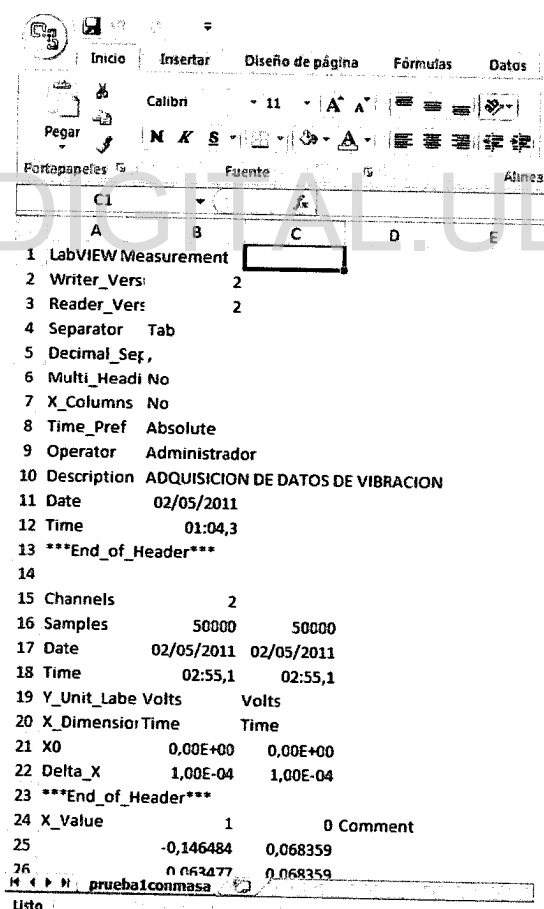
Figura 6.18: Diagrama de Bloques Para procesar data.

vibraciones sea sin masa, con masa 1, y con masa 2. A su vez se le llama procesar a cargar la data en los correspondientes bloques de transformación de tiempo a frecuencia y visualizar los resultados en cada una de las etiquetas propiamente dichas para observaciones en el sitio (velocidad rotor 5000, Respuesta en Frecuencia, y gráfico polar). Todas estas ventanas son actualizadas cada vez que se presiona uno de los tres botones mencionados anteriormente. En la figura 6.18 se muestra el diagrama de bloques con los subinstrumentos virtuales del toolset de análisis de vibraciones para separación de órdenes de vibración de los dos extremos del rotor. También se tienen instrumentos express para almacenamiento de la data en un archivo que se puede leer con microsoft Excel o bloc de notas. Este bloque se llama Write To Measurement File el cual escribe un archivo con extensión (.lvm) con la data de vibración. Este instrumento despliega una interfaz que pregunta la ubicación donde el usuario desea almacenar el archivo con la data leída por los transductores. En la programación del instrumento virtual se generan dos archivos que contienen data importante del procesamiento los cuales se diferencian porque un archivo contiene la data “leída por los transductores.” en el tiempo y el segundo archivo contiene la data “procesada por el programa” de visualización de

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

los resultados en frecuencia. Para arrojar los resultados de este instrumento en particular se realiza un promedio de las medias de amplitud y fase presentada en cada lectura, también se realiza una integración numérica de regla trapezoidal para generar la conversión de aceleración de vibración a velocidad de vibración, de esta manera se puede obtener un valor que describe la vibración del sistema en la medida tomada. El archivo numero uno generado por el programa para la data leída por los canales análogos digitales se muestran en la figura 6.19 donde se observan un encabezado que explica parámetros de configuración tales como fecha, hora, número de canales, número de muestras tomadas, y tres columnas con los datos leídos por el sistema para el tacómetro, el acelerómetro 1 y el acelerómetro 2.



	A	B	C	D	E
1	LabVIEW Measurement				
2	Writer_Vers:	2			
3	Reader_Vers:	2			
4	Separator	Tab			
5	Decimal_Seq,				
6	Multi_Head	No			
7	X_Columns	No			
8	Time_Pref	Absolute			
9	Operator	Administrador			
10	Description	ADQUISICION DE DATOS DE VIBRACION			
11	Date	02/05/2011			
12	Time	01:04,3			
13	***End_of_Header***				
14					
15	Channels	2			
16	Samples	50000	50000		
17	Date	02/05/2011	02/05/2011		
18	Time	02:55,1	02:55,1		
19	Y_Unit_Label	Volts	Volts		
20	X_Dimension	Time	Time		
21	X0	0,00E+00	0,00E+00		
22	Delta_X	1,00E-04	1,00E-04		
23	***End_of_Header***				
24	X_Value	1	0 Comment		
25		-0,146484	0,068359		
26		0,063477	0,068359		
27		prueba1conmasa			

Figura 6.19: Archivo generado para guardar la data en computadora.

parámetros como el número de canales configurados, número de muestras para cada medida, y contiene toda la data de las gráficas que se cargaron en las etiquetas de análisis frecuencial y velocidad del rotor. En la figura 6.20 se muestra el contenido del archivo abierto con Microsoft Excel para los datos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
15 Channels	11											
16 Samples	136	136	1	130	130	1	130	130	1	1	1	1024
17 Date	02/05/2011	02/05/2011	02/05/2011	02/05/2011	02/05/2011	02/05/2011	02/05/2011	02/05/2011	02/05/2011	02/05/2011	02/05/2011	02/05/2011
18 Time	02:55,5	02:55,5	02:55,5	02:55,5	02:55,5	02:55,5	02:55,5	02:55,5	02:55,5	02:55,5	02:55,5	02:55,5
19 X_Dimension	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time	Time
20 X0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
21 Delta_X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22 ***End_of_Header***												
23 X_Value	Untitled	Untitled 1	Untitled 2	Untitled 3	Untitled 4	Untitled 5	Untitled 6	Untitled 7	Untitled 8	Untitled 9	Untitled 10	
24	0,01144	1630,43429	0,02015	0,12184	0,018512	1,8548	0,12184	1,837844	0	0,001465	0,027449	
25	0,04824	1630,43458		0,15864	0,020039		0,15864	1,881725			0,052249	
26	0,08504	1630,43462		0,19544	0,013326		0,19544	2,02271			0,045009	
27	0,12184	1630,43467		0,23224	0,011565		0,23224	1,526938			0,035009	
28	0,15864	1630,43476		0,26904	0,013881		0,26904	1,518166			0,02449	
29	0,19544	1630,43511		0,30584	0,009672		0,30584	1,865898			0,01532	
30	0,23224	1630,43464		0,34264	0,002667		0,34264	3,95459			0,008508	
31	0,26904	1630,4347		0,37944	0,002381		0,37944	2,765414			0,004162	
32	0,30584	1630,43501		0,41624	0,006079		0,41624	2,258421			0,001785	
33	0,34264	1630,43489		0,45304	0,013125		0,45304	2,184595			0,000677	
34	0,37944	1630,43495		0,48984	0,018066		0,48984	2,3187			0,00024	
35	0,41624	1630,43495		0,52664	0,01545		0,52664	2,565876			9,37E-05	
36	0,45304	1630,43514		0,56344	0,010671		0,56344	1,992349			5,11E-05	
37	0,48984	1630,43508		0,60024	0,017318		0,60024	1,447629			3,88E-05	
38	0,52664	1630,43457		0,63704	0,018341		0,63704	1,548098			3,37E-05	
39	0,56344	1630,43476		0,67384	0,013603		0,67384	1,283666			2,90E-05	
40	0,61024	1630,43476		0,71074	0,011834		0,71074	1,152247			2,37E-05	

Figura 6.20: Archivo generado para guardar la data procesada en la computadora.

En la figura 6.20 la columna que lleva por título untitled contiene los valores de tiempo en que fue procesada cada medición de velocidad, es decir, “es el eje de las abscisas (tiempo)”, en este caso se refiere al tiempo en el cual el tacómetro marcó la señal de referencia para el cálculo de fase y la velocidad del rotor. La columna llamada untitled1 representa los valores cargados en este instante de tiempo para la velocidad del Rotor 5000, en la figura 6.20 el valor inicial de lectura de la velocidad de giro del rotor es 1630,43429 (Con estas dos columnas se puede obtener una gráfica de velocidad en RPM vs Tiempo). La columna llamada untitled2 contiene el valor máximo del arreglo correspondiente a la amplitud de vibración para la frecuencia fundamental

del rotor. La columna llamada untitled3 muestra el instante de tiempo en el cual se leyó la componente de amplitud de vibración de la frecuencia de vibración a 1xRPM. La columna llamada untitled4 muestra los valores de amplitud filtrados a la frecuencia fundamental de vibración del rotor (Con las columnas 3 y 4 se puede obtener un gráfico de Amplitud de vibración vs Tiempo). La columna llamada Untitled5 muestra el valor promedio de la fase en radianes para la lectura tomada durante toda la muestra. La columna llamada Untitled6 muestra los valores del tiempo en que se adquirió la lectura de fase con respecto a la referencia. La columna llamada Untitled7 visualiza en un arreglo los valores de las muestras tomadas en cada lectura de fase con respecto al punto de referencia del tacómetro, si se procesa esta data y se calcula el promedio de este arreglo debe arrojar el mismo valor de la columna Untitled5 (Con los valores de las columnas 6 y 7 se obtiene un gráfico de Fase vs Tiempo). La columna llamada Untitled9 contiene el diferencial o delta de cálculo del espectro de orden, este delta es usado en la normalización que se hace para llevar el valor de la frecuencia fundamental a 1 con la transformada de Gabor. En la columna llamada Untitled 10 se almacenan valores correspondientes a la gráfica del espectro de orden 1 separados por unidades múltiples de delta sucesivamente. De esta manera se tiene acceso a toda la data tomada en un ensayo de balanceo en la computadora de trabajo, logrando un importante registro de los ensayos realizados para luego ser analizados con detalle.

La figura 6.20 muestra la parte de procesamiento de la data después de tomarla. Luego de realizar la toma de toda la data se debe calcular el correspondiente balanceo o el valor del peso de corrección y la ubicación del mismo. Para ello se utiliza el subinstrumento con el algoritmo de balanceo del rotor en dos planos visto en la figura 6.21 el cual contiene el programa para balancear el rotor después de tomar todas las muestras.

El algoritmo observado en la figura 6.21 se ejecuta luego de pulsar el botón llamado calcular masa de corrección ubicado en la etiqueta calcular masa correctora, el cual se habilita cuando se tiene toda la data almacenada en las variables para procesar. Al efectuar este procedimiento se deben tener las variables de entrada llamadas NEAR, FAR, ANGULONEAR, ANGULOFAR para cada una de las muestras, sin masa, con masa 1 y con masa 2 y así obtener unas variables de salida correspondientes a la masa

que se debe agregar en el extremo cercano y lejano al igual que el ángulo con respecto a la referencia las cuales llevan por nombre peso extremo lejano, peso extremo cercano, ángulo extremo cercano y ángulo extremo lejano.

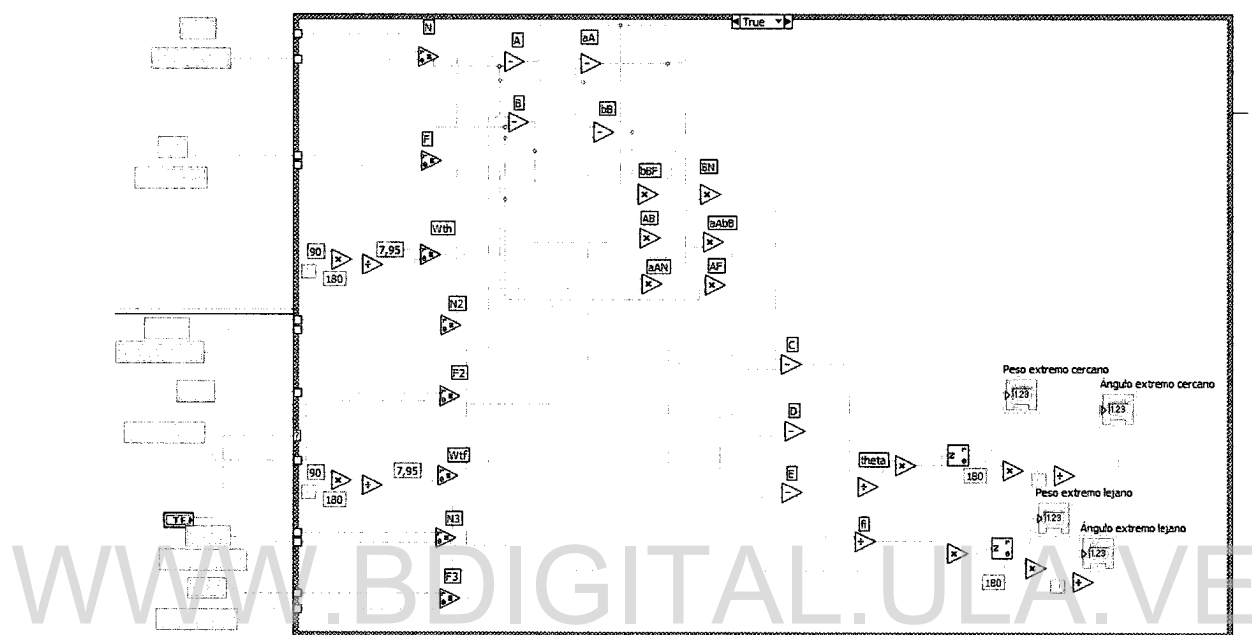


Figura 6.21: Algoritmo de balanceo en dos planos realizado en LabVIEW.

6.3. Módulo Evaluación Severidad Vibratoria

El instrumento virtual para evaluar la severidad vibratoria tiene las mismas partes que los instrumentos vistos en las secciones 6.1 y 6.2 ya que poseen las mismas etiquetas con algunas diferencias que se mencionaran a continuación:

1. En la etiqueta llamada **adquisición** se tienen dos botones llamados adquirir data (el cual cumple la misma función de adquirir la data por el tiempo estipulado) y evaluar severidad vibratoria el cual ejecuta una comparación con respecto a los valores indicados por la norma ISO 10816 la cual establece valores tolerables según el tipo de maquina que se esta analizando. El Rotor 5000 se encuentra dentro de las máquinas que tienen el motor separado y es un rotor rígido para balancearlo antes de su primera velocidad crítica. En la etiqueta llamada severidad

de vibración se encuentra la tabla correspondiente a la norma, la cual indica los valores (0,03 a 0,09 in/s para una máquina nueva o reacondicionada, 0,09 a 0,18 in/s a una máquina que puede operar de manera indefinida, de 0,18 a 0,28 in/s es un nivel preventivo de que la máquina no puede operar un tiempo prolongado y el nivel excesivo de vibración se obtiene en 0,28 in/s en adelante lo cual indica que el nivel de vibración puede provocar daños) los datos de vibración para esta medida se deben comparar con la lectura de velocidad de la vibración.

2. En la etiqueta llamada Severidad de vibración se muestra una tabla con los valores correspondientes a la norma ISO 10816, la cual reglamenta los puntos críticos de vibración en una máquina según el tamaño de la misma. Al lado derecho se muestran los valores de la velocidad de vibración adquirida por el transductor de aceleración luego de procesarla con un método de integración trapezoidal.

Estas son las principales diferencias en cuanto a los módulos de las secciones 6.1 y 6.2 ya que poseen las misma etiquetas con los mismos gráficos en cada una. Se recomienda correr este módulo luego de efectuar el balanceo para obtener un valor a comparar con la lectura antes de balancear y evaluar el estado de la máquina.

6.3.1. Diagrama de Bloques Para Evaluación de Severidad Vibratoria.

En la sección 6.3 se observó la interfaz gráfica del módulo de severidad de vibración en el Rotor 5000 ahora se explica el programa que hace que esta interfaz funcione de la manera adecuada para ejecutar las tareas necesarias en este algoritmo.

El programa es sencillo ya que para evaluar severidad vibratoria se tienen unas tablas de normas con límites entre cada categoría muy precisos, por lo tanto el software debe tener sentencias específicas para cada categoría. Dicho en lenguaje de programación sentencias tipo if, then, else. En la figura 6.22 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al algoritmo implementado.

Todo este esquema es muy similar al procesamiento visto en la sección 6.1 ya que cuando se pulsa el botón evaluar severidad vibratoria se cargan los datos de la misma forma con la única diferencia que esta evaluación se realiza una única vez para comparar

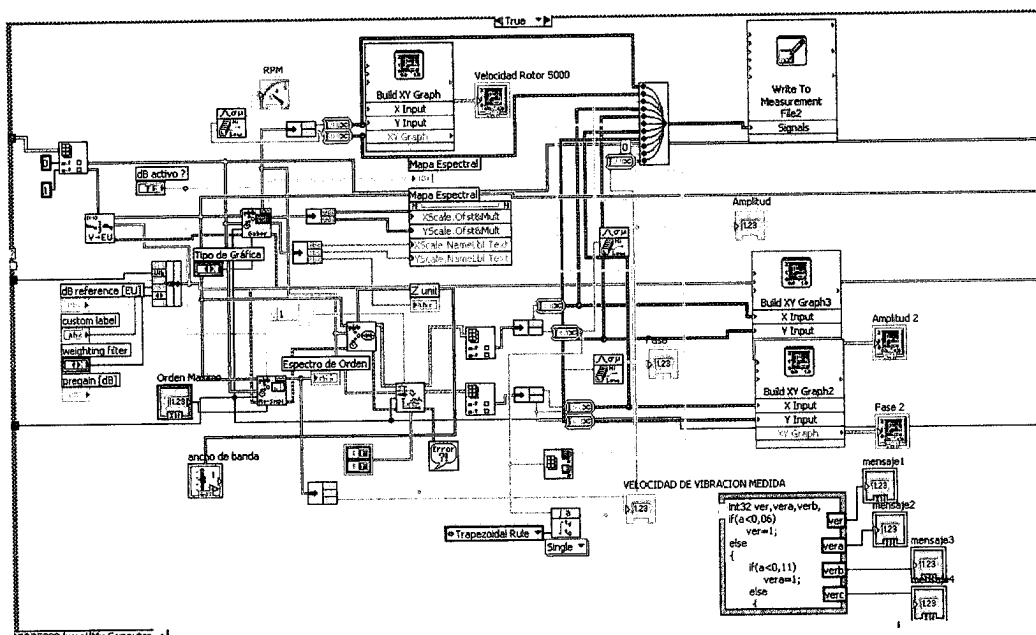


Figura 6.22: Algoritmo de Severidad de vibración realizado en LabVIEW.

los valores estipulados por la tabla de la norma ISO 10816 como se observa en la parte inferior derecha, donde se ejecuta un nodo fórmula que establece las diferentes sentencias para separar cada categoría.

Los mensajes que se muestran al hacer un análisis de severidad vibratoria son comúnmente llamados ventanas pop-pop ya que cuando se define si la máquina esta dentro de los rangos o no, se almacenan en variables que luego activarán una bandera para cada uno de los mensajes de dicha ventana. En la figura 6.23 se muestra uno de los mensajes configurados para una de las categorías que es “EL NIVEL DE VIBRACION ES DE UNA MAQUINA RECIEN PUESTA EN FUNCIONAMIENTO O REACON-DICIONADA”. De esta manera se programan cada uno de los mensajes que avisan al usuario si la máquina luego de balancear está en operación adecuada.

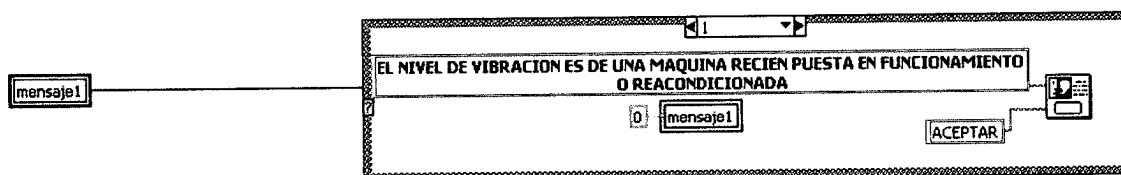


Figura 6.23: Ventana pop-pop para mensaje en LabVIEW.

Parte III

Análisis de Resultados

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Capítulo 7

Análisis de Resultados

Durante el desarrollo de este capítulo se explican los diferentes experimentos realizados con el banco de pruebas ROTOR 5000 seguido de algunos detalles que surgen en la implementación de sistemas de medición.

Luego de acoplar todo el sistema de adquisición de datos lo adecuado es realizar la validación de los datos para así probar los diferentes módulos programados en el instrumento virtual. Para ello se realizó una toma de data inicial almacenando los valores en un archivo (.lvm) explicado en la sección 6.2.1 del capítulo 6. Para la debida prueba del instrumento virtual se adquieren datos con la tarjeta de adquisición DaqPad-6020E del tacómetro conectado en el canal análogo 0 y el acelerómetro conectado en el canal análogo 1. En la figura 7.1 se muestra la data obtenida del tacómetro diseñado, la cual muestra pulsos simétricos con una amplitud de 5 Voltios compatible con señales digitales TTL conforme a lo visto en el capítulo 4. Esta es la prueba inicial para verificar que tanto la tarjeta de adquisición de datos y el circuito del tacómetro están realizando la tarea para la que fueron diseñados.

En el paso siguiente se obtienen datos del transductor o acelerómetro en el canal 1 y se observan los resultados en la figura 7.2, estos datos son tomados directamente del transductor de aceleración muestreando continuamente el canal 0 (tacómetro) y el canal 1 (acelerómetro) de la tarjeta de adquisición de datos con una tasa de muestreo de 10Khz para observar componentes de frecuencia hasta 5Khz de acuerdo al teorema de Nyquist.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

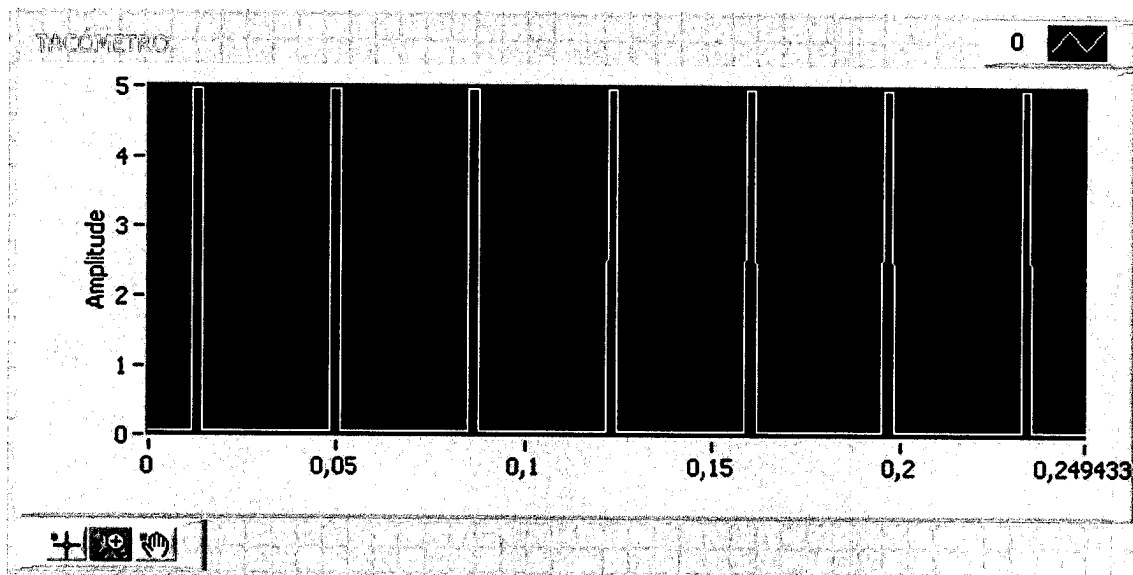


Figura 7.1: Prueba de Tacómetro en instrumento virtual.

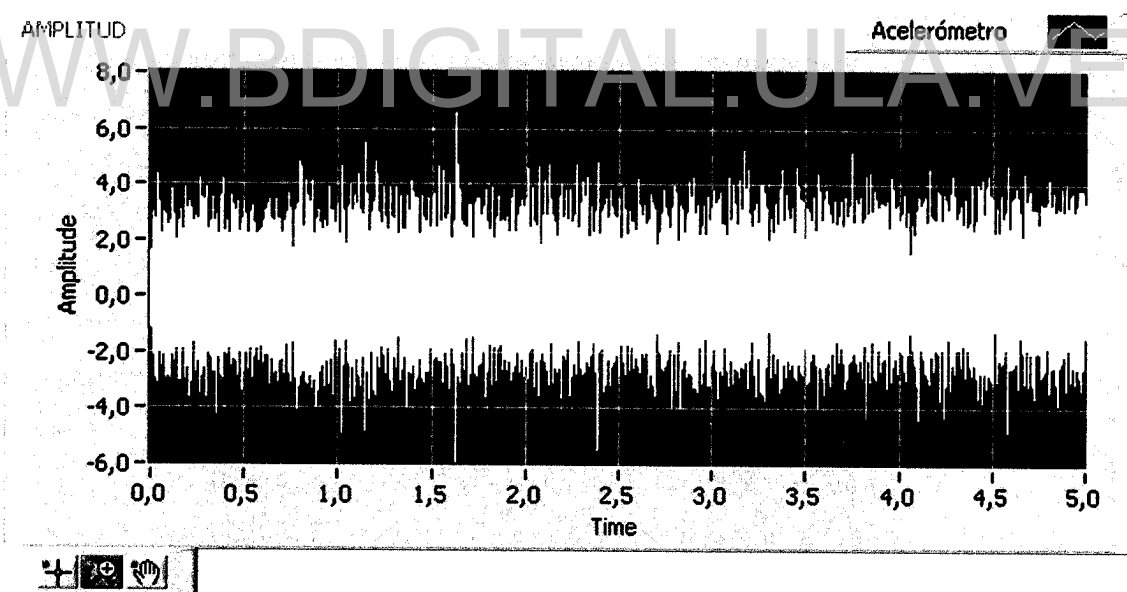


Figura 7.2: Prueba de Acelerómetro en instrumento virtual.

El contenido espectral o resultado de la serie de Fourier para los datos tomados durante 5 segundos se muestra en la figura 7.3.

Los gráficos 7.1, 7.2 y 7.3 fueron tomados directamente del instrumento virtual para la adquisición de datos de vibración del rotor 5000. Fueron realizados para verificar el

correcto funcionamiento del sistema completo, (tacómetro, transductores y tarjeta de adquisición de datos).

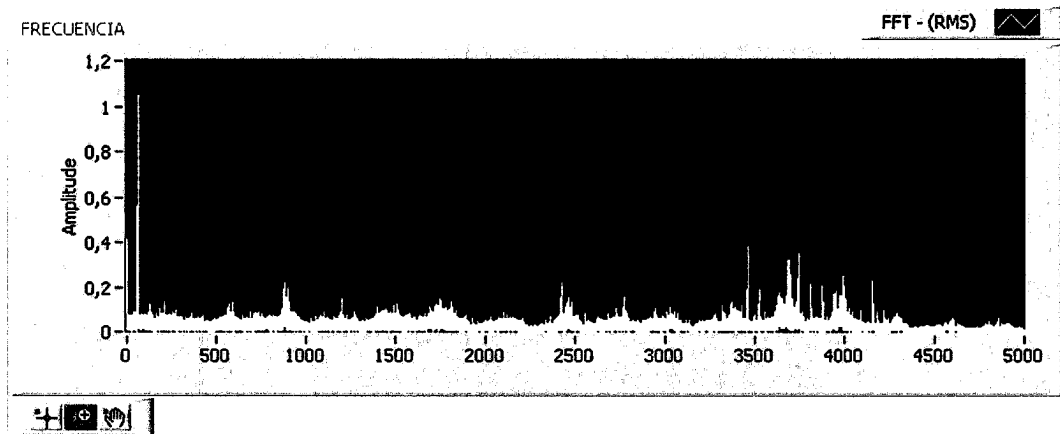


Figura 7.3: *Contenido Espectral de data recolectada.*

Esta fue la prueba inicial del sistema de adquisición de datos de vibraciones del rotor 5000, se profundizó acerca del funcionamiento de los transductores y configuración de la tarjeta de adquisición de datos para obtener los mejores resultados en la prueba, por lo mismo la muestra fue satisfactoria para la etapa de diseño del instrumento virtual. Luego de validar el tacómetro y los transductores en cuanto a amplitud y frecuencia, el siguiente paso es comprobar las lecturas de fase entre el transductor de aceleración y la referencia del tacómetro utilizada para dicho análisis. En la figura 7.4 se observa la primera muestra tomada para la fase del rotor 5000.

Las pruebas iniciales para la lectura de fase no fueron satisfactorias ya que se observó una fase variable para la frecuencia de rotación de la máquina. (Esta fué la mayor dificultad que se presentó durante el desarrollo del trabajo de grado), ya que no se sabía con certeza el motivo para que esta medida fuese variable, en la figura 7.4 se observa una clara tendencia a disminuir la lectura de fase. Según [38] este tipo de falla se presenta cuando el rotor se encuentra en la frecuencia de resonancia, o cuando se tiene algún tipo de soltura mecánica. Por ello se realizaron mas pruebas modificando la velocidad de rotación para variar la frecuencia fundamental alejándola de la frecuencia de resonancia si ese era el problema, obteniendo los mismos resultados negativos de la prueba inicial. La figura 7.5 muestra la señal de tacómetro con la señal filtrada a la

frecuencia de rotación del rotor 5000 la cual explica el concepto de fase en el tiempo. La configuración mecánica del rotor 5000 no se había modificado ya que la mesa que sujetaba toda la estructura se había diseñado previamente en [1] pero ya que no se tienen los datos deseados se procede a verificar todos los apoyos de la mesa obteniendo los mismos resultados de las pruebas iniciales sin ningún tipo de avance.

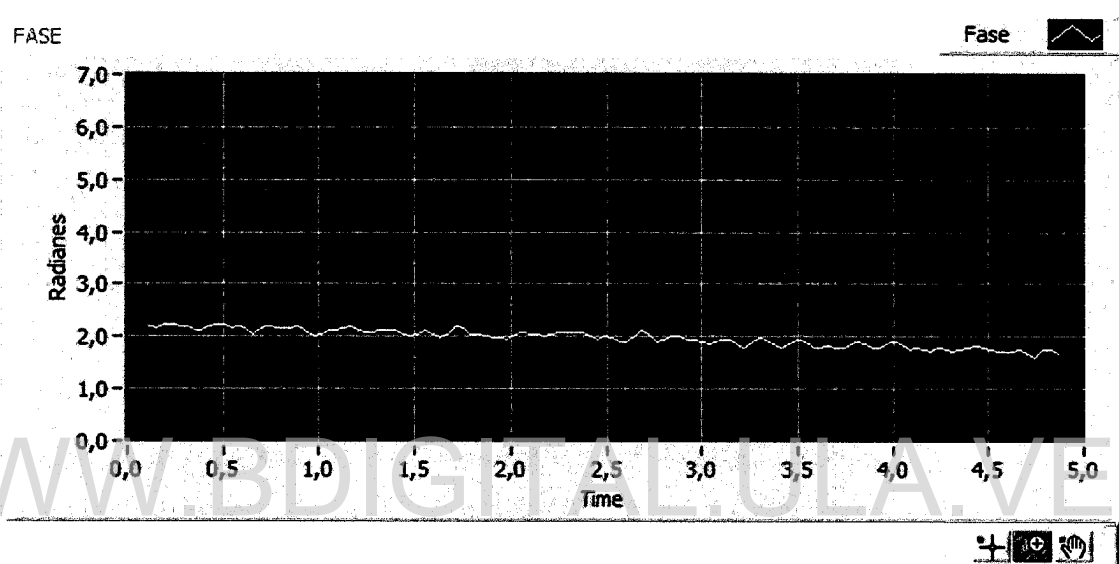


Figura 7.4: Gráfica de fase vs tiempo.

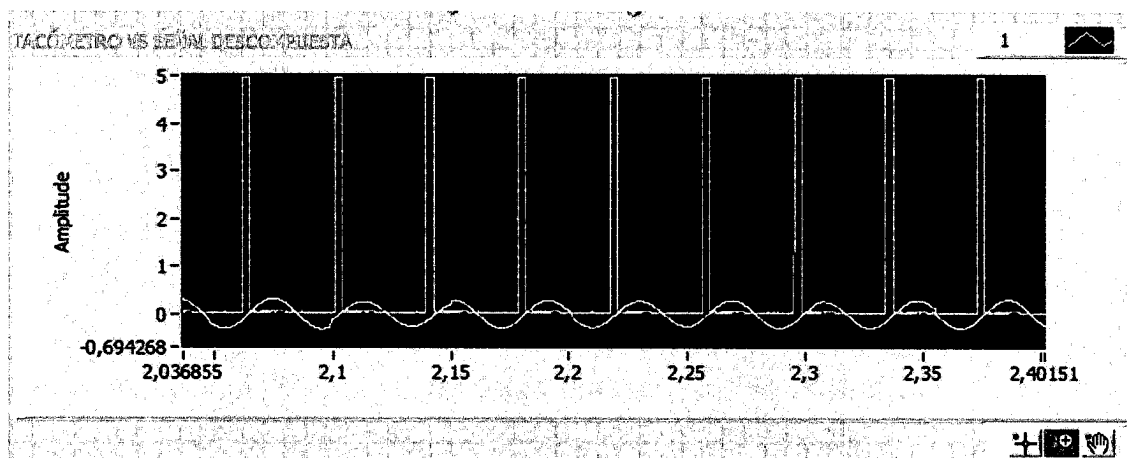


Figura 7.5: Gráfica de tacómetro y señal descompuesta en frecuencia de rotación vs tiempo.

Agrupando conceptos de la bibliografía se llegó a la conclusión falsa que la estructura estaba “entrando en resonancia” ya que la mesa se encuentra simplemente apoyada en

4 extremos cuadrados a una altura de 80 cm del nivel del suelo por ello se decide soldar a la estructura ángulos para tratar de rigidizar la mesa de montaje del rotor 5000.

Luego de obtener los datos del tacómetro y acelerómetro para realizar un análisis de fase se observa la misma tendencia obteniendo la misma variación, pero para observarlo mejor se realizó una toma de 60 segundos. En la figura 7.6 se observa el cambio de fase en el tiempo entre la señal del acelerómetro y el tacómetro.

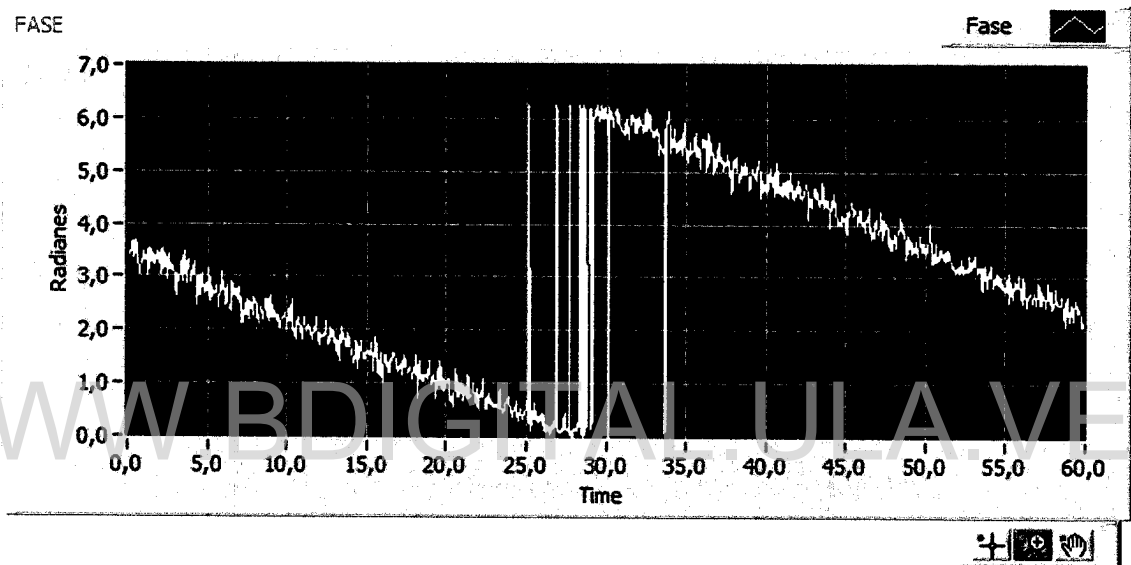


Figura 7.6: Datos de Fase en 60 segundos.

7.1. Procedimiento para especificar el problema de Fase

Luego de observar esta tendencia se inició un procedimiento de descarte de posibilidades ya que el experimento posee gran número de variables según el ensayo, agrupando en los siguientes tipos:

1. *El software de adquisición de datos LabVIEW*: Probablemente el filtro implementado en LabVIEW para la adquisición de los datos está agregando un retraso de fase ya que no existe un filtro ideal que no ocasione un retraso de fase. Pero como el filtro se implementa por software es poco probable que esto ocurra. Para

verificar el procesamiento de los datos luego de adquirirlos se comparó el filtrado entre LabVIEW y MATLAB.

2. *Hardware de adquisición de datos:* Como se observó en el capítulo 3 sección 3.2.2 las entradas análogas necesitan ser filtradas para las frecuencias que se desean adquirir con una tarjeta de adquisición de datos, por lo tanto se implementó un filtro simple pasa bajos a la entrada del canal análogo 1 de la tarjeta de adquisición ya que las señales que se obtienen son muy pequeñas y existe la posibilidad de capturar ruido de alta frecuencia que podría ocasionar este corrimiento en la señal de fase.
3. Luego de comprobar el software y el hardware de adquisición se procede a verificar toda la estructura mecánica del Rotor 5000 ya que no hay otra variable que pueda estar afectando el experimento. Para ello se debe desarmar y ajustar las diferentes piezas mecánicas de Rotor 5000.

7.1.1. LabVIEW vs MATLAB

Para comparar el filtrado entre los dos programas de diferente fabricante se realizó un programa que carga los datos leídos con antelación por la tarjeta de adquisición de datos DaqPad-6020E en sus canales análogos digitales 0 y 1 respectivamente, tanto en LabVIEW como en Matlab, ya que en la interfaz realizada en el instrumento virtual se guardan dos archivos con los datos, el primero de ellos es la data cruda de los canales sin ningún tipo de filtro y el segundo los datos procesados con filtro, calculo de fase y amplitud de vibración. Debido a esto se toman lecturas con el instrumento de la misma forma mencionada en el capítulo 6, se guardan los archivos para realizar el procesamiento de la siguiente manera:

1. Cargar datos de canal 0 (tacómetro), y canal 1 (acelerómetro).
2. Graficar los datos del tacómetro y acelerómetro en el tiempo.
3. Realizar la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtener el espectro de frecuencias de la señal de vibración captada.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

4. Realizar un filtrado pasa bajos con frecuencia de corte a la frecuencia fundamental de la señal del acelerómetro. (Dicha frecuencia es la frecuencia de rotación del ROTOR 5000).
5. Gráficar el resultado de la señal filtrada y solapar con la señal del tacómetro para verificar la variación de la fase.
6. Observar amplitud y fase de señales en la gráfica para comparar entre los resultados de LabVIEW y Matlab.

En la figura 7.7 se muestra los datos cargados para el acelerómetro en una toma de 30 segundos y así procesar los datos en Matlab realizando el procedimiento antes descrito.

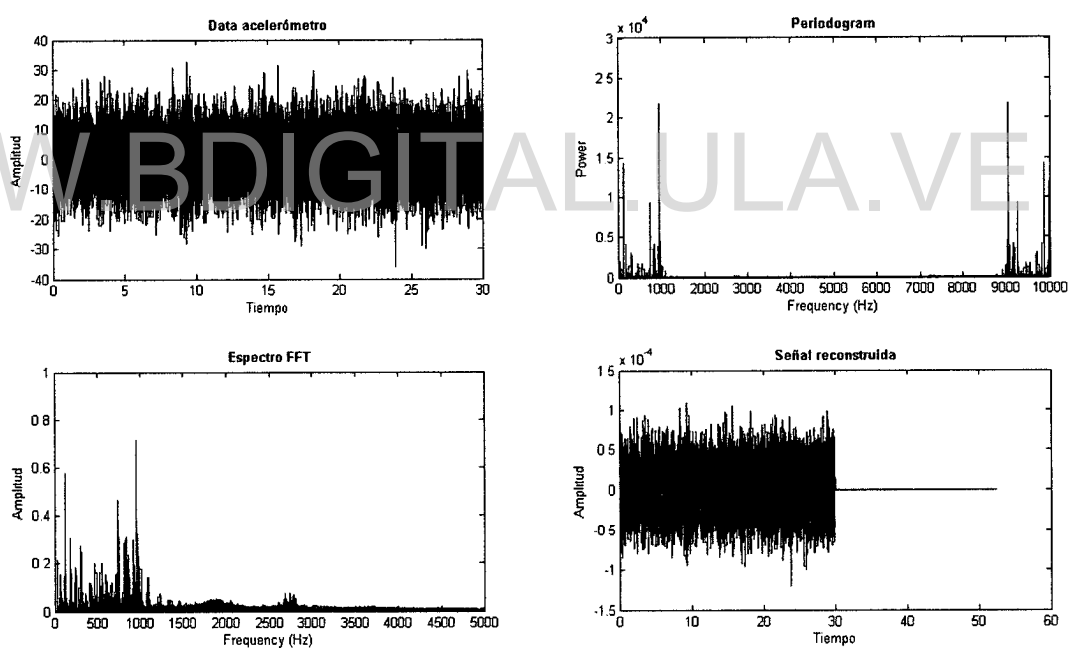


Figura 7.7: Datos de acelerómetro y FFT de 30 segundos en MATLAB.

Luego de cargar los datos en Matlab se realiza el filtrado a la frecuencia fundamental y la reconstrucción de dicha señal filtrada para solaparla con el tacómetro, de la misma manera ver si ocurre un cambio en la fase de la señal del acelerómetro con la señal del tacómetro. El código para realizar las tareas en matlab se puede ver en el apéndice B. La gráfica que lleva por título Data acelerómetro es la señal capturada por la tarjeta

de adquisición de datos para el canal 1 a lo largo de 30 segundos. La gráfica que lleva por título Espectro FFT es el resultado para la transformada rápida de Fourier proporcionada por el programa y la gráfica titulada Señal reconstruida es el resultado de la transformada inversa de Fourier para volver a la señal en el tiempo de la señal del acelerómetro.

En la figura 7.8 se puede observar el espectro conseguido con el filtro hamming y la señal reconstruida para compararla con el tacómetro en el intervalo de tiempo comprendido entre 2.5 y 2.8 segundos de la muestra para compararla con la figura 7.9 la cual contiene la información en el intervalo de tiempo comprendido entre 21.5 y 22 segundos de toma de muestra. observando un cambio de fase de aproximadamente 90° .

Obteniendo esta información de Matlab se compara con otro programa realizado en LabVIEW con el mismo procedimiento de Matlab.

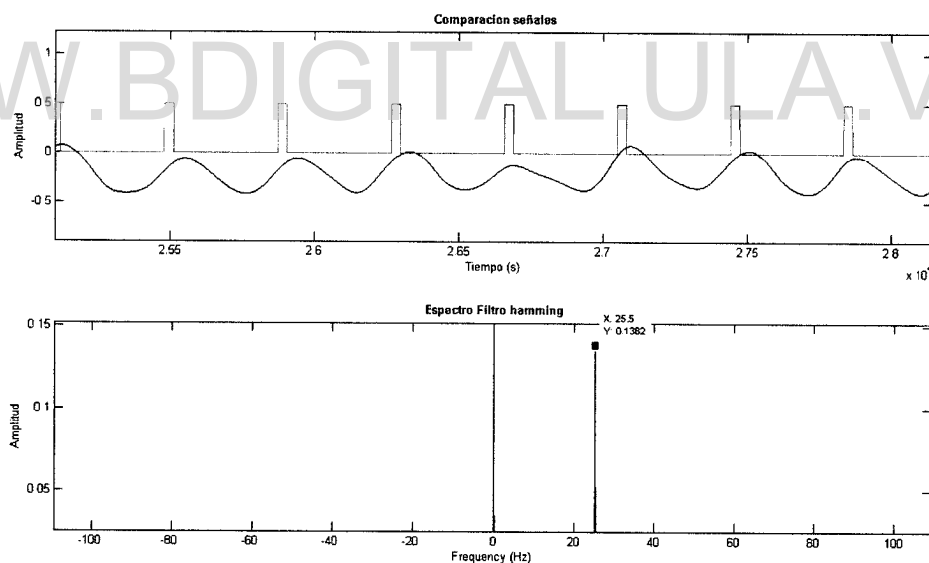


Figura 7.8: Datos de acelerómetro filtrados y tacómetro en MATLAB intervalo 2.5 a 2.8 segundos.

En la figura 7.10 se observa resultados para los datos cargados en LabVIEW, gráficos de amplitud de aceleración en el tiempo y la respuesta a la transformada de Fourier como diagrama espectral. Comparando con la figura 7.7 los datos corresponden tanto para LabVIEW como para Matlab, en LabVIEW la frecuencia fundamental encontrada es 25,47 Hz y en Matlab la frecuencia fundamental encontrada es 25,5 Hz. (Se debe

tomar en cuenta que los datos fueron tomados en unidades de voltios con una ganancia de 1, por ello la amplitud en los gráficos de acelerómetro vs tiempo se encuentran en el orden de 20V. El voltaje que en realidad se tomó por la tarjeta de adquisición de datos es 2V y no 20V). Para tal efecto en ambos programas se toma el voltaje multiplicado por 10.

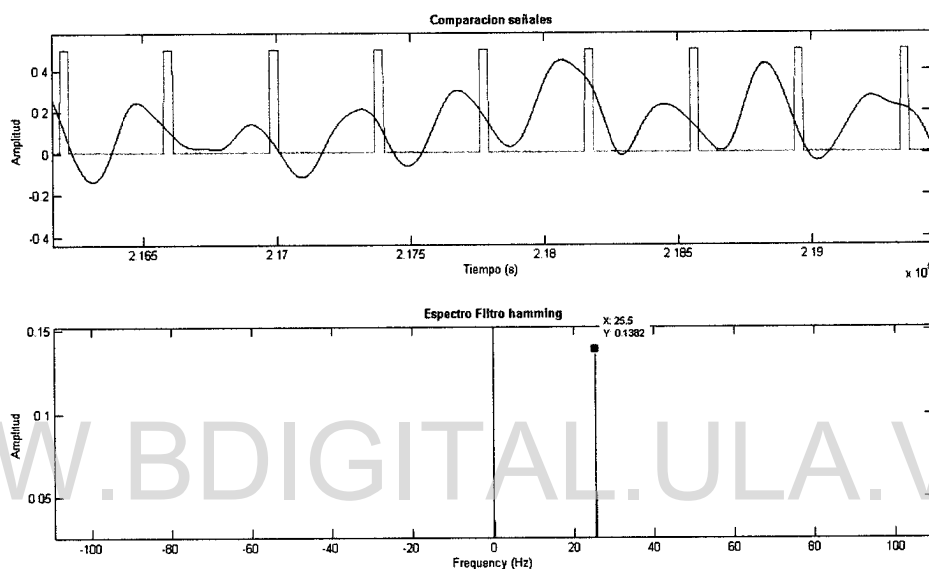


Figura 7.9: Datos de acelerómetro filtrados y tacómetro en MATLAB intervalo 21.5 a 22 segundos.

En la figura 7.11 se muestran los datos obtenidos en LabVIEW para la señal del acelerómetro filtrada a la frecuencia fundamental solapada con la señal del tacómetro en el intervalo de tiempo de 2.5 a 2.8 segundos al igual que la figura 7.8 obtenida con Matlab, se puede apreciar que las gráficas son semejantes, el filtro aplicado en Matlab es de retardo de fase 0.

En la figura 7.12 se muestra los resultados en LabVIEW para el intervalo de 21.5 a 22 segundos donde claramente se observa un cambio de fase entre la señal del intervalo 2.5 a 2.8 segundos, lo cual no debería suceder ya que la fase debe permanecer constante a lo largo del tiempo en una muestra. En las figuras 7.8 y 7.9 que son los resultados de Matlab se observa un cambio aproximadamente igual al cambio de fase en LabVIEW. Luego de realizar esta prueba se llega a la conclusión que el procesamiento de los datos no está agregando un retraso de fase en la muestra y no es la causa del desplazamiento

de fase observado en rotor 5000.

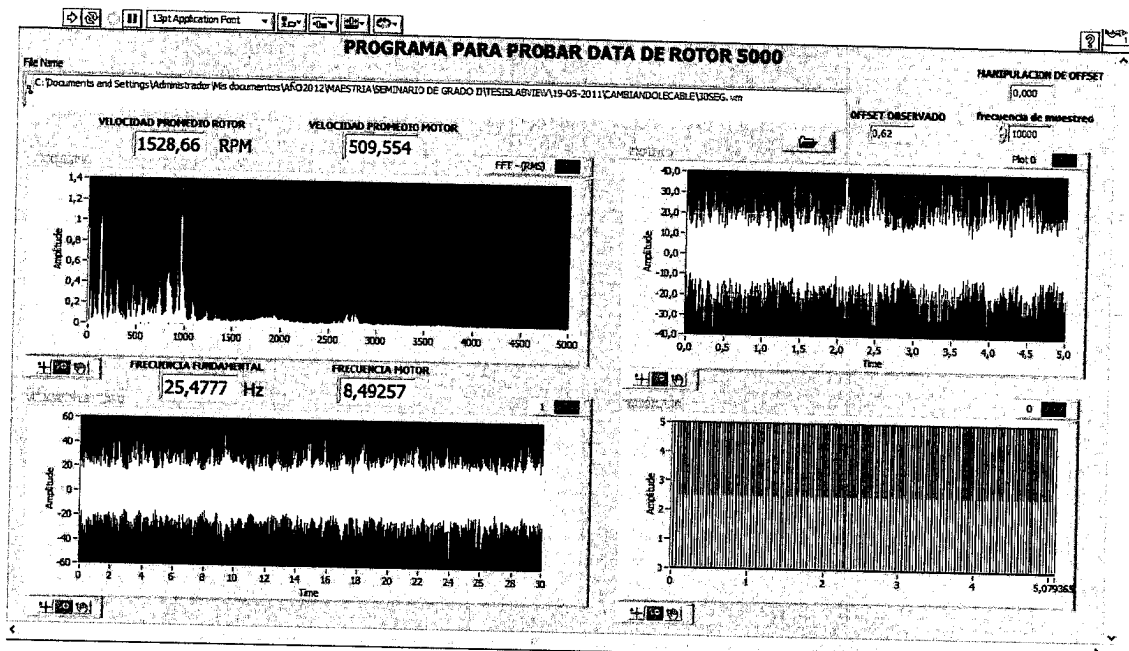


Figura 7.10: Datos de acelerómetro en LabVIEW.

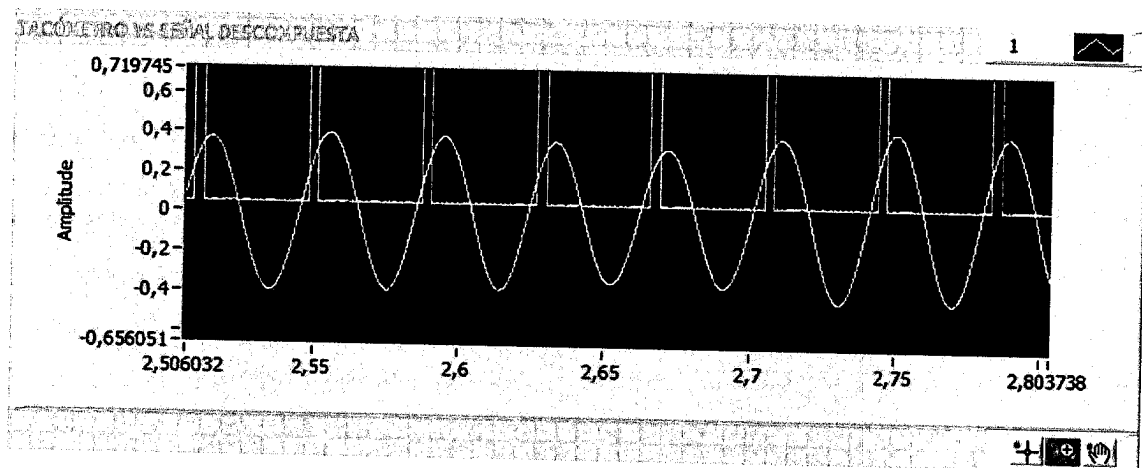


Figura 7.11: Datos de acelerómetro solapado con tacómetro en LabVIEW. Intervalo 2.5 a 2.8 segundos

En la figura 7.13 se muestra la variación de la fase a lo largo del tiempo ya que el toolset de vibraciones de LabVIEW agrega una función que determina la fase en cada ciclo de la señal filtrada. En matlab se puede hacer esta función pero ya habiendo concluido que este no es el problema con simple observación se decidió no realizarla.

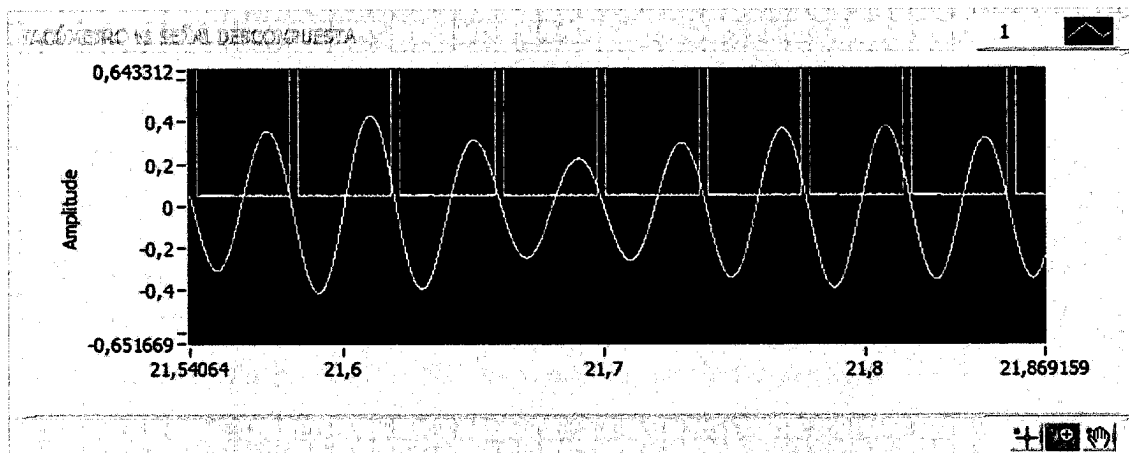


Figura 7.12: Datos de acelerómetro solapado con tacómetro en LabVIEW. Intervalo 21.5 a 21.9 segundos

En la figura 7.13 se observa mas claramente la variación de fase que tiene en el tiempo el rotor 5000 y se observa un cambio abrupto alrededor de los 10 segundos de toma de muestra donde varía de 0° a 360° , el valor de la fase en grados en 2.5 segundos está alrededor de 50° y en 21.5 segundos se encuentra alrededor de 280° lo cual tiene sentido observando las figuras 7.10 y 7.11.

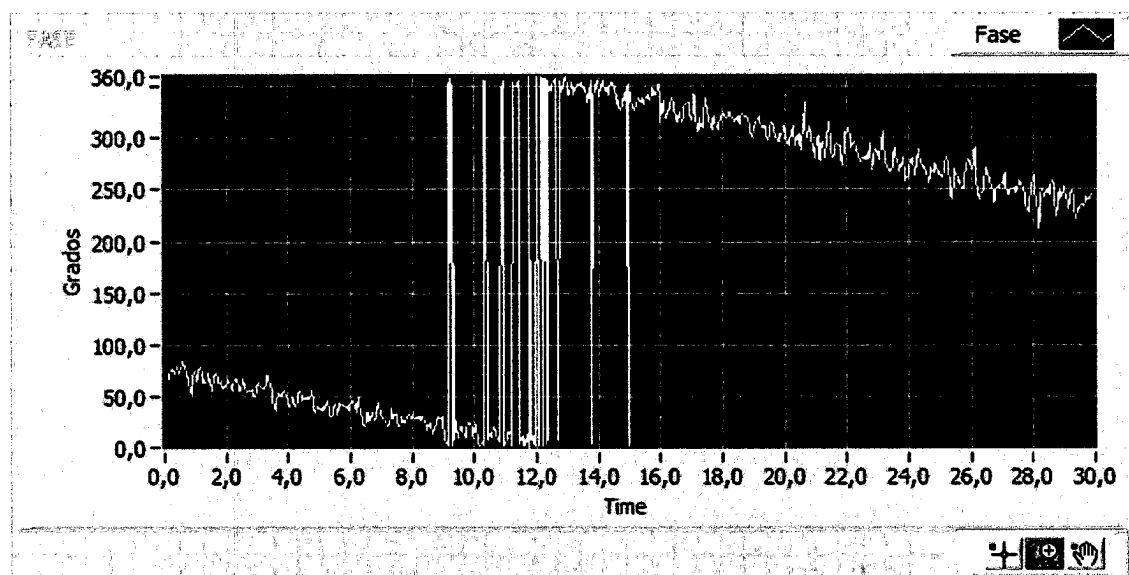


Figura 7.13: Diagrama de fase en 30 segundos

7.1.2. Validación Hardware de Adquisición de datos

Para verificar el hardware de adquisición de datos se tomaron datos con un osciloscopio digital muestreando a 10Khz la misma señal proporcionada por el transductor de aceleración y el tacómetro para descartar una posible falla en el programa de adquisición de la tarjeta DaqPad-6020E. Ya que se puede cargar datos en cualquiera de los programas diseñados en la sección 7.1.1 con la única dificultad de no poder visualizarlos en LabVIEW porque la función que carga datos solo admite archivos (.lvm) y no cualquier extensión de archivo generado con datos, en cambio Matlab acepta cualquier extensión de archivo, en tal caso se decide validar los datos con Matlab, por lo tanto se tomaron 10000 muestras equivalentes a 1 segundo con una frecuencia de muestreo de 10Khz y se almacenó en un disquet con el nombre muestra1.CSV la cual es la extensión entregada por el osciloscopio. La toma de un segundo de datos no permite observar el cambio de fase entre el acelerómetro y el tacómetro por lo tanto se realizan varias muestras verificando que cada vez la fase esta ubicada en diferente posición. En la figura 7.14 se observa la primera medida tomada con el osciloscopio para un segundo de muestreo. En la gráfica que lleva por título data acelerómetro se observa la amplitud de vibración a lo largo del tiempo de muestreo. La gráfica que lleva por título espectro FFT es el procesamiento de la transformada de Fourier para los datos almacenados del acelerómetro y la gráfica que lleva por título Señal reconstruida es la señal reconstruida luego de hacer la transformada inversa de Fourier a la señal procesada con anterioridad para comprobar que corresponde a la data inicial tomada.

Luego el programa arroja la figura 7.15 la cual muestra el resultado del filtro Hamming para la data del acelerómetro con frecuencia de corte a la frecuencia de rotación del ROTOR 5000 obteniendo una frecuencia de rotación aproximada en 25,63 Hz es decir el rotor esta girando a 1537 RPM. La gráfica de comparación de señales es la señal filtrada solapada con la señal del tacómetro en este caso como es para un segundo se observan mas o menos 26 pulsos de tacómetro y no se necesita limitar a un trozo de muestra para observar la comparación gráficamente. A lo largo del segundo de tiempo muestreado no se puede ver claramente una variación de fase por lo tanto se tomó otra muestra de 1 segundo en otro intervalo de tiempo para comparar la fase de la señal de vibración a la misma velocidad de rotación.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

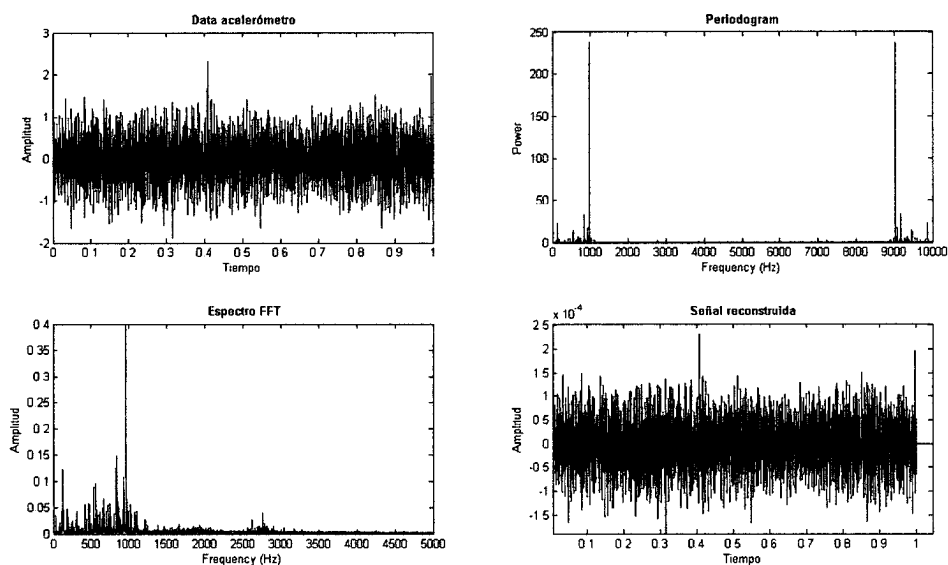


Figura 7.14: Data obtenida con osciloscopio Digital Tektronix. 1 segundo de muestreo

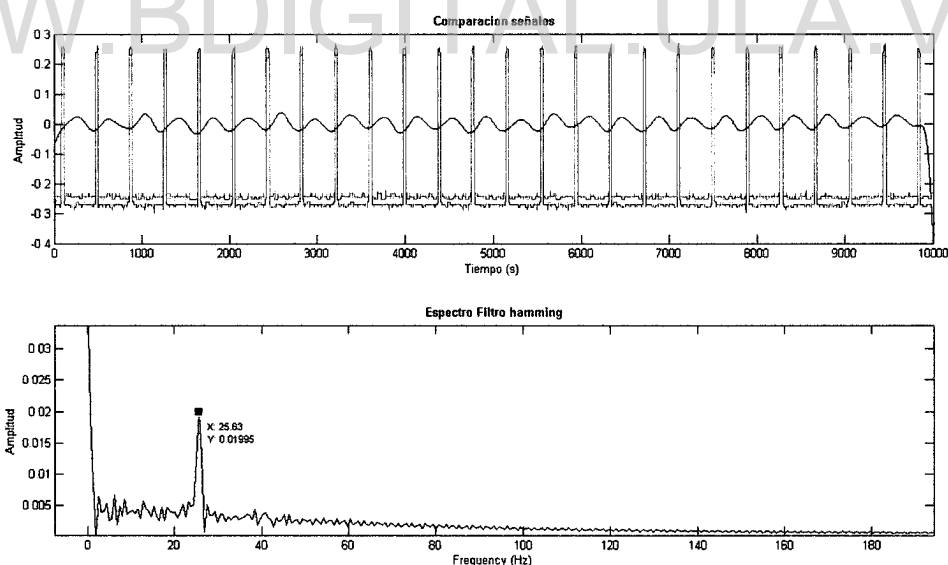


Figura 7.15: Data filtrada de osciloscopio Digital Tektronix. 1 segundo de muestreo

En la figura 7.16 se observa claramente un desplazamiento en la fase a la misma velocidad de rotación del ROTOR 5000.

Con las muestra tomadas en esta parte del experimento se concluye que no hay falla

en el programa de adquisición de datos ni en la tarjeta ya que el osciloscopio muestra la misma variación en la fase del sistema.

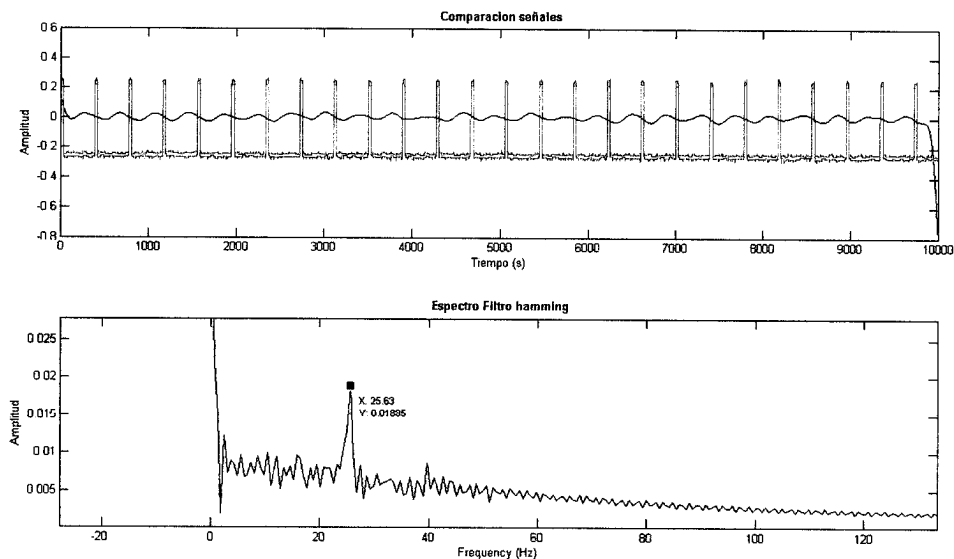


Figura 7.16: Data filtrada de osciloscopio Digital Tektronix segunda muestra. 1 segundo de muestreo

7.1.3. Verificación estructura mecánica de ROTOR 5000

Para la verificación del montaje de la máquina fué necesario desarmar todo el rotor 5000. Partiendo del ajuste de la mesa que sujeta la máquina en sus 4 apoyos con ramplugs. Luego de ajustar la mesa al suelo se realizaron pruebas con los mismos resultados anteriores por lo tanto se procede a desajustar el rotor con sus rodamientos encontrando un importante detalle en el apoyo del rodamiento de medición ya que el mismo tiene dos grados de libertad sin ajuste, en la figura 7.17 se muestra el ROTOR 5000 señalando el apoyo de medición con los dos grados de libertad los cuales se mantienen móviles ya que sus tornillos de sujeción no estaban correctamente asegurados teniendo una soltura mecánica evidente.

En la figura 7.17 se muestra el apoyo el cual posee correderas en dos ejes perpendiculares las cuales no se encontraban fijadas a la mesa. El tornillo que se observa señalado era de 1/2 pulgada de largo y no alcanzaba a presionar la corredera para fijar este

movimiento e internamente posee unos tornillos de llave Allen para fijar el movimiento del sentido axial del ROTOR 5000. Ambos estaban sueltos por lo cual se permitía el desplazamiento en sentido axial y radial del eje de rotación del apoyo. Se compraron tornillos mas largos exactamente de 3/4 de pulgada de largo para que lograra asegurar este apoyo y se ajustó el tornillo interno del eje axial para verificar el funcionamiento del rotor 5000. Luego de ajustar el Rotor 5000 se tomó una muestra con el instrumento virtual para medir vibraciones (IMVIBRA) y los resultados fueron satisfactorios para la respuesta de fase del sistema.

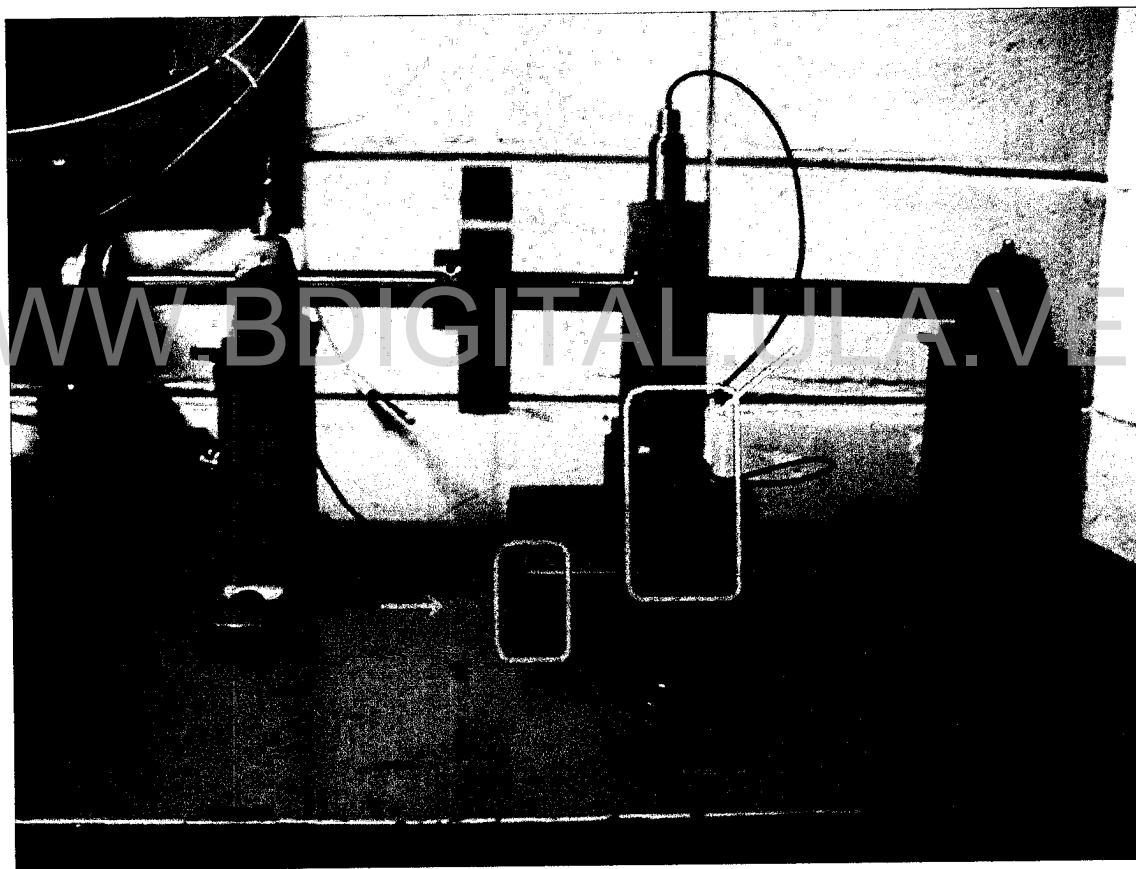


Figura 7.17: ROTOR 5000 con apoyo de medición.

En la figura 7.18 se muestra el resultado en tiempo y en frecuencia para la medición del Rotor 5000 la velocidad de toma de muestra fué 1946 RPM es decir una frecuencia fundamental de 32,43 Hz y es la encontrada en el espectro del acelerómetro. En la figura 7.19 se muestra la respuesta para la fase del sistema ajustando los tornillos en

el apoyo de medición observando una fase mas estable en la señal de vibración.

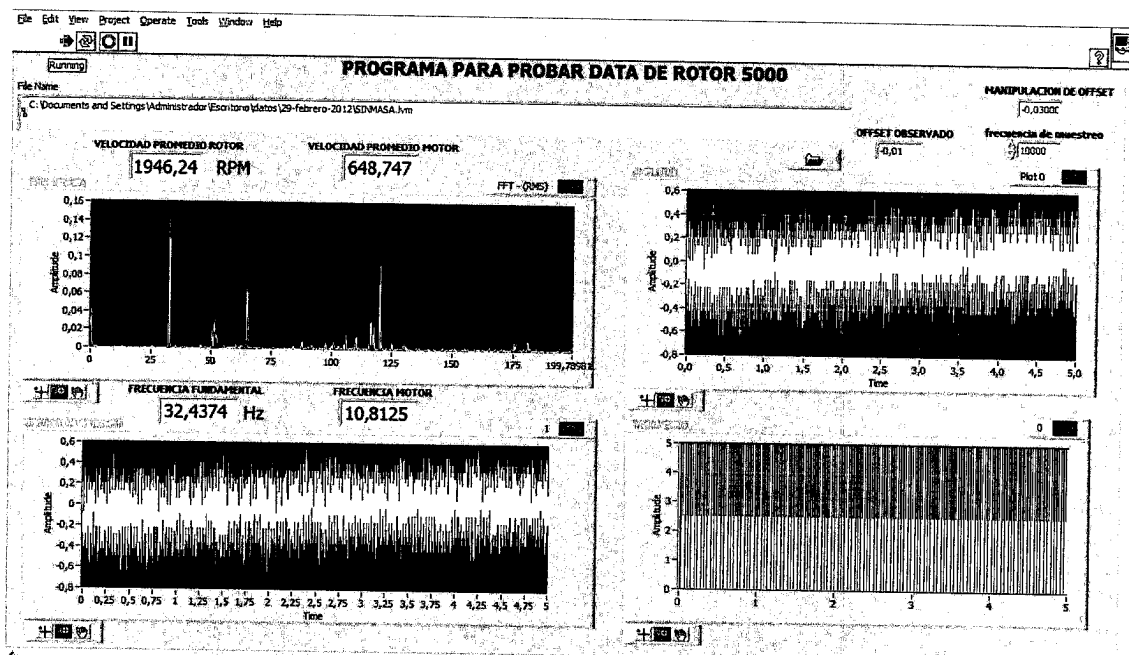


Figura 7.18: Medición con acelerómetro después de ajustar el Rotor 5000.

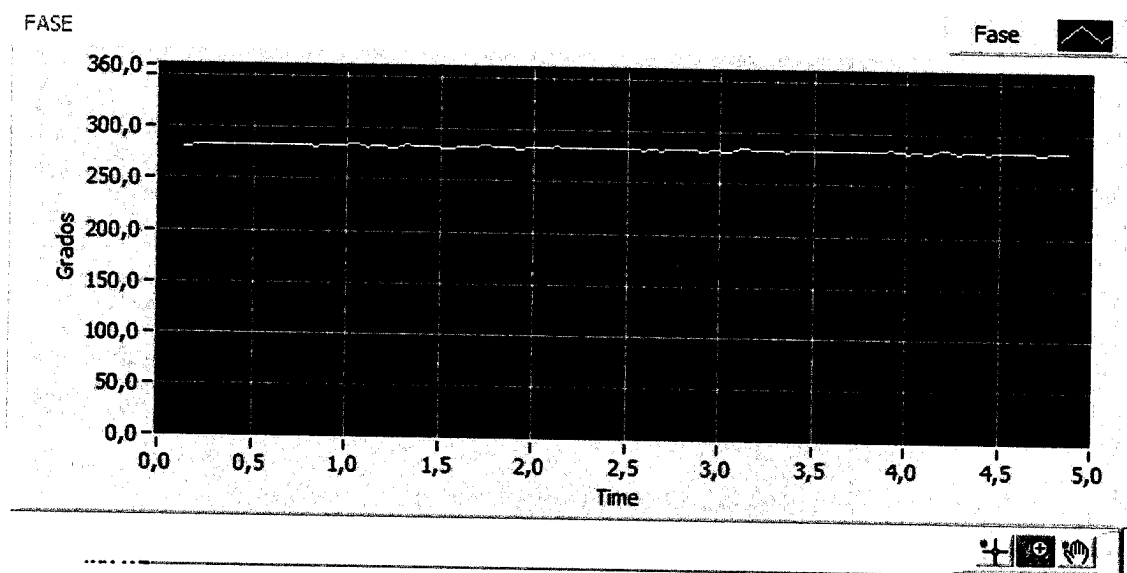


Figura 7.19: Respuesta de fase entre acelerómetro y tacómetro.

En la figura 7.19 se muestra una fase estable en un valor aproximado de 283° siendo constante a lo largo de la toma de 5 segundos con lo cual se llega a la finalización

del problema de medición de fase, resultando en una soldadura mecánica del punto de medición. Cabe destacar que la fase es primordial para el balanceo completo del rotor 5000 en uno y dos planos, la amplitud junto con el ángulo. Luego de ajustar el rotor se tomaron algunas pruebas para validar el resultado de la fase y que esta se encontrara estable en el mismo valor sin ningún tipo de variación como se afirma teóricamente obteniendo resultados satisfactorios para cada una de las muestras tomadas observando variaciones de aproximadamente 5° entre cada muestra confirmando la estabilidad de la fase en este punto.

7.2. Balanceo en un plano

Para el balanceo en un plano se necesitan dos muestras, una sin ningún tipo de masa de prueba y otra con una masa de prueba que permita perturbar el sistema obteniendo las mediciones de amplitud y fase en cada una de las muestras. En esta prueba se trabaja con el transductor de velocidad ya que presenta una respuesta mas adecuada en la velocidad para frecuencias bajas. En la figura 7.20 se muestra el contenido espectral para la señal tomada por el acelerómetro a una velocidad de 1960 RPM y la figura 7.21 muestra la señal obtenida por el velocímetro a la misma velocidad de operación, donde se muestra que el velocímetro tiene un mejor comportamiento en las frecuencias bajas ya que las componentes de alta frecuencia se suprimen o integran por la señal de velocidad. Por ello el rango de trabajo para el velocímetro es de 1000 a 12000 RPM donde se tiene una respuesta lineal. Se decide trabajar con el velocímetro para el balanceo en un plano.

En la práctica se toma una muestra a una velocidad de operación de 1937 RPM sin ninguna masa de balanceo como vibración inicial en el plano medido. En la figura 7.22 se muestra el espectro de vibración de la señal del velocímetro y la señal en el tiempo del tacómetro como de la velocidad de vibración. La amplitud de vibración observada contiene una frecuencia fundamental en 32,5 Hz correspondiente a la frecuencia de orden 1 la cual es filtrada y mostrada en la figura 7.23 con una amplitud promedio de 0,09 in/s y una fase de 282° . Luego se agrega un peso de prueba de 8gr ubicado a 60° de la marca de referencia del tacómetro obteniendo la respuesta mostrada en la figura

7.24 variando la fase a 233° y obteniendo la amplitud de vibración en 0,01 in/s.

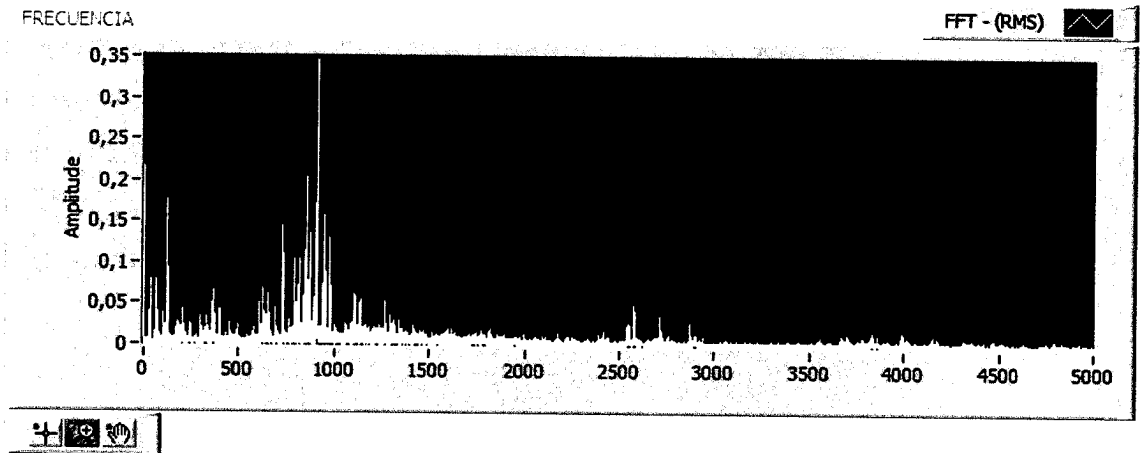


Figura 7.20: Respuesta en frecuencia para acelerómetro.

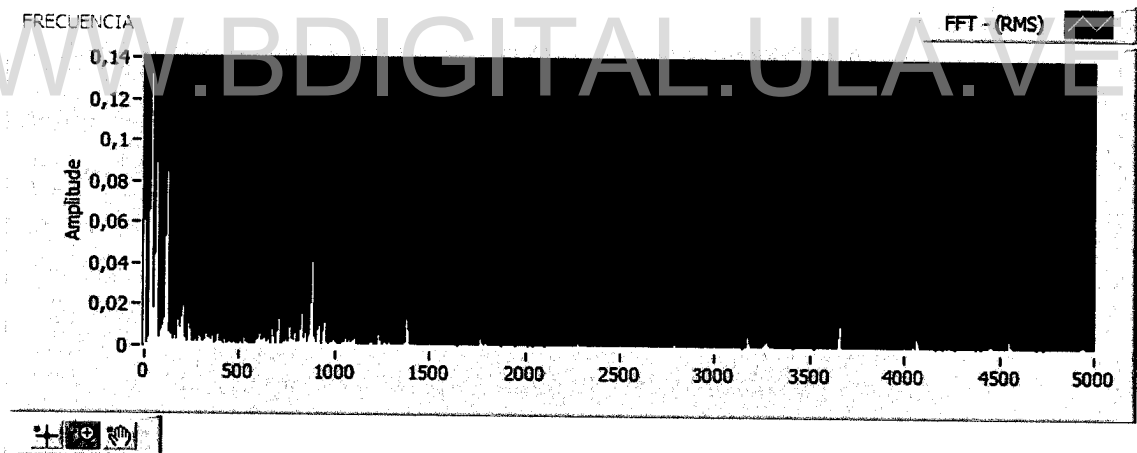


Figura 7.21: Respuesta en frecuencia para velocímetro.

Luego de tener capturado los datos de velocidad de vibración en los dos casos se procede a ejecutar el programa de balanceo en un plano diseñado como se especificó en la sección 6.1 del capítulo 6 arrojando el siguiente resultado para el peso de corrección 9,2 gr. ubicado en el ángulo -12.20° , ya que el ROTOR 5000 tiene cuatro agujeros igualmente espaciados con ángulos de 90° uno de ellos queda en la posición -30° de la posición de referencia del tacómetro (se debe recordar que el ángulo de fase se mide inverso al sentido de rotación del eje principal), se ingresa la misma pesa de corrección

de 8 gr. en la posición -30° obteniendo el resultado mostrado en la figura 7.25 donde se observa una amplitud de vibración de 0,0263 in/s y una fase estable de 345° logrando un balanceo óptimo ya que se redujo la amplitud en un 50 % del valor inicial comprobando así que el programa funciona de la manera correcta para esta prueba.

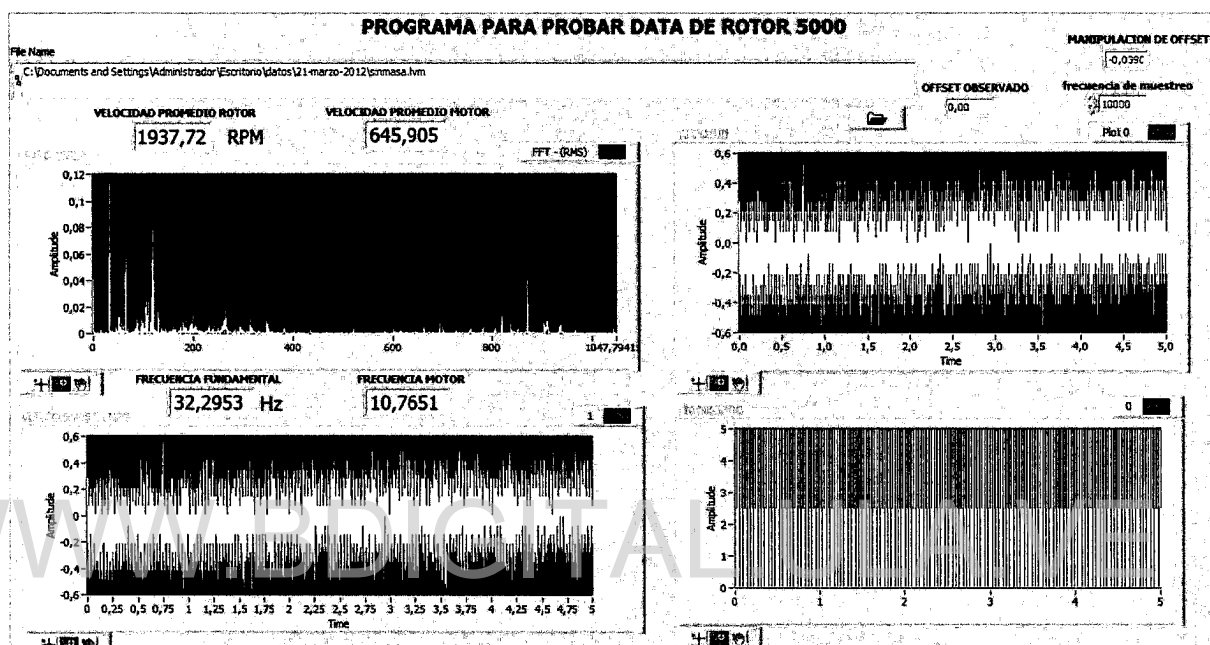


Figura 7.22: Respuesta en frecuencia para velocímetro sin masa.

En la figura 7.26 se muestra el resultado para el balanceo en un plano con una masa de prueba ubicada en 60° medidos desde la referencia.

Luego de realizar la primera prueba de balanceo se realiza la validación ubicando la pesa de corrección en otro ángulo para obtener otra respuesta y verificar que el programa está realizando todo el algoritmo sin excepciones. El lugar donde se agrega el peso de prueba de 8 gr. es 150° obteniendo la respuesta para amplitud y fase en la figura 7.27 donde se observa que la amplitud de vibración aumenta a 0,18 in/s y una fase de 273° .

Luego de realizar las medidas sin masa y con masa se procede a calcular la masa de corrección adecuada para balancear el rotor como se muestra en la figura 7.28 se ingresan los datos de amplitud de masa agregada y ubicación de la misma, para pulsar el botón CALCULAR MASA DE CORRECCIÓN arrojando una masa de 6,84 gr ubicada

en un ángulo de $-16,11^\circ$ lo cual concuerda con la primera prueba del programa.

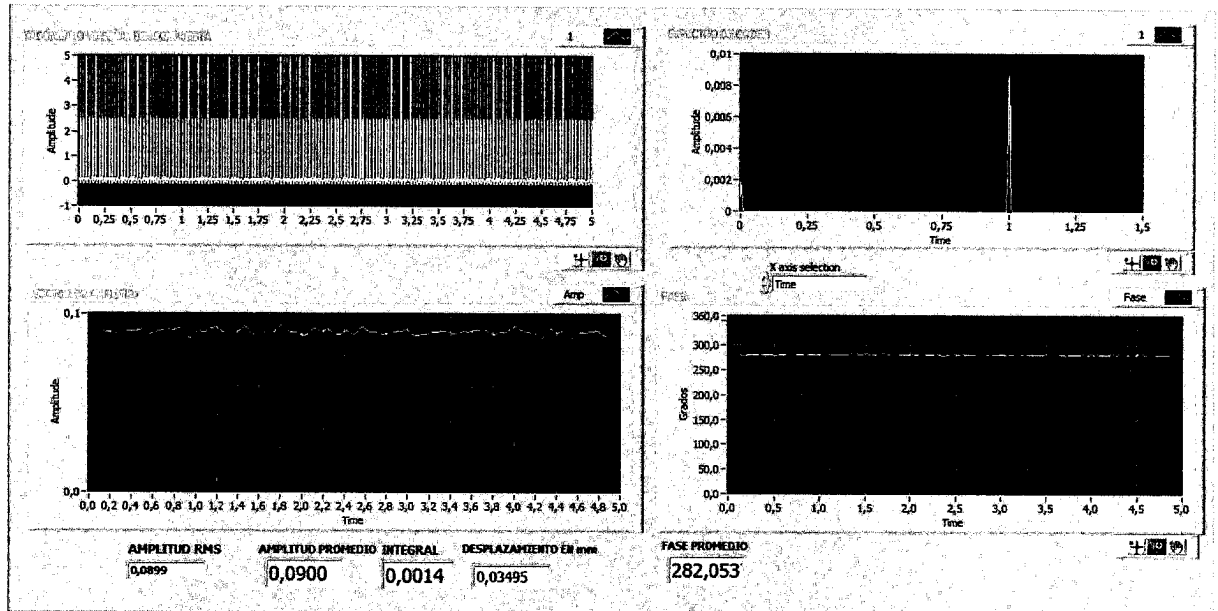


Figura 7.23: Cálculo de amplitud y fase sin masa.

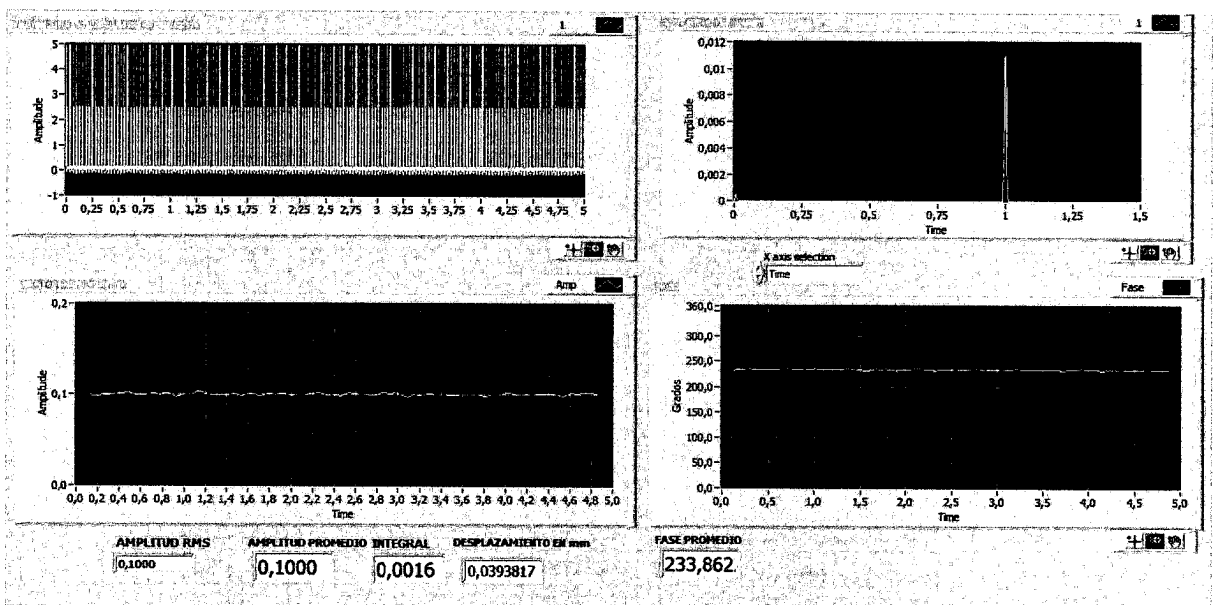


Figura 7.24: Cálculo de amplitud y fase con masa.

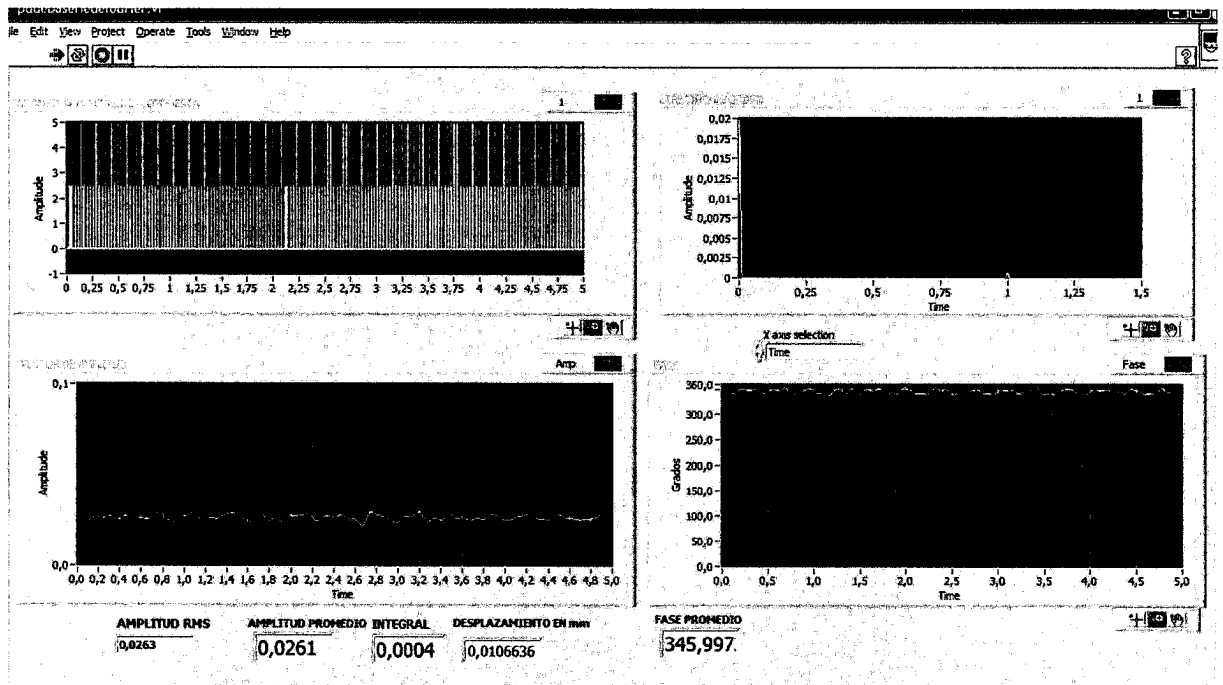
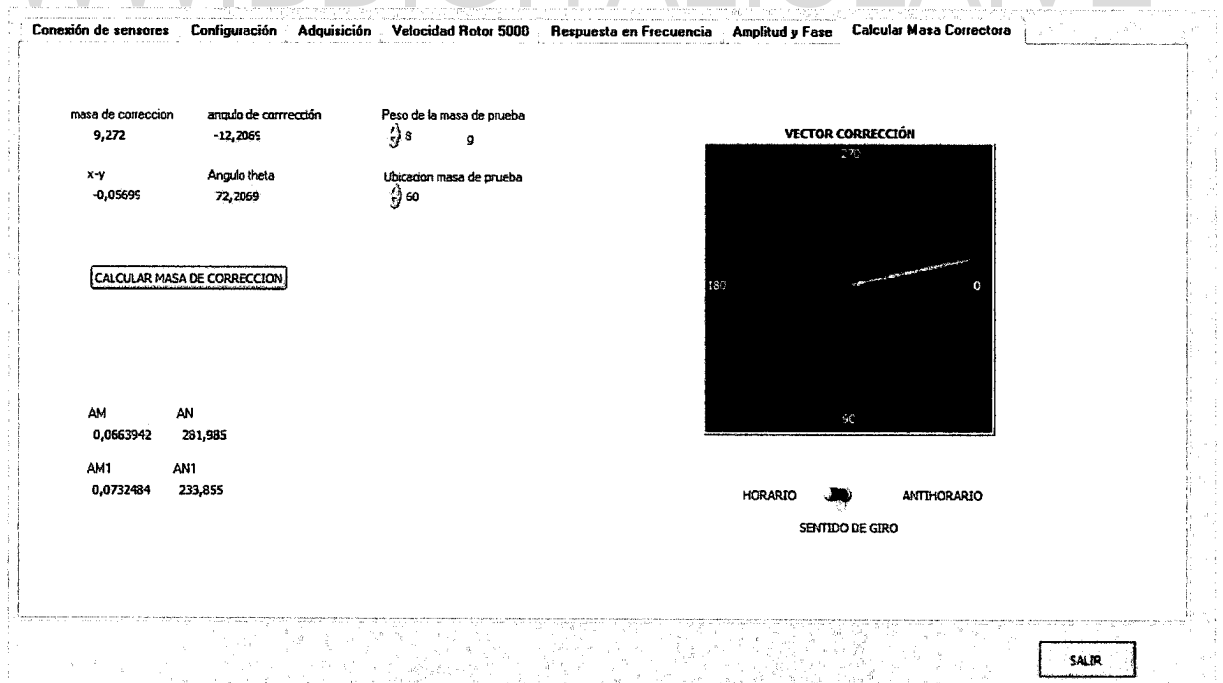


Figura 7.25: Resultado para balanceo en un plano.

Figura 7.26: Etiqueta de cálculo de masa de corrección para cálculo a 60° .

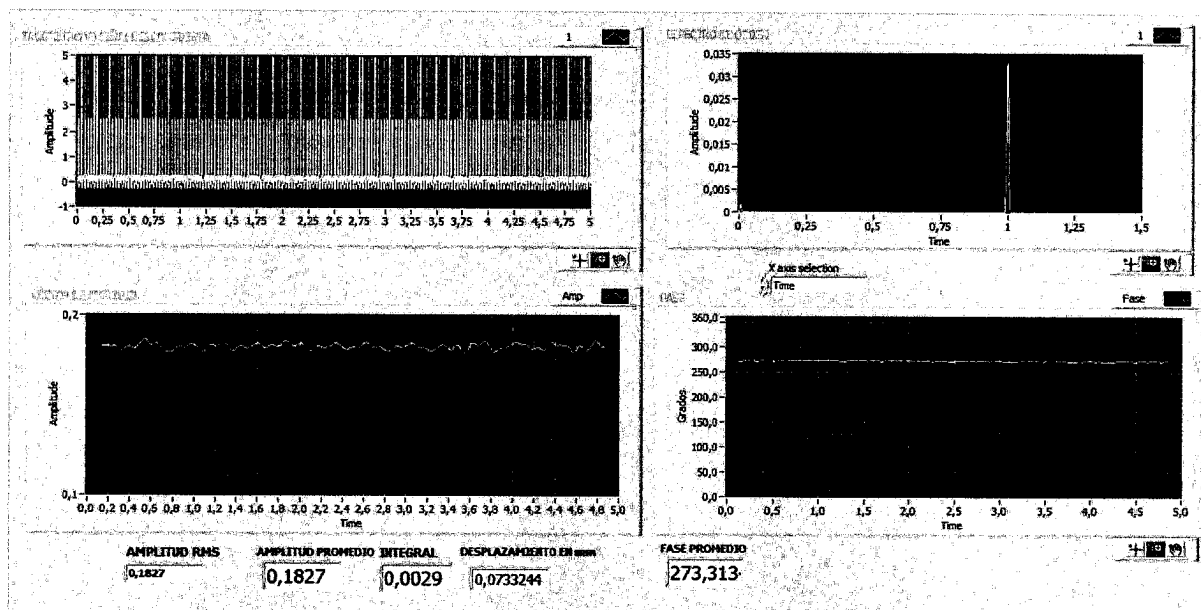


Figura 7.27: Amplitud y fase para masa ubicada a 150° de la posición de referencia.

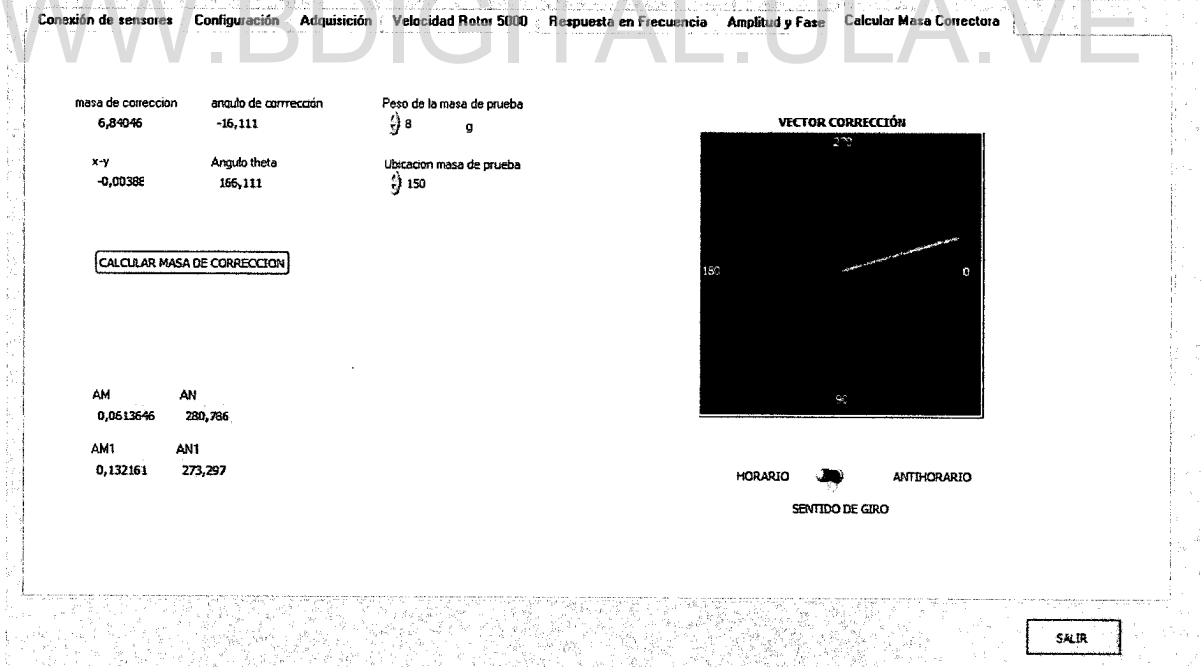


Figura 7.28: Etiqueta de cálculo de masa de corrección para cálculo a 150° .

D

con datos constantes de entrada para ángulos de fase y amplitudes en cada una de pruebas descritas por el método de balanceo por coeficientes de influencia.



Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Tabla 7.1: Datos ingresados al programa.

Near	Ángulo Near	Far	Ángulo Far	Peso prueba	Ángulo peso
38	256	19	36	Sin masa	Sin masa
31	300	37	75	7.95	90
17	264	31	21	7.95	90

En la figura 7.30 se muestra el resultado para los valores de los pesos de corrección necesarios y el ángulo de ubicación. Al comparar los datos obtenidos con los datos del ejemplo del libro se observa la igualdad de los mismos por lo tanto el algoritmo se encuentra funcionando de manera óptima.

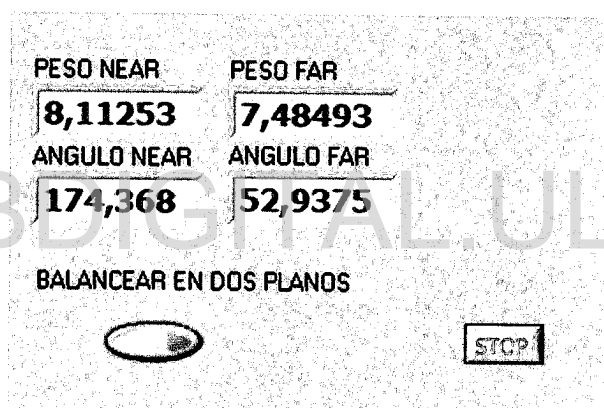


Figura 7.30: Resultado instrumento virtual para hallar balanceo en dos planos.

7.4. Evaluación Severidad Vibratoria

En esta sección se explica la práctica realizada para la evaluación de severidad vibratoria donde se hace una perturbación desbalanceando el sistema rotordinámico ROTOR 5000 con un tornillo lo suficientemente pesado como para elevar los niveles de vibración a niveles intolerables por la máquina, para la elaboración del programa se aplicó la norma ISO 10816 donde se indican que para una máquina de este tipo los niveles permisibles o iniciales de montaje son 0,06 in/s, 0,11 in/s para un nivel intermedio donde la máquina no presenta fallos pero se indica que la máquina ya tiene algún tiempo funcionando, en este punto se dice que la falla es del tipo incipiente,

0,18 in/s la condición de la máquina no es adecuada y no puede funcionar de manera continua, en este punto se dice que la falla es del tipo potencial, el valor límite para la vibración es cuando presenta falla funcional para valores por encima de 0,18 in/s. La figura 7.31 muestra la descripción de la tabla de la norma ISO 10816 tomada del instrumento virtual para evaluar severidad vibratoria.

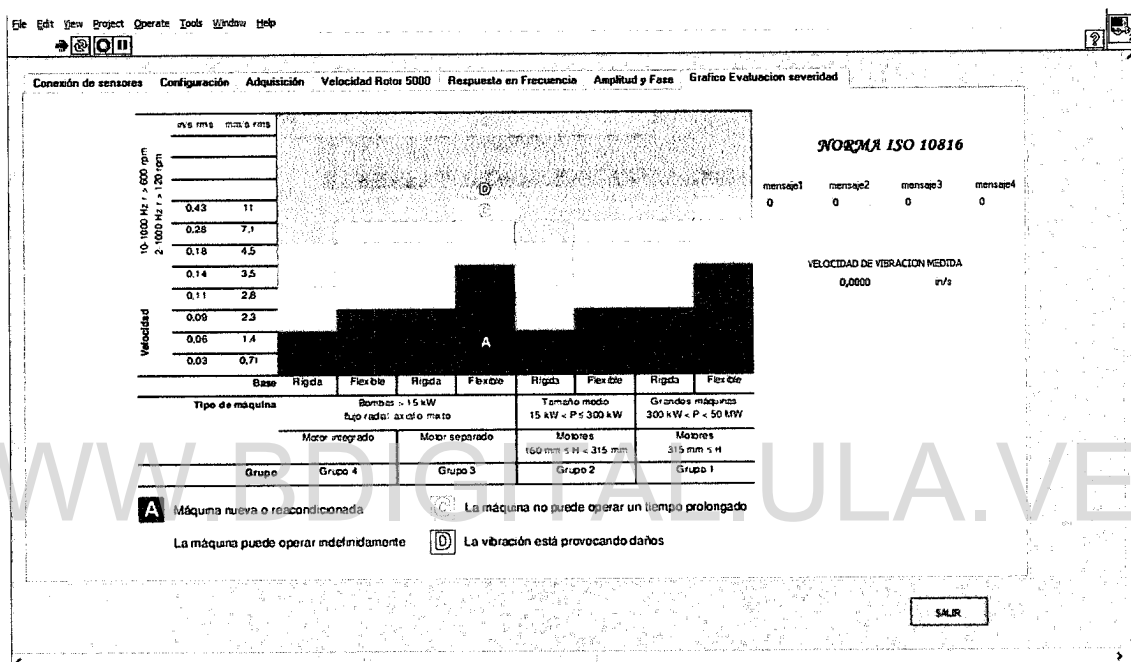


Figura 7.31: Tabla de evaluación de severidad vibratoria.

Para la demostración del funcionamiento del programa se mide el nivel de vibración con el velocímetro para evaluar el funcionamiento con esta lectura, en la figura 7.32 se muestra el resultado para el ROTOR 5000 balanceado en su punto de operación. También se puede observar la ventana tipo pop-pop que muestra el mensaje numero 1 que corresponde a una máquina nueva o recientemente reacondicionada. Para todos los valores esta ventana aparece con la diferencia que si corresponde a otra magnitud de vibración el mensaje será también diferente como se muestra en la figura 7.33 para un nivel de vibración de 0,14 in/s el cual indica que la máquina esta presentando un nivel elevado de vibración presentando una falla potencial.

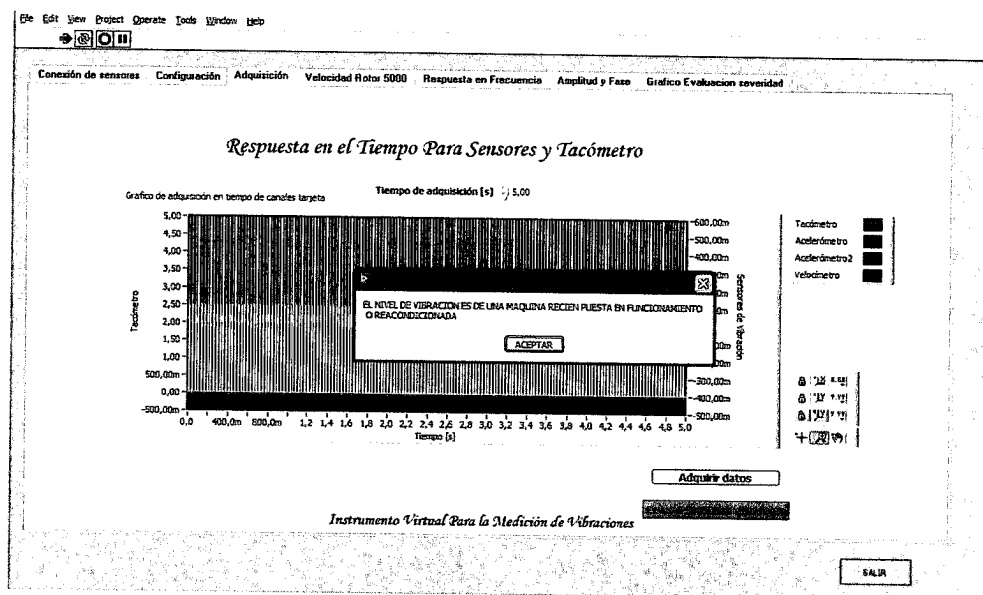


Figura 7.32: Respuesta por el programa para niveles bajos de vibración.

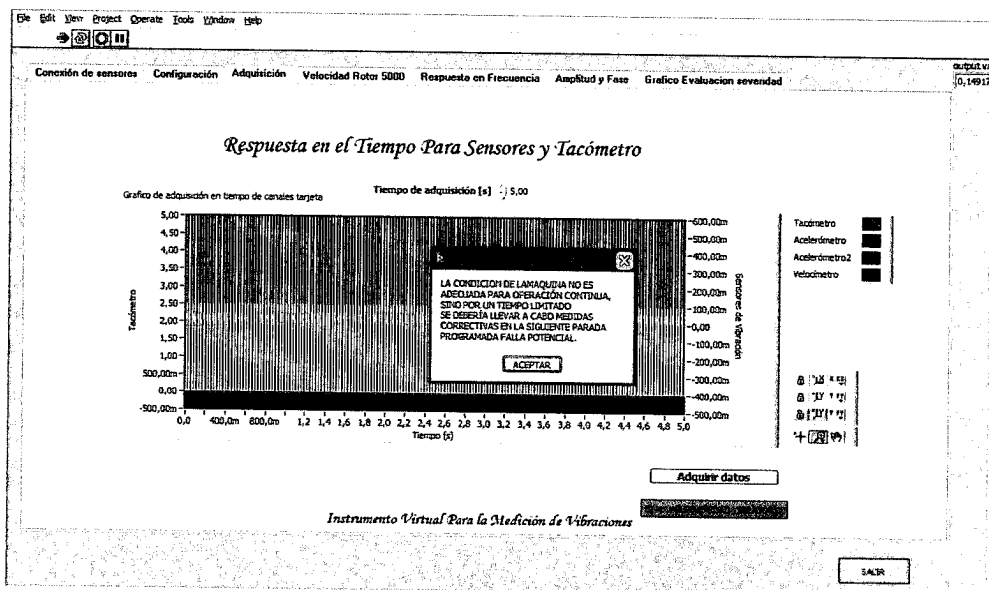


Figura 7.33: Respuesta por el programa para niveles elevados de vibración.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Parte IV

Conclusiones y Referencias

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Capítulo 8

Conclusiones y recomendaciones

- En este trabajo se implementaron tres instrumentos virtuales para la medición de vibraciones con el propósito de implementar mantenimiento predictivo, balanceo en un plano, balanceo en dos planos y evaluación de severidad vibratoria. Estos programas se demostraron que son funcionales para el ROTOR 5000, aplicando métodos de balanceo comúnmente aplicados en la industria para evaluación de maquinaria rotativa.
- El mantenimiento predictivo es una de las ramas más aplicadas del mantenimiento a nivel industrial pero lamentablemente para ingresar en este mundo se debe trabajar en el sector y así tener acceso a la información concerniente a la práctica de medición y balanceo de maquinaria rotativa, este trabajo permite establecer una conexión básica con lo que se puede encontrar por parte del estudiante de Ingeniería de Mantenimiento y el mundo real visualizando datos de una máquina rotativa sencilla obteniendo señales de vibración complejas y aplicando métodos de balanceo vistos en clase de análisis de vibraciones. Luego de llevar un historial de mediciones se pueden obtener curvas de tendencia que a nivel industrial son muy importantes para realizar diagramas de evolución de falla IPF (incipiente, potencial y funcional) y la típica curva de la bañera en un estudio de mantenimiento de maquinaria.
- La flexibilidad del programa permite añadir instrumentos en un futuro para trabajar otros problemas tales como desalineamiento y análisis de rodamientos, pero

esta plataforma es la base para tomar medición de vibraciones y almacenar data en archivos para luego ser procesados y analizar diferentes problemas en maquinaria rotativa. La portabilidad de la instrumentación y la tarjeta de adquisición de datos DaqPAD-6020E permite hacer un instrumento portátil de análisis de vibraciones para cualquier tipo de rotor que necesite ser balanceado.

- El rango de medición es de -10V a 10V por lo tanto se pueden adquirir datos con valor límite de 100 gravedades y el rango límite de sensor son 500 g. De la misma manera se tiene una resolución de 0.488 mV como mínima unidad de medida.

Recomendaciones

- Se recomienda someter a mas pruebas el sistema ROTOR 5000 y utilizar este instrumento ya que sirve para estudiar otros comportamiento anormales diferentes al desbalance en máquinas rotativas. El módulo para probar la data del ROTOR 5000 sirve para cargar datos medidos y almacenados de cualquier máquina rotativa con la extensión (.lvm), el mismo puede ser modificado para evaluar estado de maquinaria en general ya que no está limitado solo a la componente de orden 1 de vibración y el resultado de la transformada de Fourier es para todo el rango de frecuencias.
- Se recomienda evaluar el montaje del ROTOR 5000 ya que en un entorno industrial una máquina no debe estar distanciada del suelo y si fuese el caso se necesita un apoyo de concreto con el objetivo de evitar fugas de transmisibilidad de vibración del rotor al apoyo o anclaje de la máquina. Para este caso resultó ser inadecuado el montaje para medir severidad vibratoria ya que si se desbalancea mucho el rotor 5000 la estructura se hace flexible y por lo tanto no se obtienen los resultados deseados de velocidad de vibración para el alto nivel de desbalance en el rotor 5000 llegando al nivel de resonancia de la estructura.
- Se recomienda aprovechar el nivel de portabilidad del instrumento virtual en otras máquinas rotodinámicas para evaluar las condiciones de operación y mediciones de laboratorio pertinentes en un análisis de vibraciones.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Apéndice A

Programa Inicial del Tacómetro en LabWindows/CVI

```
#include <userint.h> #include "timer.h" #include "nidaqex.c"
#include "nidaqex.h" void capturar (void);
    i16 iStatus = 0;
    i16 iRetVal = 0;
    i16 iDevice = 1;
    u32 ulGpctrNum = ND_COUNTER_0;
    u32 ulCount = 0;
    u32 ulArmed = ND_YES;
    i32 ulTCReached = ND_NO;
    i16 iIgnoreWarning = 0;
    i16 iYieldON = 1;
    int principal,i=0,inicio=1;
    double t1=0,t2=0;
    float velocidad,velocidad1;
    float vec;
    void main(void) {
        principal = LoadPanel (0, "timer.uir",PANEL);
        SetCtrlAttribute (principal, PANEL_TIMER, ATTR_ENABLED, 1);
```

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

```
DisplayPanel (principal);
RunUserInterface ();

} int CVICALLBACK timer (int panel, int control, int event,
    void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
    switch (event)
    {
        case EVENT_TIMER_TICK:
            capturar();
            if(inicio==1)
                vec = velocidad;
            SetCtrlVal (principal, PANEL_LED, 1);
            SetCtrlVal (principal, PANEL_VELOCIDAD, velocidad);
            iStatus = GPCTR_Control (iDevice, ulGpctrNum, ND_DISARM);
            ulCount=0;
            i++;
            inicio=0;
            vec=velocidad;
            break;
    }
    return 0;
} void capturar () {
    i16 iStatus = 0;
    i16 iRetVal = 0;
    i16 iDevice = 1;
    u32 ulGpctrNum = ND_COUNTER_0;
    u32 ulCount = 0;
    u32 ulArmed = ND_YES;
    i32 ulTCReached = ND_NO;
    i16 iIgnoreWarning = 0;
```

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

```
i16 iYieldON = 1;
iStatus = GPCTR_Control(iDevice, ulGpctrNum, ND_RESET);
iRetVal = NIDAQErrorHandler(iStatus, "GPCTR_Control/RESET",
    iIgnoreWarning);
iStatus = GPCTR_Set_Application(iDevice, ulGpctrNum,
    ND_SINGLE_PERIOD_MSR);
iRetVal = NIDAQErrorHandler(iStatus, "GPCTR_Set_Application",
    iIgnoreWarning);
iStatus = GPCTR_Change_Parameter(iDevice, ulGpctrNum, ND_SOURCE,
    ND_INTERNAL_20_MHZ);
iRetVal = NIDAQErrorHandler(iStatus,
    "GPCTR_Change_Parameter/SOURCE", iIgnoreWarning);
iStatus = GPCTR_Change_Parameter(iDevice, ulGpctrNum, ND_GATE,
    ND_DEFAULT_PFI_LINE);
iRetVal = NIDAQErrorHandler(iStatus,
    "GPCTR_Change_Parameter/GATE", iIgnoreWarning);
iStatus = GPCTR_Change_Parameter(iDevice, ulGpctrNum,
    ND_INITIAL_COUNT, ulCount);
iRetVal = NIDAQErrorHandler(iStatus,
    "GPCTR_Change_Parameter/INITCOUNT", iIgnoreWarning);
iStatus = GPCTR_Control(iDevice, ulGpctrNum, ND_PROGRAM);
iRetVal = NIDAQErrorHandler(iStatus, "GPCTR_Control/PROGRAM",
    iIgnoreWarning);
do {
    iStatus = GPCTR_Watch(iDevice, ulGpctrNum, ND_ARMED,
        &ulArmed);
    iRetVal = NIDAQYield(iYieldON);
} while ((ulArmed == ND_YES) && (iStatus == 0));
iRetVal = NIDAQErrorHandler(iStatus, "GPCTR_Watch/ARMED",
    iIgnoreWarning);
iStatus = GPCTR_Watch(iDevice, ulGpctrNum, ND_COUNT, &ulCount);
```

```
iRetVal = NIDAQErrorHandler(iStatus, "GPCTR_Watch/COUNT",
    iIgnoreWarning);
iStatus = GPCTR_Watch(iDevice, ulGpctrNum, ND_TC_REACHED,
    &ulTCReached);
if (ulTCReached == ND_YES) {
}
else {
    velocidad=((20000000.0 * 60.0)/(ulCount));
}
}
```

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Apéndice B

Programa para procesar datos en Matlab y comparar con LabVIEW

```
%PROGRAMA PARA FILTRAR DATOS DEL ACELERÓMETRO Y TACÓMETRO.
close all
clc

file = textread('C:\Documents and Settings\Administrador\Mis documentos\
AÑO2012\MAESTRIA\SEMINARIO DE GRADO II\TESISLABVIEW\19-05-2011\
CAMBIANDOLECABLE\30SEG.lvm','%s','delimiter','\n','whitespace','');
Bo = [];
h = waitbar(0,'Cargando archivo...');
qo = length(file);
for i=1:qo
    a = file{i};
    a = strrep(a, ',', ' ');
    a = strrep(a, ';', ' ');
    Bo = [Bo;str2num(a)];
    waitbar(i/qo,h)
end close(h)
x = Bo(:,1)*10;
fs = 10000;
```

```

tfinal=(length(x)-1)./fs;
t=0:0.0001:tfinal;
%figure(1);
subplot(2,2,1);
plot(t,x)
xlabel('Tiempo')
ylabel('Amplitud')
title('{\bf Data acelerómetro}')
```

$x = Bo(:,1)*10;$

$m = \text{length}(x)$ % Window length

$n = \text{pow2}(\text{nextpow2}(m));$ % Transform length

$y = \text{fft}(x,n);$ % DFT

$f = (0:n-1)*(fs/n);$ % Frequency range

$\text{power} = y.*\text{conj}(y)/n;$ % Power of the DFT

```

subplot(2,2,2);
plot(f,power)
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Power')
title('{\bf Periodogram}')
```

%para sacar la componente de frecuencia correspondiente al armónico

```

subplot(2,2,3);
NFFT = 2^nextpow2(m);
Y = fft(x,NFFT)/m;
f =fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
title('{\bf Espectro FFT}')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Amplitud')
```

```
%reconstruccion de la señal
```

```
subplot(2,2,4);  
k0 = real(ifft(Y));  
tamano=length(k0);  
t=0:.0001:(tamano-1)/fs;  
plot(t,k0)  
xlabel('Tiempo')  
ylabel('Amplitud')  
title('{\bf Señal reconstruida}')
```

```
%Filtro para extraer componente de frecuencia fundamental
```

```
figure(2);  
b1=fir1(200,0.00001>window);  
ynf=filtfilt(b1,1,x);  
subplot(2,1,1)  
prom=mean(ynf);  
plot(ynf-prom);  
title('{\bf Comparacion señales}')
```

```
xlabel('Tiempo (s)')  
ylabel('Amplitud')  
hold on
```

```
%Visualización tacómetro solapado con acelerómetro
```

```
plot((Bo(:,2)*0.1),'r') subplot(2,1,2)
```

```
%espectro de la señal
```

```
m = length(ynf);
```

```
NFFT = 2^nextpow2(m); % Next power of 2 from length of y
Y = fft(ynf,NFFT)/m;
f = fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
title('{\bf Espectro Filtro hamming}')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Amplitud')
```

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Apéndice C

Manual de Prueba y Calibración de Sistema de Adquisición de Datos.

El Sistema de adquisición de datos del rotor 5000 consta de los siguientes componentes:

1. Tarjeta de adquisición de datos DAQpad-6020E de National Instruments.
2. Tablero de conexión CB-68LP de National Instruments.
3. 2 Transductores Acelerómetros Marca Wilcoxon modelo 736T.
4. Transductor velocímetro Marca Wilcoxon modelo 793V.
5. 2 Fuentes para transductor modelo P7004B y P702B.
6. Un cargador para Fuentes de transductor Modelo 7004B útil para las dos fuentes.
7. Cables de conexión para cada uno de los transductores y su fuente y salida de la fuente para la tarjeta de adquisición de datos.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

C.1. PRUEBA DE TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DAQpad-6020E

Antes de trabajar con el sistema de adquisición es recomendable según el fabricante comprobar el correcto funcionamiento de cada uno de los canales correspondientes a la tarjeta o por lo menos los que se van a utilizar, para ello se deben conocer las características de la tarjeta y periféricos o puertos de entrada salida.

C.1.1. Características de tarjeta DAQpad-6020E.

Posee 16 canales análogos digitales denotados en el tablero de conexión con los pines de conexión denotados en la tabla C.1. Los pines del conector de la tarjeta correspondientes a los canales análogos digitales tienen un prefijo AI (que indica entrada análoga) y esto está acompañado por un número que indica que canal de los 16 disponibles corresponde a este pin, a continuación se indicarán cada uno de los canales y que numero de conexión del tablero CB-68LP corresponde:

Existen tres maneras de tomar muestras en un canal análogo digital, Modo diferencial, Modo referenciado a tierra y Modo no referenciado a tierra o fuente flotante.

Modo Diferencial

Corresponde a la necesidad de restar dos señales analógicas entre si, para ello se toman estos 16 canales para tener 8 canales diferenciales, es decir las entradas analógicas se restarán de la siguiente manera (AI0-AI8), (AI1- AI9), ... y así sucesivamente obteniendo 8 canales diferenciales.

Modo Referenciado a Tierra

Este es el modo simple o de conexión directa como se mostró en la tabla C.1. En este modo toda entrada análoga es referenciada a la tierra de la tarjeta de adquisición de datos agrupando con la tierra del instrumento.

Tabla C.1: Descripción de pines del tablero CB-68LP

Canales	Numero en conector
Canal 0 (AI0)	68
Canal 1 (AI1)	33
Canal 2 (AI2)	65
Canal 3 (AI3)	30
Canal 4 (AI4)	28
Canal 5 (AI5)	60
Canal 6 (AI6)	25
Canal 7 (AI7)	57
Canal 8 (AI8)	34
Canal 9 (AI9)	66
Canal 10 (AI10)	31
Canal 11 (AI11)	63
Canal 12 (AI12)	61
Canal 13 (AI13)	26
Canal 14 (AI14)	28
Canal 15 (AI15)	23
Referencia tierra (AI GND)	24-27-29-32-56-59-64-67

Para probar los canales analógicos digitales se debe ingresar al programa Measurement & Automation Studio. Accediendo al siguiente icono en el escritorio de la computadora doble click:



Measurement & Automation Studio

Luego aparece la siguiente ventana:

Este programa es realizado por National Instruments para comprobar el funcionamiento de cada uno de las tarjetas fabricadas por los mismos. Si no se conecta ningún dispositivo este programa no lo detectará y no se podrá realizar ninguna comprobación

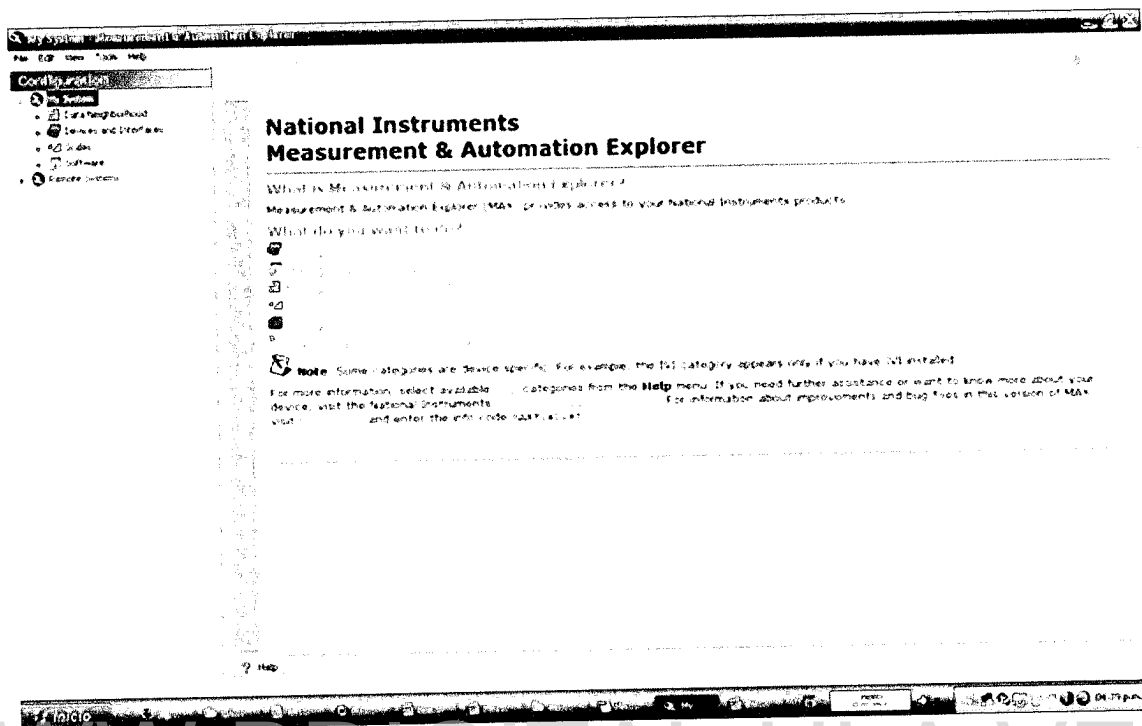


Figura C.1: Ventana de bienvenida a MAX.

de dispositivo. Las tarjetas de adquisición de datos de National Instruments pueden ser de dos tipos según el conector utilizado para comunicarlo con la computadora, PCI que son las que se puede conectar en la tarjeta madre de la computadora en la ranura PCI, de tipo USB que son las que se conectan vía USB a la computadora, la tarjeta DAQpad-6020E es de tipo USB.

Si la tarjeta de adquisición está debidamente conectada en el puerto USB aparece un ícono dentro de Device and Interfaces con el nombre de la tarjeta de adquisición correspondiente, se ingresa con doble click a la tarjeta apareciendo la interfaz vista en la figura C.2.

En la parte superior izquierda se tienen tres etiquetas llamadas Properties, Delete y Test Panels seleccionando la etiqueta Properties se accederá a la ventana que se muestra en la figura C.3 donde se puede configurar las propiedades que tendrán los canales que vamos a probar, es decir, parámetros tales como modo de canal analógico digital, modo de señal de salida de canal digital analógico, y accesorios utilizados para la adquisición o acondicionadores de señales.

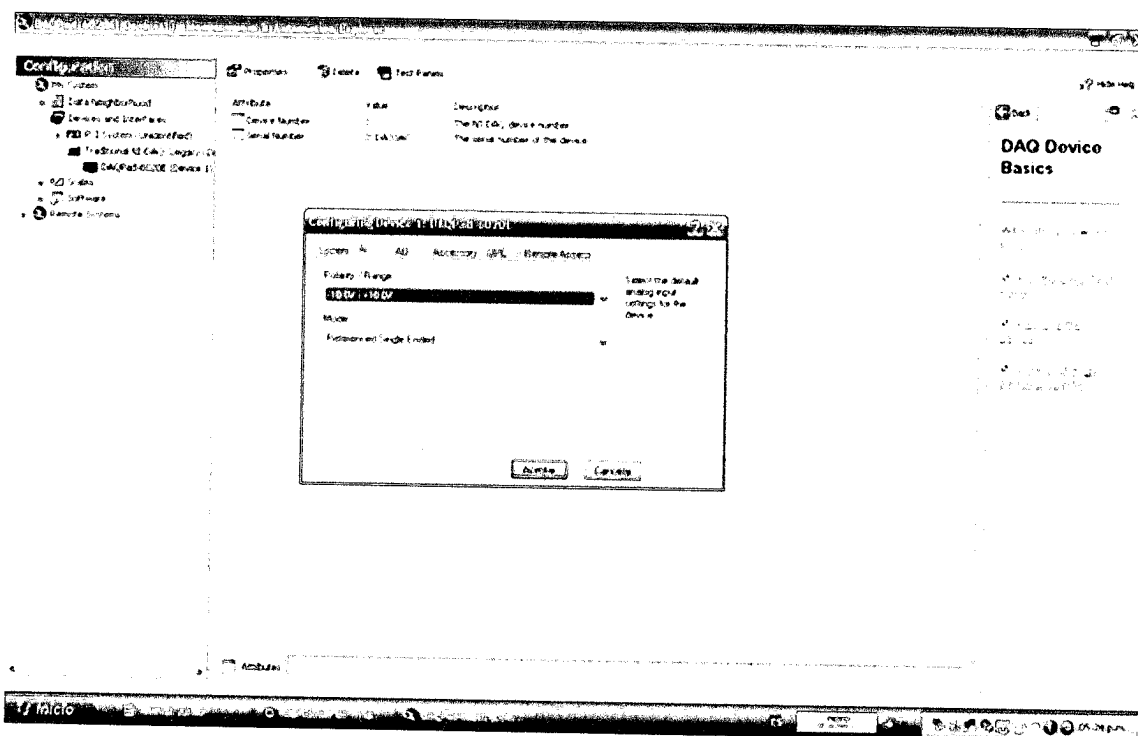


Figura C.2: Ventana de ingreso a dispositivo en MAX.

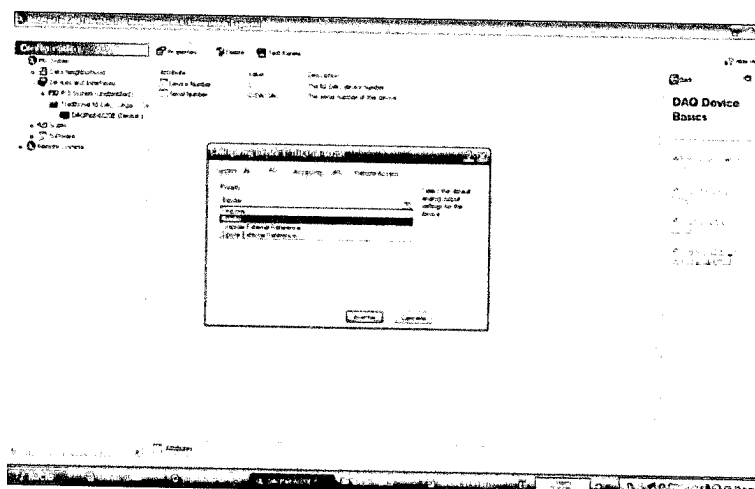


Figura C.3: Ingreso a Properties en MAX.

También se puede configurar el tipo de señal de salida que se va a obtener por el canal digital analógico a salida analógica, es decir si la señal va a ser bipolar, unipolar o bipolar no referenciada para la prueba que se recomienda es necesario utilizar la salida bipolar. Luego de haber configurado las propiedades de los canales a utilizar presione

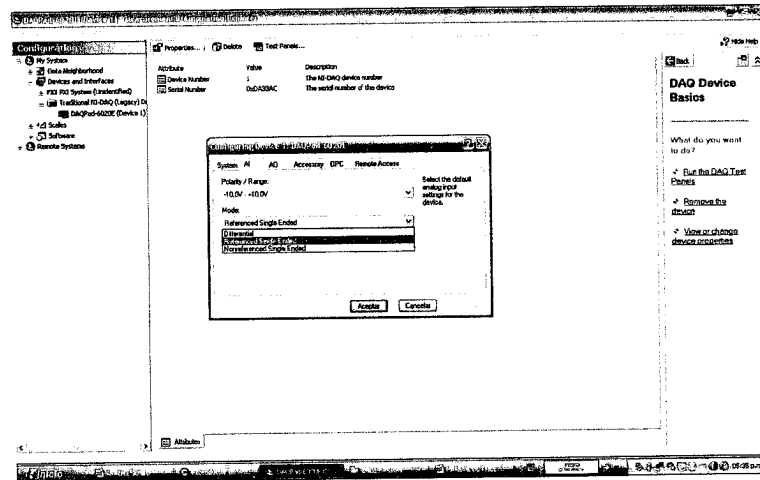


Figura C.4: Modificaciones en canales analógicos digitales en MAX.

aceptar con el mouse, luego seleccione Test panels para leer las entradas analógicas y generar las señales digitales correspondientes y probar los contadores de la tarjeta. El test panel indica panel de evaluación o testeo de la tarjeta y es la ventana mas importante en la prueba de los canales de la misma.

Se genera el panel frontal de la figura C.4 para la visualización de cada una de las señales. Para observar la señal en cada canal analógico digital se debe primero encender el generador de señales externo para generar una onda con 5 voltios de amplitud y 5Hz de frecuencia, a continuación se mostrará una imagen tomada de un osciloscopio de la señal a leer realizada por el generador de señales.

En la figura C.5 se observa la frecuencia de la señal generada de 5Hz y una amplitud de 5V. Esta misma señal será conectada al canal 0, canal 1, canal 2, etc. Para comparar como la está viendo la tarjeta de adquisición de datos. En la tabla C.1 está especificado cada uno de los pines de conexión de los canales análogos digitales en la figura 5 se puede observar la señal obtenida en el canal 0 cuando esta señal es conectada en el pin 68 del canal 0. Es recomendable hacer esta prueba con todos los canales análogos y luego cambiar la forma de onda para ver que la tarjeta está tomando bien las muestras de voltaje (se puede probar con otros tipos de señales tales como cuadrada, diente de sierra, arb, etc. Dependiendo de las capacidades de su generador de señales). A continuación se muestran las señales de entrada y señal muestreada por la tarjeta.

De manera análoga se debe realizar el procedimiento para cada uno de los canales

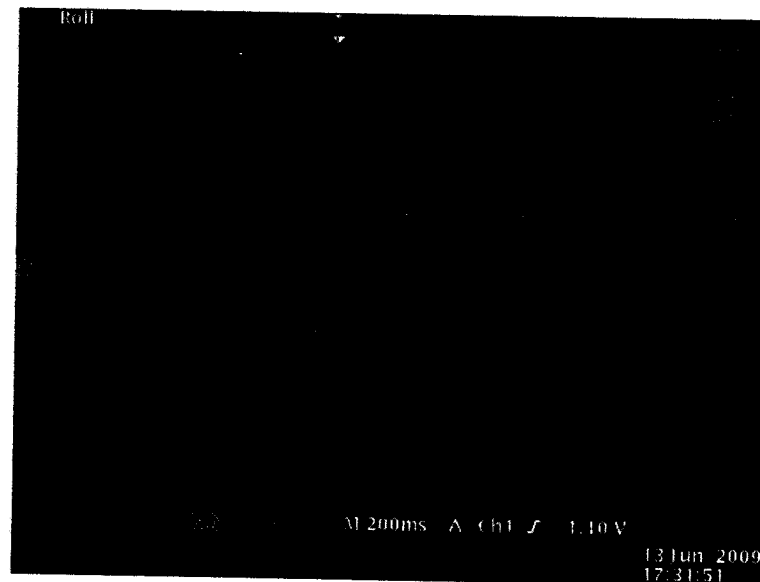


Figura C.5: Señal directa del generador de señales externo

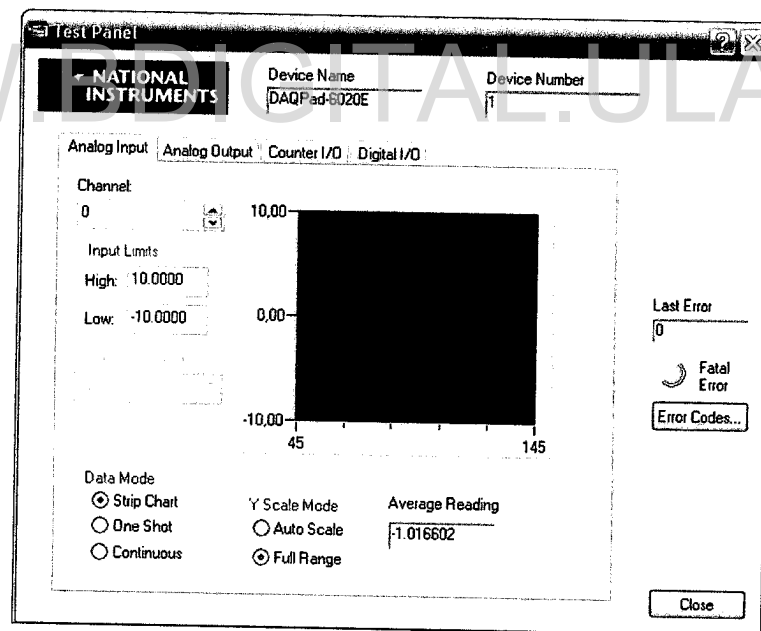


Figura C.6: Señal obtenida en la tarjeta de adquisición de datos

análogos digitales y comprobar que la señal está correctamente localizada en el punto cero es decir que los niveles de voltaje medidos en el canal son 5 y -5 Voltios. Si esta señal tiene un offset o un corrimiento en el eje de voltaje se puede detectar que este canal esta descalibrado.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

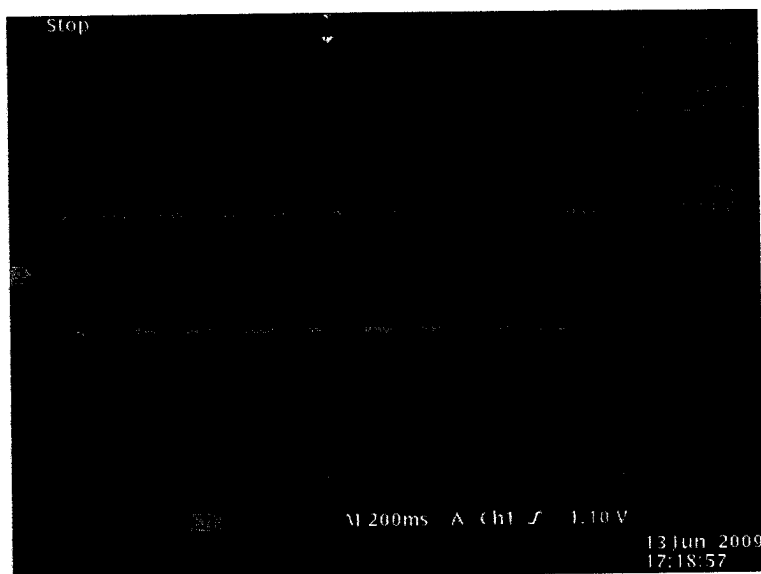


Figura C.7: Señal ingresada en la tarjeta de adquisición de datos

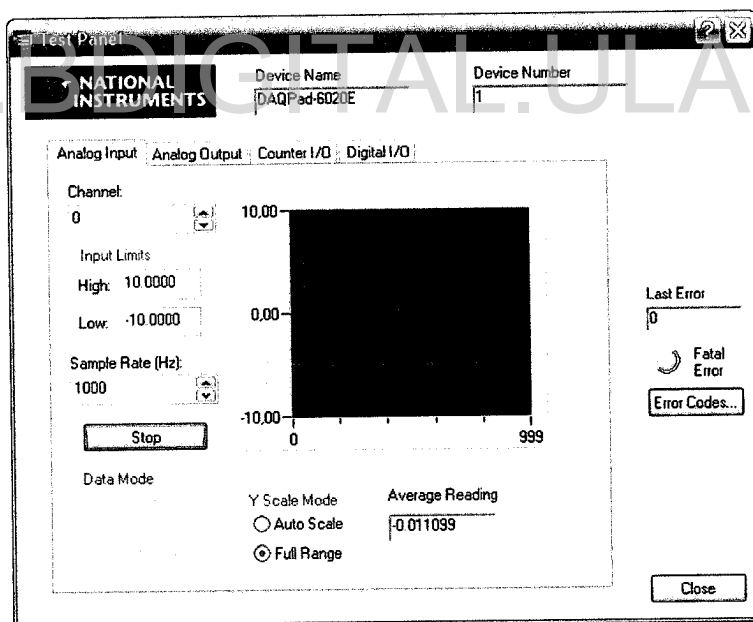


Figura C.8: Señal obtenida en la tarjeta de adquisición de datos

Como se puede observar en las etiquetas superiores se puede comprobar canal de entrada análoga, salida análoga, Contador de entrada salida y entradas y salidas digitales. El siguiente paso es comprobar las salidas análogas que son dos, para ello se selecciona Analog Output en las etiquetas superiores generando la ventana de la figura

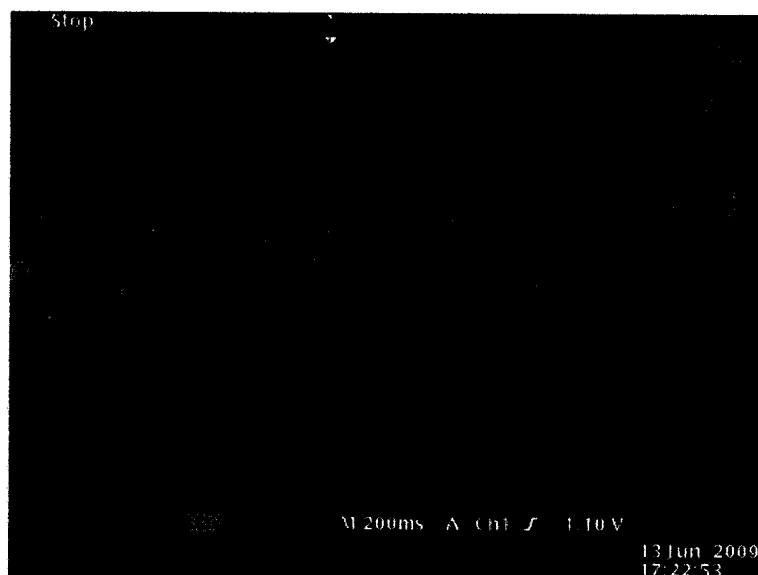


Figura C.9: Señal diente de sierra.

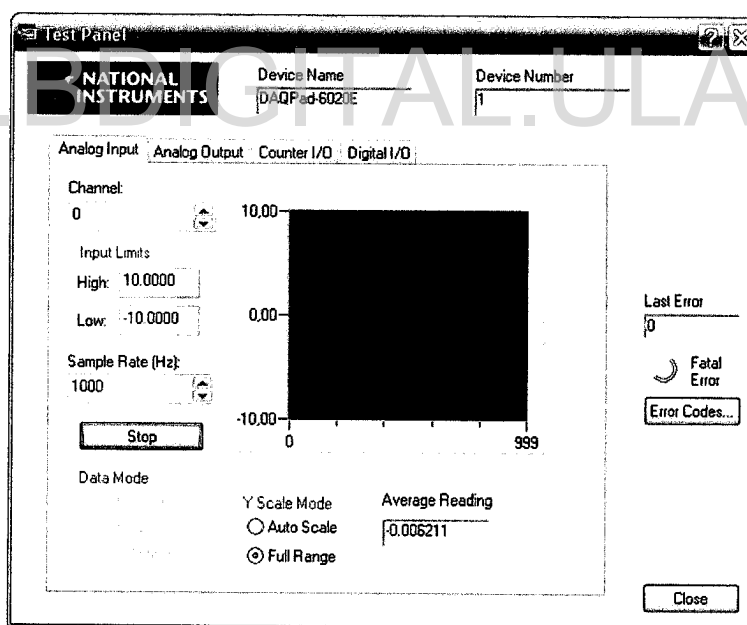


Figura C.10: Señal diente de sierra obtenida por la DAQ.

C.13. Se generará por la tarjeta de adquisición de datos una señal sinusoidal de amplitud 8V y una frecuencia de 50 mHz ya que la salida análoga tiene una rata máxima de salida de 20 muestras por segundo esto se selecciona en la ventana de la figura 12. Y se observará por los pines de la tarjeta de cada canal de salida análoga con un osciloscopio

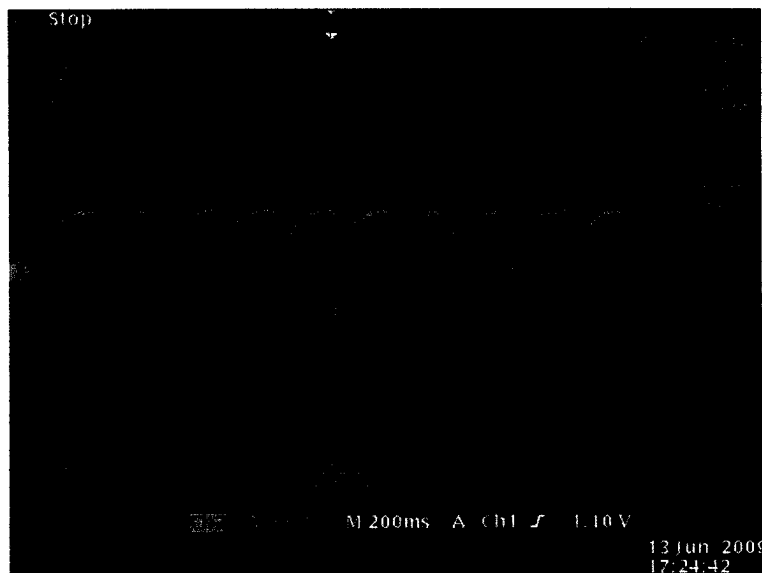


Figura C.11: Señal arb desde el generador de señales.

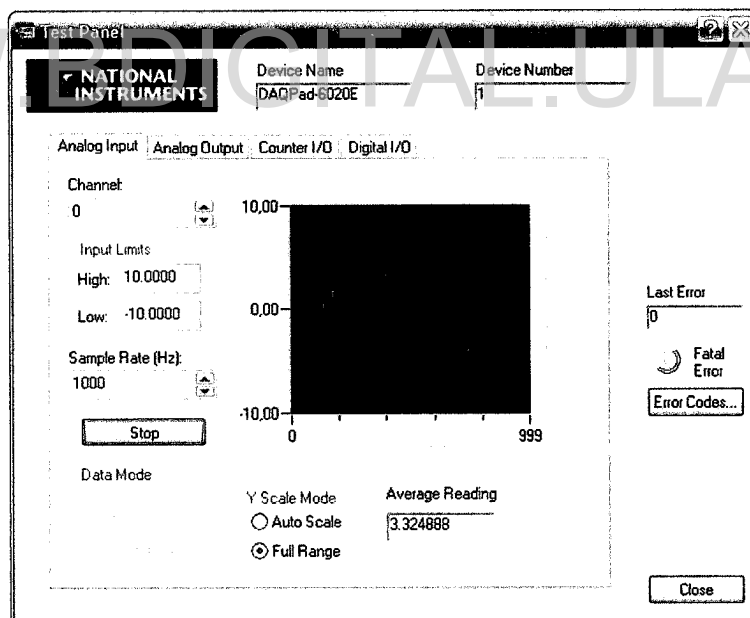


Figura C.12: Señal arb obtenida por la DAQ.

para tener esta señal que entrega la tarjeta DAQpad-6020E, en la figura 13 se muestra la señal que se debe obtener en el pin 21 y 22 con referencia al pin 54 o 55 los cuales corresponden a cada uno de los canales de salida análogos y la tierra o referencia de la señal de salida por omisión las tierras preferencias de las salidas y entradas análogas

están conectadas entre sí pero cabe aclarar que se puede configurar por software que estas tierras sean independientes.

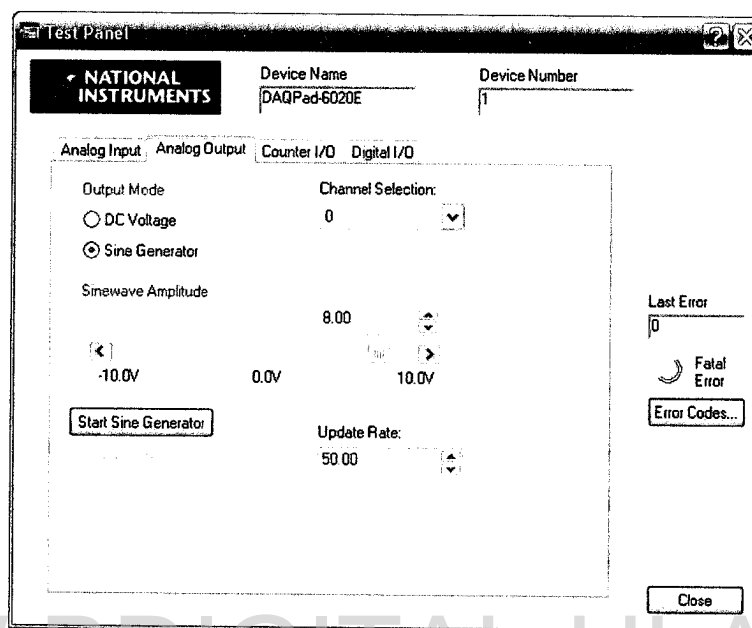


Figura C.13: Probar salida Análoga.

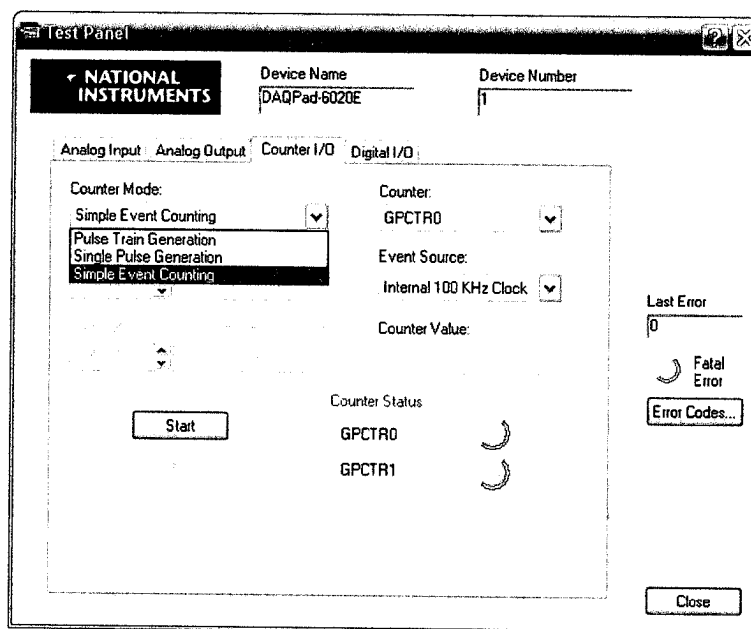


Figura C.14: Señal obtenida en el osciloscopio.

la tarjeta seleccionando en la etiqueta superior Counter I/O, se visualiza la ventana mostrada en la figura C.15 para comprobación de los contadores de la tarjeta de adquisición de datos. Se debe tener en cuenta que estos contadores pueden funcionar de tres formas mostradas en la selección Counter Mode: funciona como generador de tren de pulsos, generación de un pulso singular y un evento simple de conteo la manera más sencilla de comprobarlo es seleccionando un evento simple de conteo, seleccionamos el contador que deseamos probar y en la etiqueta Event Source seleccionamos el pin a utilizar para el conteo, el pin de GPCTR0 (PFI8) si es el contador 0 o GPCTR1(PFI3) para el contador 1 estos pines son los 37 y 42 del tablero de conexión. Luego se debe conectar el generador de señales generando pulsos de 1 Hz en el pin correspondiente que desea analizar y se observará en la etiqueta Counter Value un conteo ascendente en 1 de cada vez que el contador perciba un pulso de 5V en el pin del contador, es de aclarar que este contador funciona con compatibilidad TTL que son valores de 0 para 0V y de 1 para 5V.

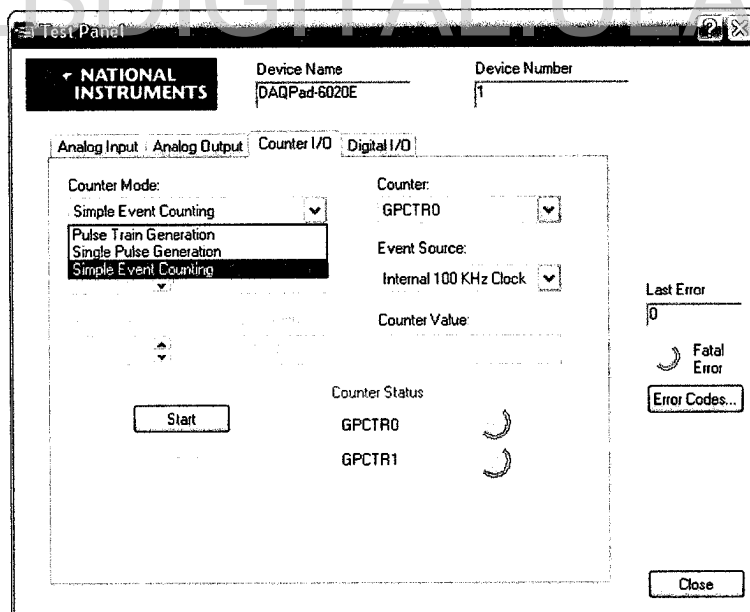


Figura C.15: Configuración de contador

Se puede decir que la tarjeta está comprobada con este procedimiento.

Nota: Si la tarjeta no paso alguna de las pruebas o las señales no corresponden a la señal ingresada será necesario ejecutar un programa de calibración que está ubicado

en los ejemplos de LabWindows en el directorio raíz de la carpeta

C:\Archivosdeprograma\NationalInstruments\CVI85\samples\daq\Calib.

Se debe aclarar que antes de ejecutar este programa todas las entradas análogas deben estar puestas a tierra análoga o a los pines de referencia de la tabla 1 para que pueda ser referido al valor cero en la calibración. Se ejecuta el programa y este graba los valores de cero en cada uno de los canales de entrada análoga.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Referencias

- [1] Diaz Cagua Johel y Laurent Suárez José. *Análisis Estático y Dinámico de un Rotor para Pruebas en Rodamientos*. Tesis de Grado Ingeniería Mecánica, 2008.
- [2] Mendez-Adriani Jose Alberto. *Balanceo dinámico de maquinaria rotativa*. Abril de 1995 edition, Abril de 1995.
- [3] Vance J.M. *Rotordynamics of Turbomachinery*. 1988.
- [4] Edgar Estupiñán P y César San Martín y Luis Canales M. Desarrollo de un instrumento virtual para el balanceamiento dinámico de rotores. *Ingeniería - Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 14 N° 2, pages 146–152, 2006.
- [5] ISO. *Mechanical vibration - Balancing - Vocabulary*. ISO, Switzerland, 1990. Norma ISO.
- [6] Shigley J.E. *Dynamic Analysis of Machines*. 1961.
- [7] Späth W. *The Balancing Primer*. Girardet. 1967.
- [8] Glen White. *Introducción al Análisis de Vibraciones*, volume Azima DLI. Azima DLI, 3 edition, 2010.
- [9] National Instruments. *NI Sound and Vibration Toolkit*. National Instruments, USA, 2005. Manual toolkit.
- [10] IRD Mechanalysis. *Captación Audiovisual para Clientes y Manual de Instrucciones*. 1978.
- [11] Holowenko A.R. *Dynamic of Machinery*. Number 259-293,383-456. 1958.

- [12] Baur P. *Field Balancing of Rotating Machinery*, volume 127. October 1983. S-1 to S-16.
- [13] Reutlinger+Soehne. *Operating Instructions for Reutlinger Universal Balancing Equipment RS 12863*.
- [14] Lindsey J.R. *Significant Developments in Methods for Balancing High-Speed Rotors*. Number 69 VIBR-53. ASME, 1969.
- [15] Jose M. Olivo P. *Balanceo de Máquinas Rotativas*. Universidad de Los Andes, Mérida, 1995.
- [16] Ramamurti V. y Anantaraman K.V. *Two Plane In Situ Balancing*, volume 134 of p.343-352. Journal of Sound And Vibrations, 1989.
- [17] Lee C. W. *Vibrations Analysis of Rotors*. Kluwer, 1993.
- [18] Moore L. S. *Balancing of Large Turbine Rotors*.
- [19] Entek IRD. *Dynamic Balancing Handbook*. 1996.
- [20] Furgencia. *Análisis de Vibraciones y Balanceo de Maquinaria Rotativa*.
- [21] Thearle E. L. *Dynamic Balancing of Rotating Machinery in the Field*. Transaction of the ASME: Applied Mechanics, Octubre 1934.
- [22] Wowk V. *Machinery Vibration: Balancing*. 1995.
- [23] Ayres F. *Matrices*. Schaum. 1962.
- [24] Churchill R. V. *Complex Variables and Applications*. 1960.
- [25] Martin G. H. *Kinematics and Dynamics of Machines*. 1969.
- [26] Spiegel M. R. *Complex Variables*. Schaum. 1964.
- [27] Javier Vega. *Analizador de Vibraciones en Equipos Rotativos con velocidades variables.*, volume Tesis de Grado. Universidad de los Andes, 2009.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

- [28] Velasco Ignacio Moreno. *Apuntes de Instrumentación electrónica (03-04)*, volume Area de Tecnología Electrónica of *DAQ*. Universidad de Burgos, 2004.
- [29] National Instruments. *DAQ-pad 6020E User Manual*. Multifunction I/O Devices for USB, USA, septiembre 1998 edition, 1998.
- [30] William Bolton. *Mecatrónica. Sistemas de Control Electrónico en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica*. Febrero de 2006, tercera edición edition, 2006.
- [31] Antonio Creus. *Instrumentación Industrial*. Barcelona, sexta edition, 1998.
- [32] National Instruments. *Order Analysis Toolset User Manual*. National Instruments, USA, 2003. Manual toolset.
- [33] Fernandez Joaquin del Rio. Lázaro Antonio Manuel. *Labview 7.1. Programación Gráfica para el control de instrumentación*. Labview. Universidad Politécnica de Catalunya, 1 edition, 2006.
- [34] Wilcoxon Research USA. Installation of vibration sensors. Technical report, 2010.
- [35] National Instruments. User manual. Technical Report 320999B-01, 1998.
- [36] National Instruments. Installation guide traditional ni-daq. Technical Report 374279A-01, Octubre de 2005.
- [37] Normativa. Iso 10816. www.sinais.es/normativa/iso10816.html.
- [38] Dean Lofall and Azima DLI. *Introducción al Análisis de Vibraciones*. Mecanica. U.S.A, 1998.