

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL  
EJÉRCITO**

**EXTENSIÓN LATACUNGA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA E  
INSTRUMENTACIÓN**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL  
PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES DE UN HELICÓPTERO  
LAMA 315 B**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA ESPECIALIDAD INSTRUMENTACIÓN**

**PEPE F. IBAÑEZ J.  
MARIO E. ACURIO G.**

**LATACUNGA, JULIO 2.010**

## **CERTIFICACIÓN**

Se certifica que el presente proyecto de grado “Diseño e implementación de un instrumento virtual para el análisis de vibraciones de un helicóptero Lama 315B“ ha sido elaborado íntegramente por los señores Pepe F. Ibáñez J. y Mario E. Acurio G. bajo nuestra supervisión.

---

Ing. Acosta Núñez Julio  
DIRECTOR DEL PROYECTO

---

Ing. Ávila Rosero Galo  
CODIRECTOR DEL PROYECTO

## **AGRADECIMIENTO**

Un sentido agradecimiento a los Ingenieros Julio Acosta Director y Galo Ávila Codirector del proyecto de tesis, por su eficiente y orientadora dirección durante el desarrollo en la ejecución del presente proyecto; a la Aviación del Ejército por su apoyo desinteresado y continuo en dar las facilidades para aplicar los conocimientos teóricos en el desarrollo de un instrumento virtual para la corrección de vibraciones en helicópteros.

Al Ejército Ecuatoriano por haber permitido servirle desde la trinchera del esfuerzo intelectual para concluir con el desarrollo de este proyecto que será en beneficio de la institución armada.

A mi madre y demás familiares por el apoyo fiel y continuo de las mejores perspectivas de buenos deseos.

PEPE.

A Dios por haberme dado la oportunidad de vivir y dejarme disfrutar cada día.

A mis padres por ser, con su ejemplo, cariño y consejo, la luz que ilumina el sendero de mi vida y me acompañan en todos los momentos buenos y malos de la existencia.

A cada una de las personas especiales en mi vida por aceptarme, quererme y apoyarme en todos los actos de mi vida por su comprensión, apoyo y cariño.

MARIO.

## **DEDICATORIA**

**A mi madre, familiares por el apoyo sincero y continuo en mis proyectos de vida.**

**Al Ejército Ecuatoriano, institución que es parte constitutiva de la sociedad ecuatoriana para el desarrollo del Estado que me permitió ejecutar mis actividades de compromiso y de juramento en defensa de los más altos intereses de la nación.**

**Pepe**

**A las todas las personas que me han impulsado, guiado, ayudado, comprendido y llenado de cariño durante todos los días de mi vida, mis padres y amigos.**

**Mario**

# ÍNDICE

## CAPÍTULO I.- FUNDAMENTOS

1.1.-	
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.1.- Reducción de la vibración en la fuente.....	1
1.2.- IMPORTANCIA DEL PROYECTO.....	2
1.3.- CONCEPTOS BÁSICOS DE VIBRACIONES.....	4
1.3.1.- ¿Qué es una Vibración?.....	4
1.3.2.- Definición de Vibración.....	4
1.4.- CLASES DE VIBRACIONES. ....	8
1.4.1.- Vibración Simple.....	8
1.4.2.- Vibración Compuesta.....	9
1.4.3.- Vibración aleatoria y golpeteos intermitentes.....	10
1.4.4.- Frecuencia natural y resonancias.....	11
1.4.5.- Otras clases de vibraciones.....	11
1.4.2.- Las causas de las vibraciones mecánicas.....	12
1.5.- VARIABLES APLICABLES EN EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES.....	12
1.5.1.- Análisis Espectral.....	12
1.5.2.- Desbalanceo.....	13
1.5.2.1.- Estático.....	14
1.5.2.2.- Dinámico.....	14
1.5.2.3.- Rotor Colgante.....	14
1.5.3.- Desalineación.....	15
1.5.3.1.- Angular.....	15
1.5.3.2.- Paralela.....	15
1.5.3.3.- Entre Chumaceras.....	16
1.5.4.- Holgura Mecánica eje-agujero.....	16
1.5.4.1.- Holgura Eje-Agujero.....	16
1.5.5.- Soltura Estructural.....	17
1.5.6.- Excentricidad.....	18

1.5.6.1.- Rotor Excéntrico.....	18
1.5.6.2.- Rotor o Eje Pandeado.....	18
1.5.7.- Resonancias y Pulsaciones.....	19
1.5.7.1.- Resonancia.....	19
1.5.7.1.- Pulsaciones.....	19
1.5.8.- FALLAS DE RODAMIENTOS .....	19
1.5.8.1.- Falla en Pista Interna.....	20
1.5.8.2.- Falla en Pista Externa.....	21
1.5.8.3.- Falla en Elementos Rodantes.....	22
1.6.- VALORACIÓN DE LAS VIBRACIONES.....	22
1.6.1.- Medición de Vibraciones.....	23

## **CAPÍTULO II.- ANÁLISIS DE VIBRACIONES**

2.1.- ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS ROTATORIAS.....	23
2.1.1.- Medición de la amplitud de la vibración.....	26
2.1.2.- ANALIZADOR DEL ESPECTRO DE VIBRACIÓN.....	27
2.1.2.1.- Puntos de medición.....	27
2.2.- NORMAS DE SEVERIDAD.....	29
2.2.1.- Estructuras mecánicas.....	30
2.2.2.- Fallos detectables por vibraciones en máquinas rotativas.....	32
2.2.2.1.- Desequilibrios.....	32
2.2.2.2.- Eje curvado.....	33
2.2.2.3.- Desalineamiento.....	33
2.2.2.4.- Problemas electromagnéticos.....	35
2.2.2.5.- Problemas de sujeción a bancada.....	35
2.2.2.6.- Holguras excesivas.....	35
2.2.2.7.- Mal estado de rodamientos y cojinetes.....	36
2.3.- SISTEMAS LINEALES Y NO LINEALES.....	36
2.4.- DESEQUILIBRIO.....	37
2.5.- SENSORES DE VIBRACIÓN.....	38
2.5.1.- ACELERÓMETROS.....	38
2.5.2.- EL ACELERÓMETRO DE DOS EJES ADXL202.....	39

2.6.- EL ACELERÓMETRO.....	40
2.6.1.- SENSORES DE VELOCIDAD.....	43

### **CAPÍTULO III.- ESTUDIO Y MONTAJE**

3.1.- LEVANTAMIENTO DE LOS REQUISITOS DEL SISTEMA.....	45
3.1.1.- Para los requisitos esenciales de la adquisición de la señal.....	45
3.1.2.- Requisitos computacionales.....	45
3.1.2.- Configuración del equipo .....	46
3.2.-PREPARACIÓN DEL TRABAJO (MONTAJE DE LOS ACCESORIOS).....	47
3.2.1.- Montaje del interruptor.....	47
3.2.2.- Montaje del soporte del captor magnético .....	48
3.2.3.- Montaje del acelerómetro y soporte .....	49
3.2.4.-Montaje del acelerómetro y su soporte dentro de la cabina.....	52
3.2.5.- Montaje de los blancos (referencias a las palas).....	53
3.3.- SENSOR DE VIBRACIONES EN ROTOR DE COLA.....	54
3.3.1.- Montaje del material de medida.....	55
3.3.2.-Modo de ejecución.....	55
3.3.3.- Condiciones de retoques del desequilibrio .....	55
3.3.3.1.- Tolerancias.....	56
3.4.- CONOCIMIENTO BÁSICO DE LAS HERRAMIENTAS.....	56
3.5.- CONEXIÓN DE LAS FUENTES DE ALIMENTACIÓN .....	58

### **CAPÍTULO IV. - SISTEMAS DE ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS**

4.1.- PRINCIPIOS BÁSICOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	59
4.2.- HARDWARE Y SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	59

4.2.1.- Selección del hardware (Tarjeta de adquisición de Datos).....	62
4.2.2.-Selección del software.....	62
4.2.2.1.- DAQ configuración en LabView.....	64
4.2.3.-Ubicación del foto tacómetro (SENSOR óptico).....	65
4.2.4.- Acondicionamiento de señal para el foto tacómetro.....	65
4.2.4.1.- Cálculo de las resistencias.....	66
4.3.- DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	67
4.3.1.-Implementación en Labview.....	68
4.3.2.-Diagrama general.....	69
4.3.3.- Menú principal.....	69
4.3.4.-Tracking .....	71
4.3.5.- Medición de vibración.....	73
4.3.6.- Cálculo de correcciones.....	77
4.3.7.- Guardar datos.....	79
4.3.8.- Revisión de históricos.....	80
4.4.- DETERMINACIÓN DE DATOS CORRECTIVOS EN EL PROCESO.....	82

## **CAPÍTULO V.- DISEÑO DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CORRECCIÓN**

### **INTRODUCCIÓN**

5.1.- DESCRIPCIÓN FÍSICO DEL SISTEMA.....	86
5.2.- OPTIMIZACIÓN, CALIBRACIÓN Y AJUSTE DEL HW Y SW.....	87
5.3.- PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	86
5.4.- ALCANCES Y LIMITACIONES.....	88
5.4.1.- Alcances.....	88



5.4.2.- Limitaciones.....	90
5.5.- ANÁLISIS TÉCNICO – ECONÓMICO.....	91

## **CAPÍTULO VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

6.1.-	
CONCLUSIONES.....	92
6.2.-RECOMENDACIONES.....	93
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	95

MANUAL DEL USUARIO

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ANEXOS

## PRÓLOGO

En el mantenimiento de aeronaves que tienen conjuntos motorices para su propulsión específicamente los helicópteros que poseen conjuntos mecánicos rotatorios en la generación motriz, se hace necesario las acciones correctivas para reducir vibraciones generadas en sus conjuntos oscilatorios y estructura (a nivel de célula y botalón de cola).

La implementación del analizador virtual de vibraciones permitirá los correctivos necesarios a fin de minimizar el nivel de error en vibraciones requeridos por el fabricante determinados en el manual de mantenimiento que para el caso del helicóptero Lama es de 0.2 IPS, para que el aeronave se encuentre en condiciones tanto seguras, operativas de mantenimiento; para poder emplearse en cumplimiento con las normas de aeronavegabilidad requeridas.

El proyecto de tesis describe un análisis en el estudio de ingeniería, diseño e implementación de un instrumento virtual para el análisis de vibraciones de un helicóptero Lama 315 B en donde se realiza el inicialmente las siguientes acciones necesarias para la corrección de vibraciones que a continuación se describen:

- El Tracking acción que determina que todas las punteras de pala pasen por un mismo punto.
- El balanceo acción de calibrar los pesos en el plano de rotación de un conjunto giratorio en nuestro caso en el rotor principal y rotor de cola.

Por lo que el desarrollo del instrumento virtual se basó en el software LabView, donde se visualizó en un HMI amigable para el usuario de fácil operación, donde como insumos de entrada, se adquirió la señal por medio de una tarjeta de adquisición de datos DAQ NI 9234, que tiene como característica que recibe la señal en tiempo real generados para el nuestro caso de una lámpara estroboscópica, acelerómetro, captor magnético y captor óptico por lo nos presenta un sistema alternativo para la corrección de vibraciones en aeronaves.

El capítulo 1 introduce la teoría fundamental de vibraciones en conjuntos mecánicos, que se trata de entender la descripción de los sistemas giratorios como las variables que intervienen, sus tipos y requisitos del sistema.

El capítulo 2 incluye un estudio el análisis de espectro de vibraciones, representación de las condiciones de desequilibrio y descripción de los sensores que son requisitos del sistema.

El capítulo 3 aborda el estudio y montaje de los requisitos del sistema en los conjuntos rotatorios del helicóptero.

El capítulo 4 presenta una descripción de los sistemas de adquisición, procesamiento y análisis de datos así como la ejecución del código fuente de la programación del software para el desarrollo del instrumento virtual de las herramientas empleadas en el instrumento diseñado, indicando ciertas características técnicas de la tarjeta y software empleados en el desarrollo del proyecto.

El capítulo 5, detalla el funcionamiento del sistema basadas en la pruebas reales y el análisis completo en la ejecución del proyecto.

El capítulo 6, presenta las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

**El proyecto fue considerado por motivos de desarrollar instrumentos virtuales que ejecuten actividades de mantenimiento con equipos propios de corrección y calibración de los sistemas integrantes de una aeronave siendo un apoyo en la ejecución de las actividades lo que permitirá un desarrollo investigativo y tecnológico permitiendo un ahorro significativo en los recursos que emplea la Aviación del Ejército.**

Estamos seguros que el aporte que hemos logrado con el desarrollo del presente proyecto servirá como fuente de consulta, análisis de investigación, siendo válido y de utilidad para

los profesores y estudiantes de la ESPE, así como para el personal técnico de la Brigada de Aviación del Ejército.

# **CAPÍTULO I**

## **FUNDAMENTOS**

### **1.1.- INTRODUCCIÓN**

Los sistemas rotatorios que poseen las aeronaves, específicamente los helicópteros están expuestos a desgates. La razón principal para analizar y diagnosticar el estado de una máquina rotatoria es determinar las medidas necesarias para corregir la condición de vibración, reducir el nivel de las fuerzas vibratorias no deseadas y no necesarias. De manera que, al estudiar los datos, el interés principal deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de la vibración, la determinación de las causas, y la corrección del problema que ellas representan; tanto los que afectan las sistema motriz (turbina, caja de transmisión principal, mástil rotor, rotor principal, caja de transmisión trasera y rotor de cola), así como el resto de la estructura o célula y las alteraciones que producen al cuerpo humano de la tripulación como parte integral de una aeronave.

Dependiendo de la frecuencia del movimiento oscilatorio y de su intensidad, la vibración puede causar sensaciones muy diversas que van desde el simple desajuste en la comodidad, hasta alteraciones graves de la salud, pasando por la interferencia con la ejecución de ciertas tareas como la lectura, la pérdida de precisión al ejecutar movimientos o la pérdida de rendimiento debido a la fatiga de la tripulación.

#### **1.1.1.- REDUCCIÓN DE LA VIBRACIÓN EN LA FUENTE.**

Normalmente, es el fabricante de las herramientas o el instalador de un equipo el responsable de conseguir que la intensidad de la vibración que sea tolerable, también es importante un diseño ergonómico de los asientos y empuñaduras. En algunas circunstancias, es posible modificar una máquina para reducir su nivel de vibración cambiando la posición de las masas móviles, modificando los puntos de anclaje o las uniones entre los elementos móviles.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal, introducir y explicar los conceptos fundamentales de la aviónica, análisis vibratorio e instrumentación virtual desarrollando una interfase que tiene la posibilidad de poder conectar diferentes sensores y a través de un programa de computación realizar las mediciones de diferentes magnitudes físicas y mediante el análisis matemático y mecánico reducir el nivel vibratorio a parámetros de aceptación determinados por el manual de mantenimiento. Para el análisis de vibración se necesita una herramienta de diagnóstico poderosa que evalúe el comportamiento y el estado del objeto bajo prueba. Para este propósito es necesario medir en tiempo real de las vibraciones de la superficie de los planos rotores para su condición de balanceo.

En respuesta a los niveles de mantenimiento para helicópteros se hace necesario las acciones correctivas en el campo de las vibraciones dirigidos a los conjuntos oscilatorios ocasionados tanto en la generación motriz y en su estructura (a nivel de célula y botalón de cola).

La implementación del instrumento virtual para el análisis de vibraciones permitirá establecer los correctivos necesarios a fin de minimizar el nivel de error en vibraciones requeridos por el fabricante, para que la aeronave se encuentre en condiciones tanto seguras y operativas de mantenimiento y pueda emplearse en cumplimiento de las normas de aeronavegabilidad requeridas.

## **1.2.- IMPORTANCIA DEL PROYECTO.**

Ante los mínimos recursos que dispone la Fuerza Terrestre destinados para mantenimiento, se hace difícil la adquisición de varios equipos de corrección de vibraciones como el Vibrex 2000, los mismos que son instrumentos para el análisis y corrección de vibraciones. Como solución a esto, se trata de implementar equipos que realizarán las mismas funciones utilizando la plataforma virtual (HW-SW), equipo que brinda las mismas prestaciones que el equipo Vibrex 2000.

Es necesario crear herramientas en este caso de forma virtual con el apoyo de la electrónica que está en continuo desarrollo tecnológico y científico, lo que permite implementar elementos físicos para la adquisición de datos y enlazarlos mediante drivers como interfaces de comunicaciones y el análisis de las señales generadas por los conjuntos mecánicos- rotatorios para la visualización de datos concretos en la compensación del balanceo del plano rotor horizontal (fuerza par) y vertical (fuerza antipar) , tanto en el rotor principal como en el rotor de cola del Helicóptero.

El interés principal para el Mantenimiento deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de la Vibraciones detectadas en el elemento o máquina, la determinación de las causas de la vibración, y la corrección del problema que ellas representan. Las consecuencias de vibraciones Mecánicas son el aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales, y las más temidas: daños por fatiga de los materiales, además de ruidos molestos en el ambiente laboral, etc.

El empleo del análisis de vibraciones en el contexto del Mantenimiento Predictivo como técnica de la detección del deterioro progresivo de las máquinas es una técnica del fácil uso, precisa, eficiente y económica.

En el mantenimiento predictivo el procedimiento general es monitorizar la maquinaria bajo condiciones de test repetibles y observar los cambios; mientras la máquina no falle, los patrones de vibración no deberían cambiar. Por el contrario, si la máquina falla, los patrones cambiarán, y entonces será fácil determinar dónde ha ocurrido el fallo y dónde está la causa de ese fallo.

El análisis de vibraciones para la monitorización de la condición de la maquinaria es el hecho de tomar lecturas de vibración y compararlas con un nivel de alarmas prefijado.

La parte más esencial y dificultosa de la implantación de un programa de mantenimiento predictivo es recopilar la información técnica referente a las máquinas, definir las condiciones de medida, recoger buenos datos de vibración que sean repetibles en el tiempo y establecer los puntos de partida. Luego, deberemos gestionar toda esta información en una base de datos e incluir históricos de reparaciones y sustituciones.

## **1.3.- CONCEPTOS BÁSICOS DE VIBRACIONES.**

### **1.3.1.- ¿QUÉ ES UNA VIBRACIÓN?**

En términos muy simples una vibración es un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud. Todos los cuerpos presentan una señal de vibración en la cual plasman cada una de sus características. De acuerdo a esto, las máquinas presentan su propia señal de vibración y en ella se encuentra la información de cada uno de sus componentes. Por tanto, una señal de vibración capturada de una máquina significa la suma vectorial de la vibración de cada uno de sus componentes.

### **1.3.2.- DEFINICIÓN DE VIBRACIÓN**

Se dice que un cuerpo vibra cuando experimenta cambios alternativos, de tal modo que sus puntos oscilen sincrónicamente en torno a sus posiciones de equilibrio, sin que el campo cambie de lugar.

Como otro concepto de vibración, se puede decir que es un intercambio de energía cinética en cuerpos con rigidez y masa finitas, el cual surge de una entrada de energía dependiente del tiempo. Este intercambio de energía puede ser producido por:

- Desequilibrio en Máquinas Rotatorias
- Entrada de Energía Acústica
- Circulación de Fluidos o masas
- Energía Electromagnética

La medición de Vibración, juega un papel muy importante en el desarrollo de técnicas para reducirla, y en el establecimiento de límites en los niveles de ruido de la maquinaria existente en una instalación industrial. Aproximadamente el 50% de las averías en máquinas rotativas se deben a desalineaciones en los ejes. Las máquinas mal alineadas generan cargas y vibraciones adicionales, causando daños prematuros en rodamientos, obturaciones y acoplamientos, también aumenta el consumo de energía. Gracias a los avances de la electrónica, actualmente se tienen instrumentos de medición altamente



sofisticados que permiten cuantificar la vibración de manera precisa, a través de diversos principios. Es por esto que es muy importante, un buen entendimiento de los transductores empleados para la medición de vibración, y su interfaz con los sofisticados equipos de instrumentación y de adquisición de datos.

Los siguientes parámetros son necesarios definirlos:

- **Frecuencia:** Es el tiempo necesario para completar un ciclo vibratorio. En los estudios de Vibración se usan los cpm (ciclos por minuto) o HZ (hertz).
- **Desplazamiento:** Es la distancia total que describe el elemento vibrante, desde un extremo al otro de su movimiento.
- **Dirección:** Las vibraciones pueden producirse en 3 direcciones lineales y 3 rotacionales.
- **Resonancia:** Fenómeno que ocurre cuando la frecuencia con la que se excita un sistema vibratorio es igual a su frecuencia natural.
- **Aceleración:** Razón de cambio de la velocidad respecto al tiempo.
- **Acelerómetro:** Sensor y transductor cuya entrada es la amplitud de aceleración y tiene una salida de voltaje de baja impedancia.
- **Alineación:** Posición en la cual las líneas centro de dos ejes deben ser lo más colineales posible, durante el tiempo de operación normal de la máquina.
- **Amplitud:** Es el máximo valor que presenta una onda sinusoidal.
- **Análisis Espectral:** Es la interpretación que se le hace a un espectro para determinar el significado físico de lo que pasa en una máquina.

- **Armónico:** Son frecuencias de vibración que son múltiples integrales de una frecuencia fundamental específica.

- **Axial:** Posición del sensor que va en el sentido de la línea del eje.

- **Balanceo:** Procedimiento por medio del cual se trata de hacer coincidir el centro de masa de un rotor con su centro de rotación, de manera que se pueda eliminar el mayor número de fuerzas inerciales.

- **Masa Equilibrante:** Masa utilizada en balanceo, para contrarrestar la masa desbalanceadora.

- **Período:** Es el tiempo necesario para que ocurra una oscilación o se complete un ciclo. Generalmente está dada en minutos y segundos.

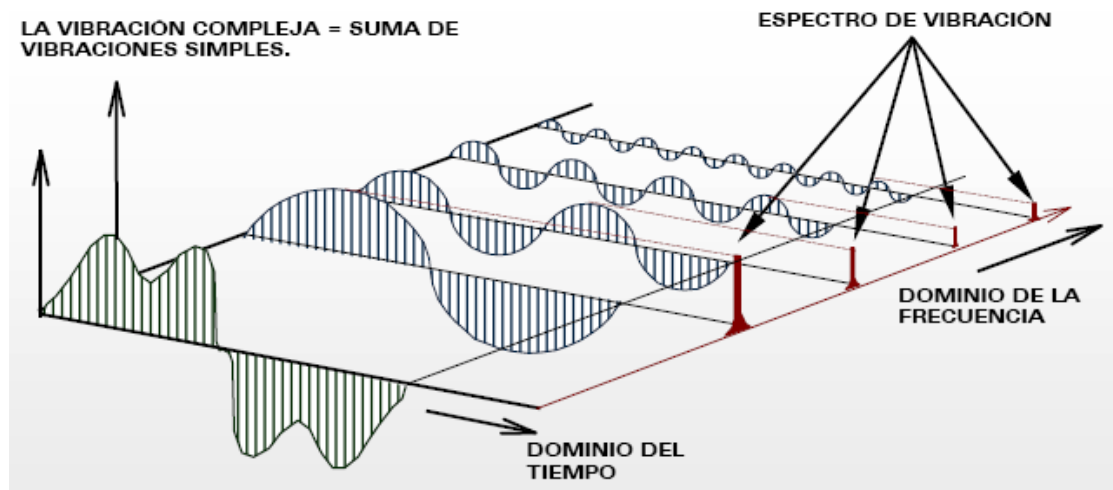
- **Transformada de Fourier:**

Hasta ahora sólo se han visto vibraciones en el dominio del tiempo, que son señales directas de la máquina. En estas señales se encuentra plasmada toda la información acerca del comportamiento de cada componente de la máquina. Pero hay un problema a la hora de realizar un diagnóstico: estas señales están cargadas de mucha información en forma muy compleja, la cual comprende las señales características de cada componente de la máquina, por lo cual prácticamente queda imposible distinguir a simple vista sus comportamientos característicos.

Existen otras formas para realizar un estudio de vibraciones, entre las cuales se encuentra mirar esta señal en el dominio de la frecuencia. Esta es la gráfica de Amplitud vs. Frecuencia y es conocida con el nombre de **espectro**. Esta es la mejor herramienta que se tiene actualmente para el análisis de maquinaria.

Fue precisamente el matemático francés **Jean Baptiste Fourier** (1768 – 1830) quien encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos.

Entonces lo que hace un analizador de espectros que trabaja con la transformada rápida de Fourier es capturar una señal desde una máquina, luego calcula todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por último las muestra en forma individual en el eje X de la frecuencia. En la siguiente ilustración de tres dimensiones (**Figura 1.1**) puede notarse claramente la señal compleja, capturada desde una máquina.



**Figura 1.1** Señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia (espectro)

A dicha señal se le calculan todas las series de señales sinusoidales en el dominio del tiempo y por último se muestra cada una en el dominio de la frecuencia. La Figura 1.2 muestra una señal en el dominio del tiempo y su correspondiente en el dominio de la frecuencia.



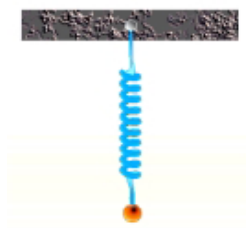
(a) señal en el dominio del tiempo      (b) Espectro de la señal = señal  
en el dominio de la frecuencia  
ángulos de fase = 90 grados

**Figura 1. 2.** Señal en el dominio del tiempo y su correspondiente en el dominio de la frecuencia.

## 1.4.- CLASES DE VIBRACIONES.

### 1.4.1.- VIBRACIÓN SIMPLE

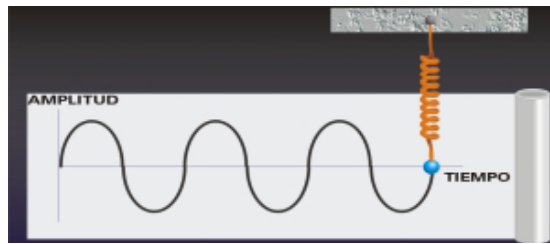
La base principal de las señales de vibración en el dominio del tiempo son las ondas sinusoidales. Estas son las más simples y son la representación de las oscilaciones puras. Una oscilación pura puede ser representada físicamente con el siguiente experimento: Imagínese una masa suspendida de un resorte como el de la Figura.1. 3.



**Figura1. 3.** Vibración simple

Si esta masa es soltada desde una distancia  $X_0$ , en condiciones ideales, se efectuará un movimiento armónico simple que tendrá una amplitud  $X_0$ . Ahora a la masa vibrante le adicionamos un lápiz y una hoja de papel en su parte posterior, de manera que pueda

marcar su posición. Si jalamos el papel con velocidad constante hacia el lado izquierdo se formará una gráfica parecida a la Figura. 1.4.



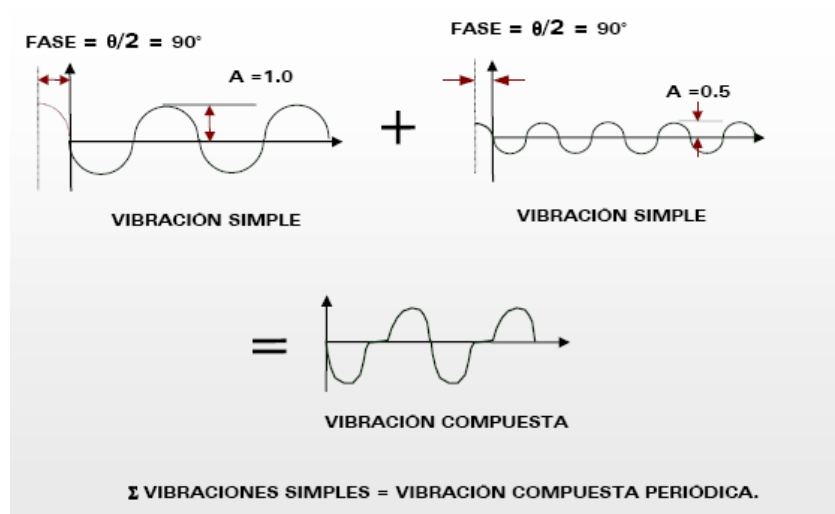
**Figura 1. 4.** Respuesta de la vibración en función del tiempo.

El tiempo que tarda la masa para ir y regresar al punto  $X_0$  siempre es constante. Este tiempo recibe el nombre de período de oscilación (medido generalmente en seg o mseg) y significa que el resorte completó un ciclo.

El recíproco del período es la frecuencia (es decir  $F=1/T$ ) la cual generalmente es dada en Hz (Ciclos por segundo) o también Ciclos por minuto (cpm).

### 1.4.2.- VIBRACIÓN COMPUESTA

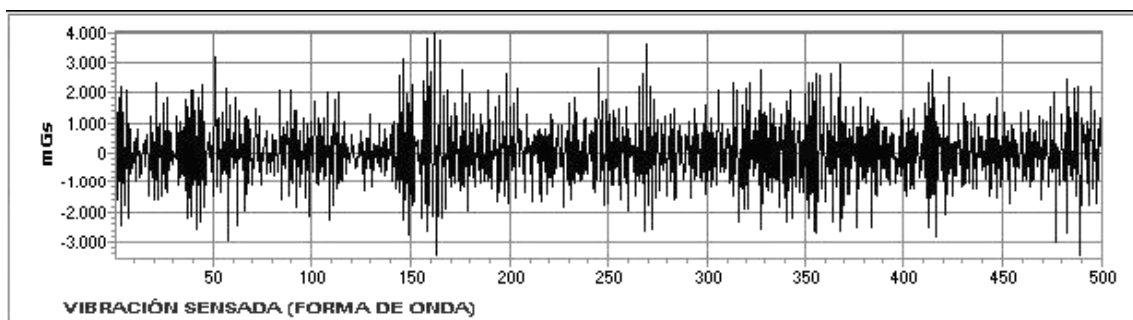
Una señal compuesta es una sumatoria de varias señales sinusoidales que comprenden cada uno de los componentes que se encuentran en la máquina, más todos los golpeteos y vibraciones aleatorias. El resultado es una señal como la ilustrada en la Figura 1.5



**Figura 1.5.** Vibración Compuesta.

### 1.4.3.- VIBRACIÓN ALEATORIA Y GOLPETEOS INTERMITENTES

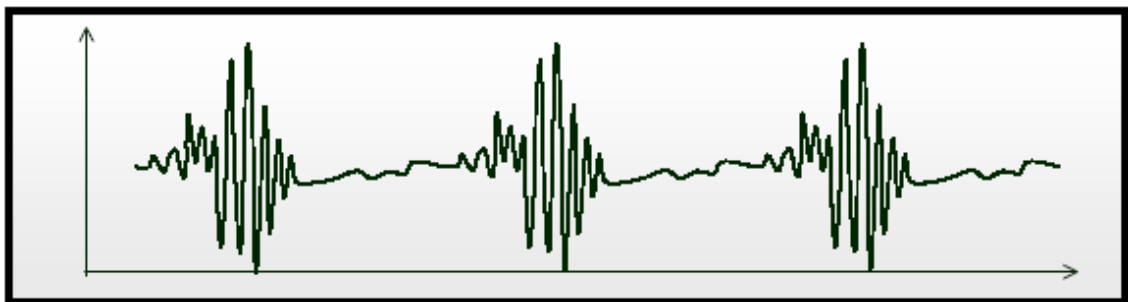
Además de las vibraciones simples, también existen otros tipos de vibraciones como son la vibración aleatoria y los golpeteos intermitentes. La vibración aleatoria no cumple con patrones especiales que se repiten constantemente o es demasiado difícil detectar donde comienza un ciclo y donde termina. Estas vibraciones están asociadas generalmente turbulencia en blowers y bombas, a problemas de lubricación y contacto metal-metal en elementos rodantes o a cavitación en bombas (Figura. 1.6).



**Figura1. 6.** Vibración Aleatoria.

Este tipo de patrones es mejor interpretarlos en el espectro y no en la onda en el tiempo.

Los golpeteos intermitentes están asociados a golpes continuos que crean una señal repetitiva. Estas se encuentran mas comúnmente en los engranajes, en el paso de las aspas de un impulsor o ventilador, etc. Este tipo de señales tiende a morir debido a la amortiguación del medio. En la Figura 1.7, se muestra claramente este fenómeno: un golpe intermitente que se amortigua con el medio.

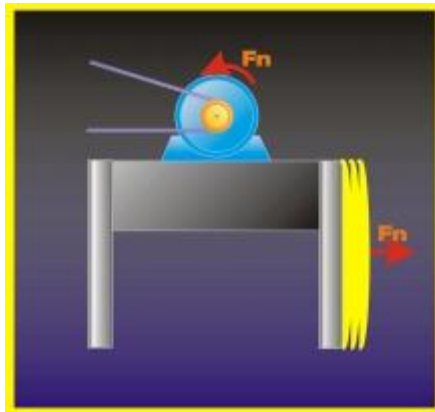


**Figura 1.7** Golpeteos intermitentes.

#### 1.4.4.- FRECUENCIA NATURAL Y RESONANCIAS

La frecuencia natural presenta un carácter muy diferente a las anteriormente nombradas, debido a que depende de las características estructurales de la máquina, tales como su masa, su rigidez y su amortiguación, incluyendo los soportes y tuberías adjuntas a ella. No depende de la operación de la máquina, a no ser que la rigidez sea función de la velocidad.

Si la frecuencia natural es excitada por un agente externo, la amplitud de vibración de la máquina se incrementará enormemente causando perjuicios que a corto o mediano plazo pueden llegar a ser catastróficos. Esto es lo que se conoce con el nombre de resonancia. Cuando una resonancia es detectada, es necesario identificar el agente externo que la está produciendo e inmediatamente debe aislarse estructuralmente o cambiar su velocidad de operación. La muestra un motor que gira a una velocidad similar a la frecuencia natural de su estructura de soporte. Lo que incrementa abruptamente los niveles de vibración de la máquina. Figura 1.8.



**Figura 1.8.** Motor que gira a una velocidad similar a la frecuencia natural de su estructura de soporte. Lo que incrementa abruptamente los niveles de vibración de la máquina.

#### 1.4.5.- OTRAS CLASES DE VIBRACIONES

- **Vibración libre:** causada por un sistema que vibra debido a una excitación instantánea.
- **Vibración forzada:** causada por un sistema que vibra debida a una excitación constante.

#### 1.4.2.- Las causas de las vibraciones mecánicas:

A continuación detallamos las razones más habituales por las que una máquina o elemento de la misma pueden llegar a vibrar:

- Vibración debida al Desequilibrado (maquinaria rotativa).
- Vibración debida a la Falta de Alineamiento (maquinaria rotativa)
- Vibración debida a la Excentricidad (maquinaria rotativa).
- Vibración debida a la Falla de Rodamientos y cojinetes.
- Vibración debida a problemas de engranajes y correas de Transmisión (holguras, falta de lubricación, roces, etc.).

### 1.5.-VARIABLES APLICABLES EN ANÁLISIS DE VIBRACIONES.

#### 1.5.1.- ANÁLISIS ESPECTRAL

Cuando se mide la respuesta de una máquina, se genera una información muy valiosa que es necesario analizar. El éxito de este análisis depende de la correcta interpretación que se le dé a los espectros capturados con respecto a las condiciones de operación en que se encuentra la máquina. A continuación se muestra un esquema de cómo sería la captura de la información desde una máquina para luego ser analizada (Figura 1.9).

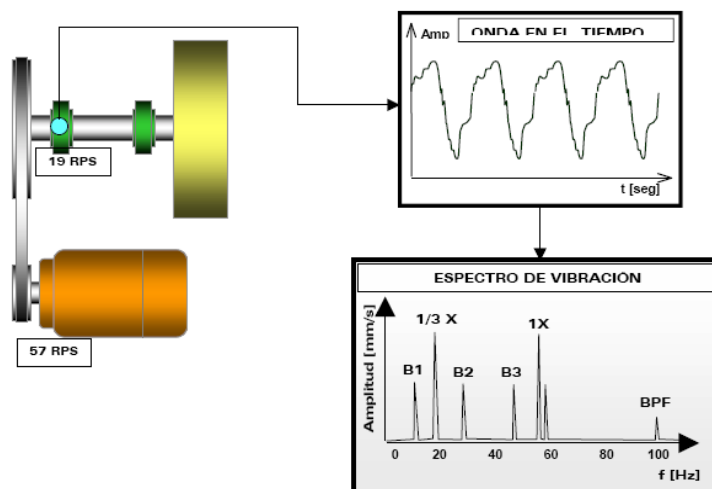
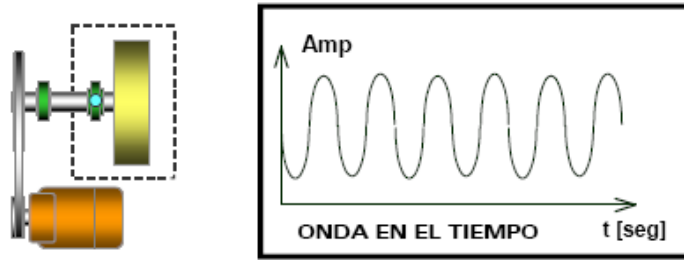


Figura 1.9. Esquema de captura de la información.



### 1.5.2.- DESBALANCEO

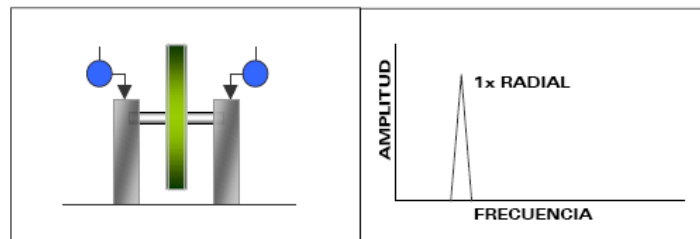
Determinado por condiciones de desequilibrio, que provoca niveles de vibraciones no permitidas que conllevan a daño en la estructura del eje y del conjunto rotatorio. Figura 1.10.



**Figura 1.10.** Respuesta de la condición de balanceo en función del tiempo.

#### 1.5.2.1.- Estático

Producido generalmente por desgaste radial superficial no uniforme en rotores en los cuales su largo es despreciable en comparación con su diámetro. El espectro presenta vibración dominante con una frecuencia igual a 1 X RPS del rotor. Se recomienda para corregir la falla balancear el rotor en un sólo plano (en el centro de gravedad del rotor) con la masa adecuada y en la posición angular calculada con un equipo de balanceo. Figura.1.11.

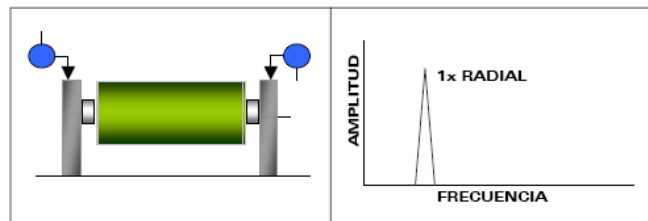


**Figura 1.11.** Desbalanceo Estático

#### 1.5.2.2.- Dinámico

El desbalanceo dinámico ocurre en rotores medianos y largos. Es debido principalmente a desgastes radiales y axiales simultáneos en la superficie del rotor. El espectro presenta

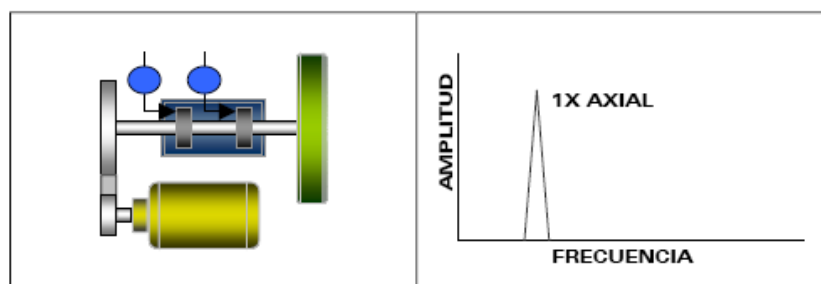
vibración dominante y vaivén simultáneo a frecuencia igual a 1 X RPS del rotor. Se recomienda para corregir la falla balancear el rotor en DOS PLANOS con las masas adecuadas y en las posiciones angulares calculadas con un equipo de balanceo dinámico. Figura.1.12.



**Figura 1.12.** Desbalanceo Dinámico.

### 1.5.2.3.- Rotor Colgante

Ocurre en rotores que se encuentran en el extremo de un eje. Es producido por desgaste en la superficie del rotor y doblamiento del eje. El espectro presenta vibración dominante a 1X RPS del rotor, muy notoria en dirección axial y radial. Para corregir la falla, primero debe verificarse que el rotor no tenga excentricidad ni que el eje esté doblado. Luego debe realizarse el balanceo adecuado. Figura. 1.13.



**Figura 1.13.** Rotor Colgante.

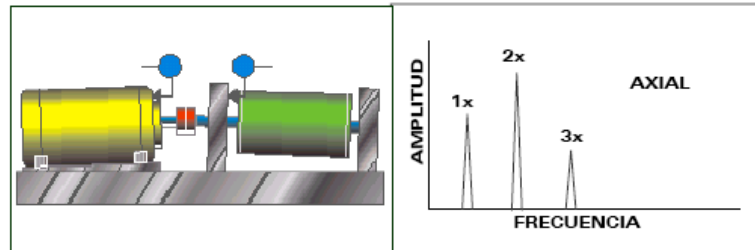
### 1.5.3.- Desalineación

Existe cuando los ejes de dos planos oscilatorios no se encuentran alineados.

#### 1.5.3.1.- Angular

Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido unidos en el acople, no son paralelos. Caracterizado por altas vibraciones axiales. 1X RPS y 2X RPS son las más comunes, con

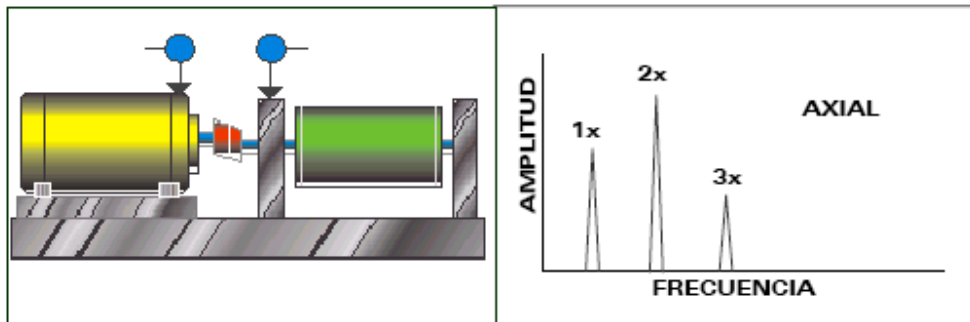
desfase de 180 grados a través del acople. También se presenta 3X RPS. Estos síntomas también indican problemas en el acople para corregirlo, el conjunto motor-rotor. Figura 1.14.



**Figura 1.14.** Desalineación Angular.

### 1.5.3.2.- Paralela

Los ejes del motor y del rotor conducido están paralelos, pero no son colineales. Se pueden detectar altas vibraciones radiales a 2X RPS, predominante, y a 1X RPS, con desfase de 180 grados a través del acople. Cuando aumenta la severidad, genera picos en armónicos superiores (4X , 8X). Se debe alinear el conjunto para corregir el daño. Figura 1.15.

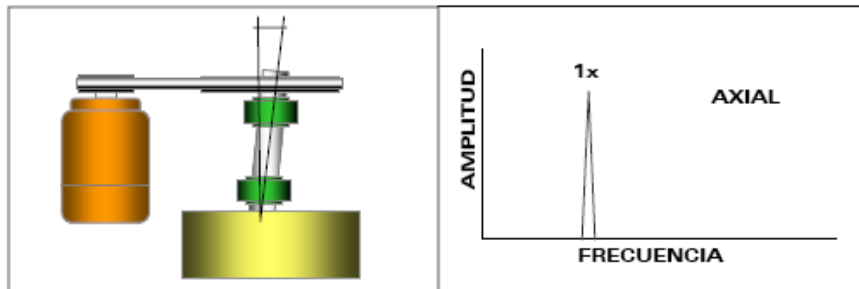


**Figura 1.15.** Desalineación Paralela.

### 1.5.3.3.- Entre Chumaceras

En una máquina con transmisión de poleas, la mala posición de las chumaceras puede evitar que el eje se acomode correctamente, lo cual genera vibraciones anormales en sentido axial y radial. Excitación del pico representativo de la velocidad (1X RPS),

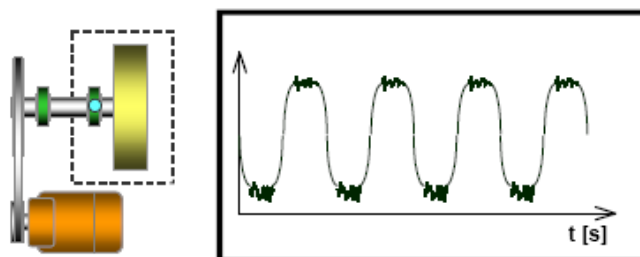
especialmente en sentido axial. Es necesario hacer una verificación de que las chumaceras queden completamente paralelas entre si. Figura 1.16.



**Figura 1.16.** Desalineación entre Chumaceras.

#### 1.5.4.- HOLGURA MECÁNICA EJE-AGUJERO

Afloxamientos, tolerancias de manufacturas que es similar de una manera opuesta al ajuste en ingeniería mecánica, el cual es la holgura o la interferencia entre dos partes. Por ejemplo, para un eje con un diámetro nominal de 10 milímetros se ensamblara en un agujero se tendrá que especificar el eje con un rango de tolerancia entre los 10.04 y 10.076 milímetros. Esto daría una holgura que se encontraría entre los 0.04 milímetros (eje mayor con agujero menor) y los 0.112 milímetros (eje menor con agujero mayor). En este caso el rango de tolerancia tanto para el eje y el hoyo se escoge que sea el mismo (0.036 milímetros), pero esto no es necesariamente el caso general. (Figura 1.17).



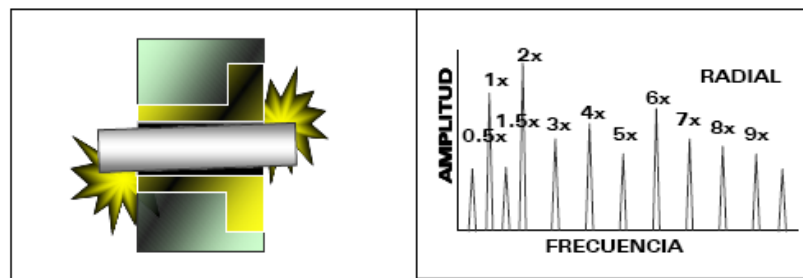
**Figura 1.17.** Respuesta Holgura mecánica eje-agujero en función del tiempo.

##### 1.5.4.1.- Holgura Eje-Agujero

Afloxamiento de manguitos, tolerancias de manufactura inadecuadas (con juego), y holgura entre el impulsor y su eje en bombas. Causa un truncamiento en la forma de onda en el

dominio del tiempo. La falla genera múltiples armónicos y subarmónicos de 1X RPS, destacándose los armónicos fraccionarios 1/2 X, 1/3 X, 1.5 X, 2.5 X. Frecuentemente la fase es inestable y el nivel máximo tiende a una dirección notable realizando lecturas radiales espaciadas 30 grados entre sí

Se recomienda verificar la colocación de los manguitos y los juegos eje-agujero cercanos al punto de medición. Igualmente, los ajustes de rotor-eje. Figura. 1.18.

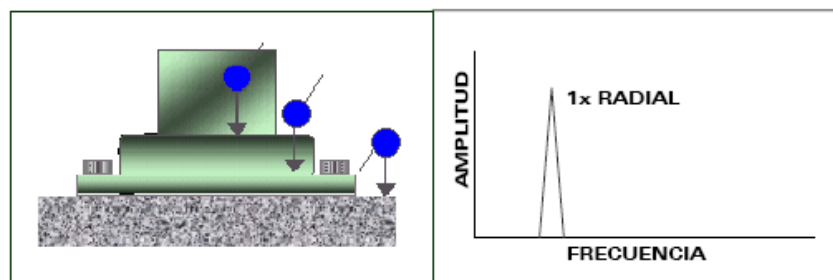


**Figura 1.18.** Holgura Eje-Agujero.

### 1.5.5.- SOLTURA ESTRUCTURAL

Ablandamiento o desplazamiento del pié de la máquina, por holgura en los pernos de la base o por deterioro de los componentes de la sujeción. El espectro presenta vibración a 1X RPS en la base de la máquina con desfase a 180 grados entre los elementos sujetos en el anclaje. Altamente direccional en la dirección de la sujeción.

Se recomienda primero revisar el estado de fatiga del pié de máquina (rajaduras, corrosión). Luego debe verificarse el estado de los sujetadores y por último el estado de la cimentación. Figura 1.19.



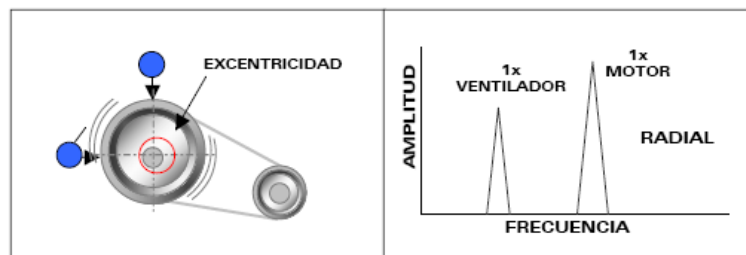
**Figura 1.19.** Soltura Estructural.

### 1.5.6.- EXCENTRICIDAD

Variación del centro de rotación del eje con respecto al centro geométrico del rotor.

#### 1.5.6.1.- Rotor Excéntrico

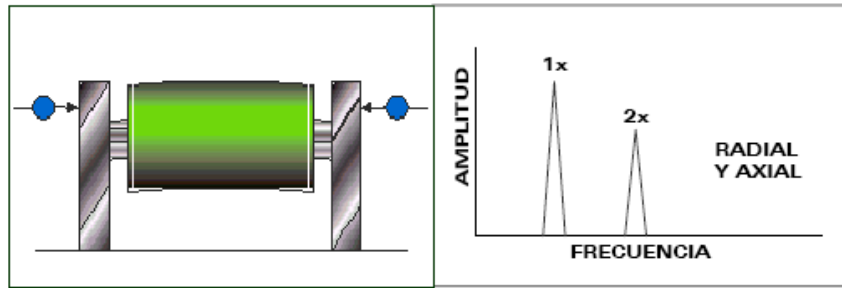
Fácilmente confundible con desbalanceo. Ocurre cuando el centro de rotación no coincide con el centro geométrico en una polea o engranaje. La mayor vibración ocurre a 1 X RPS del elemento con excentricidad, en dirección de la línea que cruza por los centros de los dos rotores. Para corregir la falla, el rotor debe ser reensamblado o reemplazado. (Tratar de balancear el rotor excéntrico resulta en una disminución del nivel de vibración, en una dirección, y un aumento considerable en la otra). Figura 1.20.



**Figura 1.20.** Rotor Excéntrico.

#### 1.5.6.2.- Rotor o Eje Pandeado

Se produce por esfuerzos excesivos en el eje. Genera Vibración AXIAL alta con diferencia de fase de 180 grados medida en los dos soportes del rotor. La vibración dominante es de 1X RPS si el pandeo está cercano al centro del eje, y es de 2XRPS si el pandeo está cerca del rodamiento. Para corregir la falla, el eje debe rectificarse o cambiarse. (Figura 1.21).

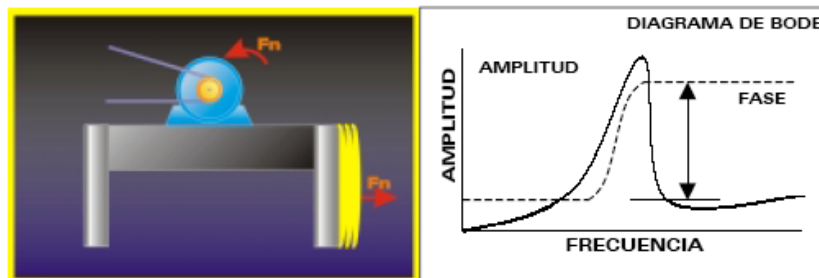


**Figura 1. 21.** Rotor o eje pandeado.

## 1.5.7.- RESONANCIAS Y PULSACIONES

### 1.5.7.1.- Resonancia

Ocurre cuando la velocidad de una fuerza conducida iguala la frecuencia natural de una estructura o una parte de ella. Puede causar dramáticas amplificaciones de la amplitud lo que puede terminar en fallas prematuras y posiblemente catastróficas. Presenta un cambio de fase de  $90^\circ$  por resonancia y  $180^\circ$  cuando lo sobrepasa. Se requieren cambios periódicos de localización de la frecuencia natural. Figura 1.22.

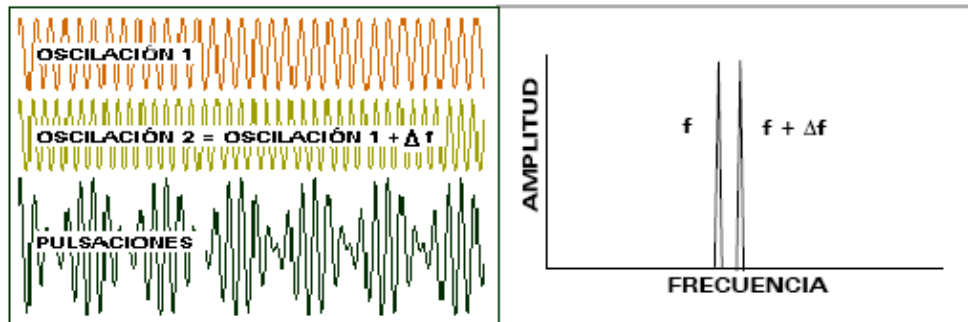


**Figura 1.22.** Resonancia.

### 1.5.7.1.- Pulsaciones

Sucede cuando una fuente de vibración interfiere con otra. Generalmente se produce por dos máquinas cercanas que trabajan casi a la misma velocidad. El espectro muestra dos picos con frecuencias similares. La diferencia de estas da como resultado una pulsación. La ilustración izquierda representa estas frecuencias en el dominio del tiempo y la suma de

ambas. Para solucionar el problema se deben aislar estructuralmente las máquinas en conflicto. Figura 1.23.



**Figura 1.23.** Pulsaciones.

## **1.5.8.- FALLAS EN RODAMIENTOS**

### **1.5.8.1.- Falla en Pista Interna**

Agrietamiento o desastillamiento del material en la pista interna, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de la pista interna, en dirección radial. Además el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz. El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento. Figura 1.24.

Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.



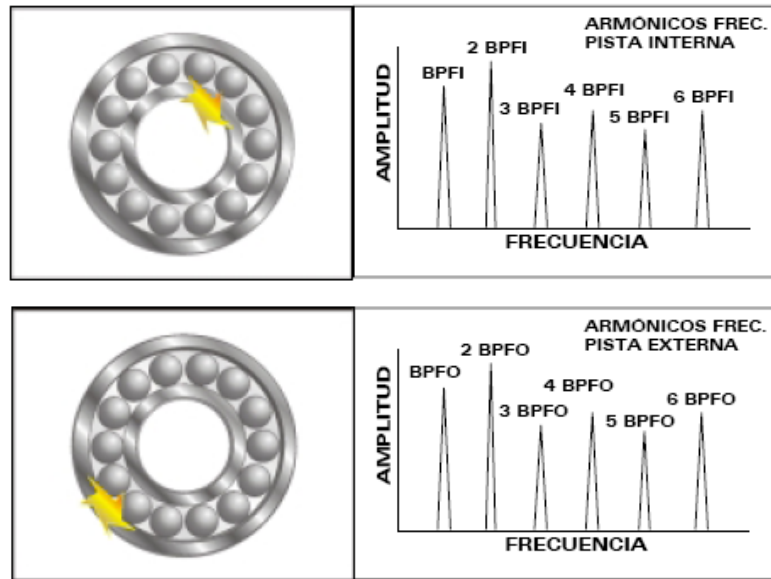


Figura 1.24. Falla en pista interna.

### 1.5.8.2.- Falla en Pista Externa

Agrietamiento o desastillamiento del material en la pista externa, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de la pista externa, en dirección radial. Además el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz.. El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes se debe revisar el estado de lubricación del rodamiento. Figura 1.25.

Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.

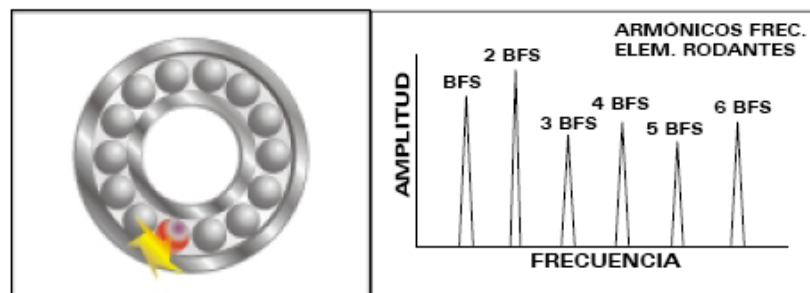


Figura 1.25. Falla en pista interna.

**1.5.8.3.- Falla en Elementos Rodantes:** Agrietamiento o desastillamiento del material en los elementos rodantes, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de los elementos rodantes, en dirección radial. Además el contacto metal – metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz.. El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento. Fig 1.26.

Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.

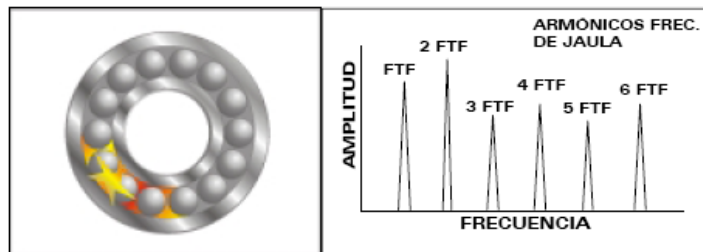


Fig 1.26. Falla en elementos rodantes.

## 1.6.- VALORACIÓN DE LAS VIBRACIONES

Su valoración se hace por instrumentos de medida, conocidos como vibrómetros que contienen en su interior unos filtros de ponderación que integran de acuerdo al potencial lesivo las siguientes variables: frecuencia, amplitud, eje X, Y o Z de entrada por manobrazo o por cuerpo entero. Los equipos consisten en:

- Transductor o acelerómetro.
- Integrador de la señal del acelerómetro.
- Analizador de frecuencias.
- Sistema de lectura.

### **1.6.1.- Medición de Vibraciones**

Las vibraciones se miden con vibrómetros cuyo componente principal es un transductor o acelerómetro en contacto con la superficie vibrante que convierte las vibraciones mecánicas en una señal eléctrica. Esta señal se trata adecuadamente en los circuitos del equipo de medida obteniendo los niveles de la aceleración expresados en  $m/s^2$  o  $rad/s^2$ .

## **CAPÍTULO II**

### **ANÁLISIS DE VIBRACIONES**

#### **2.1.- ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS ROTATORIAS**

La dinámica de sistemas mecánicos se manifiesta en muchas ocasiones como movimiento oscilante. El estudio de este tipo de dinámica es de especial interés por dos razones: en primer lugar para entender el diseño de dispositivos para aislar vibraciones y mejorar el funcionamiento de las máquinas y, por otro lado, para auscultar el funcionamiento de procesos e intentar predecir fallos.

Predecir la presencia de defectos en los rodamientos de máquinas que funcionan a baja velocidad, utilizando el análisis espectral de las vibraciones es una tarea dificultosa. Las vibraciones generadas por estas máquinas son de baja amplitud y el nivel de ruido en muchos de los casos puede ser el suficiente como para no poder identificar las vibraciones generadas por la presencia de defectos.

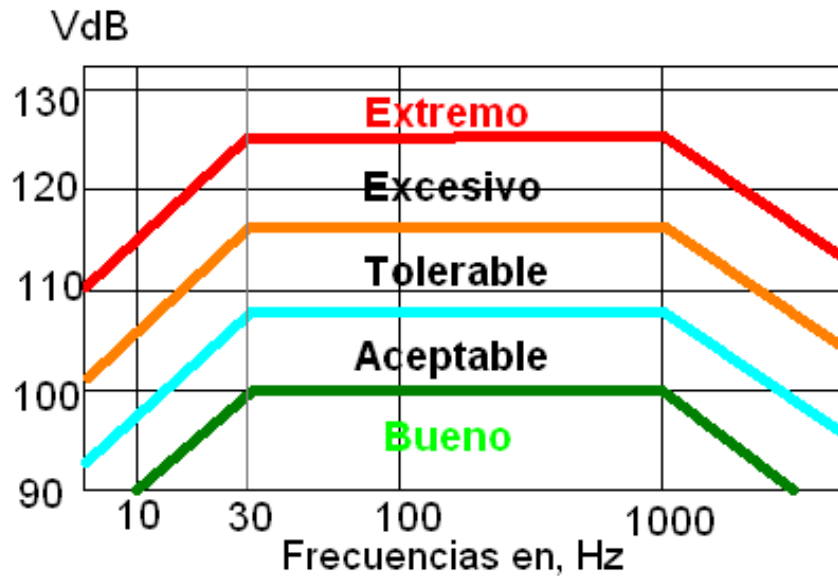
Es posible examinar la misma señal de vibración en términos de Aceleración, Velocidad y Desplazamiento. Se sabe que la velocidad a cualquier frecuencia es proporcional al desplazamiento multiplicado por la frecuencia, lo que quiere decir que también es igual al desplazamiento multiplicado por el cuadrado de la frecuencia. El desplazamiento de vibración pone un fuerte énfasis en las frecuencias más bajas, y que la aceleración pone un fuerte énfasis en las frecuencias más altas. Cuando se estudia el espectro de vibraciones de una máquina, es deseable el parámetro que mantenga un nivel más uniforme en todo el rango de frecuencias. Eso aumentará al máximo el rango dinámico de la señal medida. Para la mayoría de máquinas rotativas, de tamaño medio, se verá que es la velocidad de vibración que produce el espectro más uniforme, y por esa razón, es la que se escoge como parámetro por defecto del monitoreo de máquina.

En el análisis de la mayoría de firmas de vibración de máquinas, el nivel absoluto de los componentes de nivel no es una indicación de problemas en la máquina tan válida, como lo es la proporción de incremento de los componentes. Por ejemplo: una máquina puede tener un tono de rodamiento en un espectro de vibraciones a un nivel 94 VdB (0.28 pulgadas de pico por segundo) y la máquina podría funcionar por años con este tono al mismo nivel. La presencia del tono es una indicación de que existe una anomalía en el rodamiento, pero puede ser que la carga sobre el rodamiento no sea lo suficientemente fuerte para causar una degradación rápida. Por otra parte, otra máquina puede tener un tono de rodamiento a 70 VdB (.0018 PPS), y el tono se podría incrementar hasta 76 VdB en un mes y hasta 82 VdB en otro mes. Eso sí es una causa de preocupación ya que un incremento de 6 dB equivale a una duplicación del nivel de vibración. Esta proporción de incremento indica un nivel de vibración que crece de manera exponencial y quiere decir que la proporción de daño al rodamiento se incrementa debido a la misma presencia de la falla. Eso es un ejemplo de retroalimentación positiva, y en situaciones de este tipo, los problemas pequeños pueden crecer muy rápidamente hasta llegar muy pronto a ser problemas grandes. Noten que en este caso, los niveles absolutos son muy bajos, es la proporción de crecimiento que es mucho más importante que la magnitud de la falla. (Tabla 2.1.)

Generalmente se mide la velocidad de vibración de la máquina en Vdb (decibelios de velocidad), que es una escala logarítmica con una referencia de 0 Vdb = 10<sup>-8</sup> metros por segundo RMS. Para tener perspectiva, una diferencia de 6 VdB es linealmente un factor de 2, y 20 Vdb es linealmente un factor de 10. Un valor de 125 VdB son 17,8 mm/seg RMS, mientras que uno de 105 Vdb son 1,78 mm/seg RMS y tabla 2.1

**Tabla 2.1 Niveles de Vibración**

<b>Nivel de Vibración</b>	<b>&lt; 30 Hz</b>	<b>30 Hz - 1000 Hz</b>	<b>&gt; 1000 Hz</b>
Extremo	10 mils p-p	125 VdB rms	11.2 G rms
Excesivo	4.2 mils p-p	117 VdB rms	4.46 G rms
Tolerable	1.5 mils p-p	108 VdB rms	1.58 G rms
Aceptable	0.6 mils p-p	100 VdB rms	0.630G rms



**Figura 2.1 Niveles de vibración**

Aunque teóricamente es posible realizar manualmente una comparación de espectros de vibración que se tomaron del mismo punto de medición a tiempos diferentes, es casi imposible en la práctica realizar un buen trabajo, debido a la complejidad de los espectros y de la gran cantidad de datos. Por esta razón se ha generalizado el uso de un programa de computadora para realizar el trabajo.

La técnica del mantenimiento predictivo se basa en la detección de fallos en equipos rotativos principalmente, a través del estudio de los niveles de vibración. El objetivo final es obtener la representación del espectro de las vibraciones de un equipo para su posterior análisis. Para aplicarla de forma efectiva y obtener conclusiones representativas y válidas, es necesario conocer determinados datos de la máquina como son el tipo de cojinetes, de correas, número de alabes o de palas, etc., y elegir los puntos adecuados de medida. También es necesario seleccionar el analizador más adecuado a los equipos existentes en la planta. Existen dos técnicas diferentes:

### **2.1.1.- MEDICIÓN DE LA AMPLITUD DE LA VIBRACIÓN**

Da un valor global del desplazamiento o velocidad de la vibración. Cuando la vibración sobrepasa el valor preestablecido el equipo debe ser revisado. Únicamente informa de que

hay un problema en el equipo, sin poderse determinar por esta técnica donde está el problema

### **2.1.2.- ANALIZADOR DEL ESPECTRO DE VIBRACIÓN**

La vibración se descompone según su frecuencia. Analizando el nivel de vibración en cada una de las frecuencias se puede determinar la causa de la anomalía.

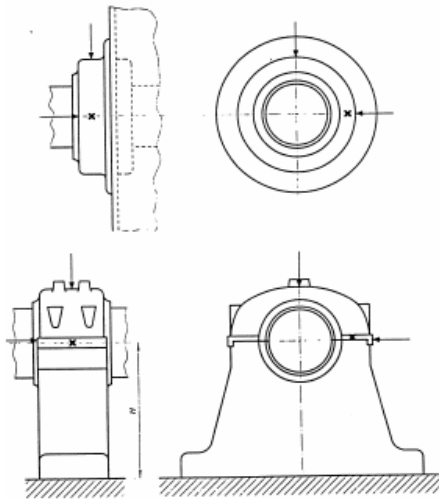
En la generalidad de la máquina se admite la presencia de algunas componentes de frecuencia en los espectros, siempre que no se observen armónicas o variaciones en el tiempo. Así, siempre es admisible la observación de un pico de vibración a la velocidad de rotación de la máquina (1xRPM) debido a desequilibrio, dado que la distribución de pesos a lo largo del eje de rotación nunca es absolutamente perfecta. También estará siempre presente la frecuencia de engranajes (es decir, si una caja reductora tiene 20 piñones, siempre se detectará un pico de vibración a 20xRPM, 20 veces la velocidad de giro), o la frecuencia de paso de álabes (un ventilador con 8 aspas presentará un pico de vibración a 8xRPM). En el caso de generadores, siempre se detectan picos correspondientes a fenómenos electromagnéticos, que dependen de la frecuencia de la red eléctrica y del número de polos del generador; así, es frecuente observar en estos equipos picos a 1500 RPM (o 25 Hertzios), 3000 RPM (50 Hertzios), 6000 RPM, etc.

La presencia de otras componentes de frecuencias como por ejemplo las relacionadas con torbellinos de aceite, frecuencias de paso de bolas de rodamientos, incluso la detección de ruido audible deben constituir motivo de preocupación, y por supuesto deben ser observadas e investigadas de forma sistemática, y una vez analizada la causa que las provoca, debe ser corregida.

#### **2.1.2.1.- Puntos de medición**

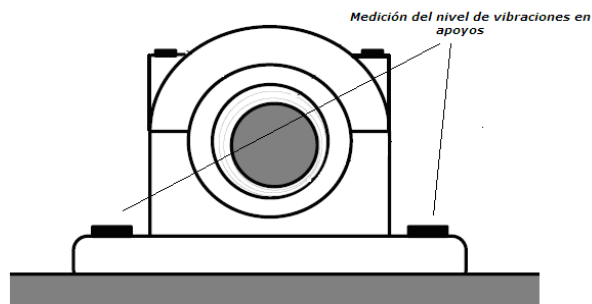
Existen dos puntos en los cuales es importante medir el nivel de vibración:

- En los descansos, es decir, en aquellos puntos en los que la máquina se apoya. En el caso de motores eléctricos, es importante medir en los rodamientos o cojinetes. Figura 2.2



**Figura 2.2 Descanso**

- En los puntos de unión con la bancada o cimentación. Figura 2.3



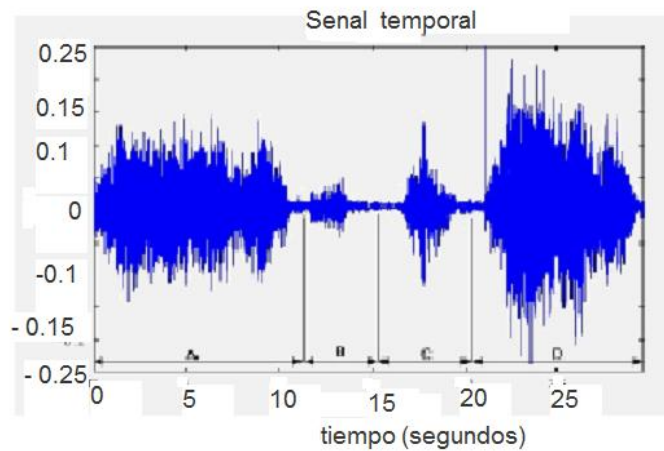
**Figura 2.3 Cimentación**

Es importante realizar la medida en los tres ejes del espacio: en las direcciones radiales (horizontal y vertical) y en la dirección axial.

El interés de las Vibraciones Mecánicas llega al Mantenimiento Industrial de la mano del Mantenimiento Preventivo y Predictivo, con el interés de alerta que significa un elemento



vibrante en una Máquina, y la necesaria prevención de las fallas que traen las vibraciones a medio plazo. Figura 2.4



**Figura 2.4 Fallas de vibraciones**

El interés principal para el mantenimiento deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de las vibraciones detectadas en el elemento o máquina, la determinación de las causas de la vibración, y la corrección del problema que ellas representan. Las consecuencias de las vibraciones mecánicas son el aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales, y las más temidas: daños por fatiga de los materiales, además de ruidos molestos en el ambiente laboral, etc.

## **2.2.- NORMAS DE SEVERIDAD**

Una guía de referencia para distinguir entre lo que puede entenderse como un funcionamiento normal o admisible de la máquina y un nivel de alerta lo constituyen normas como la ISO 2372.

Esta norma proporciona guías para aceptación de la amplitud de vibración para maquinaria rotativa operando desde 600 hasta 12 000 RPM. Especifica niveles de velocidad general de vibración en lugar de niveles espectrales, y puede ser muy engañosa. ISO 2372 especifica los límites de la velocidad de vibración basándose en la potencia de la máquina y cubre un

rango de frecuencias desde 10 Hz (o 600 RPM) hasta 200 Hz (o 12000 RPM). Debido al rango limitado de alta frecuencia, se puede fácilmente dejar pasar problemas de rodamientos con elementos rodantes (rodamientos de bolas, de rodillos, etc). Esta norma está considerada obsoleta y se espera sea reformulada en breve.

### **2.2.1.- ESTRUCTURAS MECÁNICAS**

Todas las máquinas vibran y por tanto transmiten oscilaciones a la estructuras sobre las que descansan (pisos, paredes, tuberías...). Una parte del ruido estructural se convierte, por radiación, en ruido aéreo. De manera que el correcto aislamiento de las vibraciones es una forma de atenuar los niveles de ruido, que es capaz de generar una máquina.

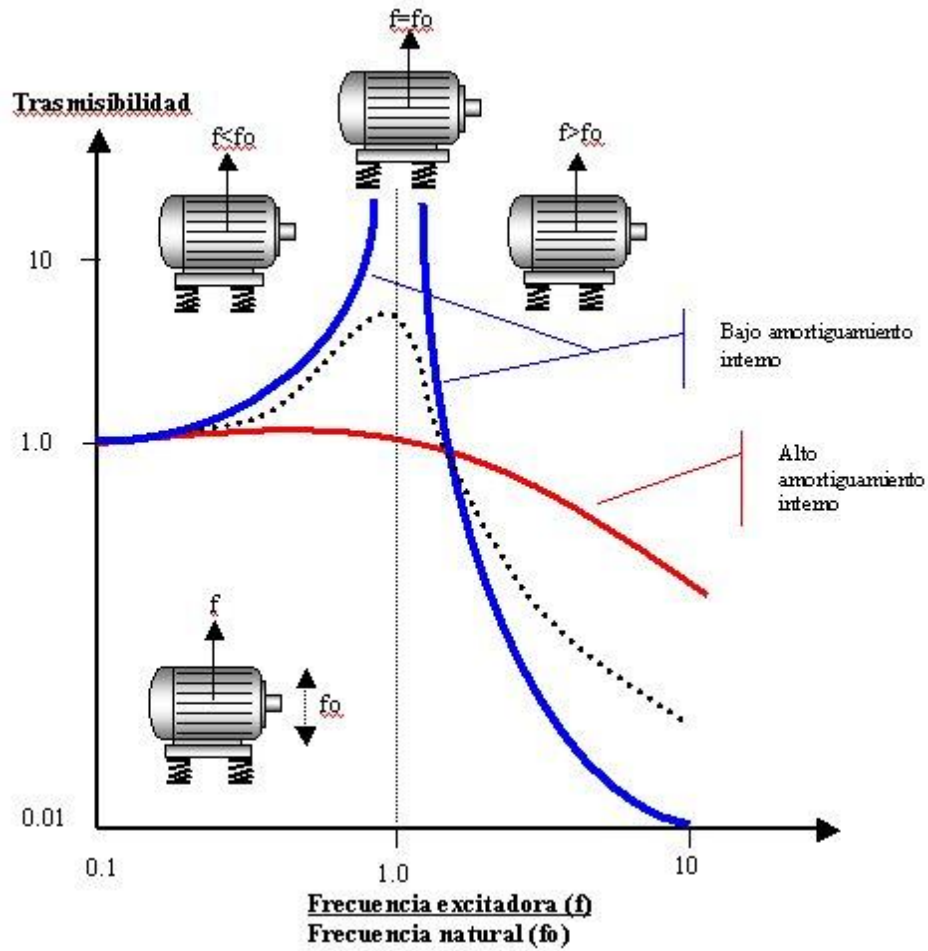
Con el aislamiento se pretende impedir que las vibraciones de una máquina pasen al suelo (y se propaguen), o visto desde otro punto, evitar que las vibraciones de otros equipos no se transmitan a alguna máquina sensible. El aislamiento es más efectivo cuando la estructura sobre la que descansa la máquina (y a la cual se quiere evitar pasen las vibraciones), tiene suficiente masa y rigidez, para evitar, en un caso, las resonancias, y en otro las deformaciones indeseables.

Generalmente, para reducir la transmisión de vibraciones de la máquina a la base (o viceversa). Se pueden aplicar las siguientes acciones (debidamente explicadas en la bibliografía existente al respecto):

- Montaje de la máquina sobre calzos anti vibratorios (ello implica el cálculo y selección de dichos calzos).
- Preparación de una base adecuada en cuanto a masa y rigidez.
- Utilizar juntas flexibles en los sistemas de tuberías, siempre que sea posible.

La figura 2.5 muestra el grado de transmisión de las vibraciones de un equipo con relación a la frecuencia de excitación  $f$  (a aislar) y la frecuencia natural del sistema  $f_0$  (inherente a la máquina), empleando calzos con diferente amortiguación. Obsérvese que el comportamiento aislante es muy favorable cuando la frecuencia a aislar ( $f$ ) es, como

mínimo, 10 veces la frecuencia natural de la máquina, para calzos con bajo amortiguamiento interna.



**Figura 2.5** Grado de transmisión de las vibraciones

En la práctica, muchas veces, es posible emplear un modelo masa (máquina y, eventualmente, una placa base unida a ella rígidamente) y resorte (calzo) de un solo grado de libertad. Se evidencia que, cuando  $f > f_0$  se obtienen los mejores resultados en el aislamiento, utilizando calzos con baja amortiguación interna. De aquí se deduce que los materiales con alta amortiguación interna no mejoran el aislamiento. Sin embargo, pueden resultar muy útiles para reducir la amplitud de las vibraciones en caso de resonancias u otras vibraciones indeseadas.

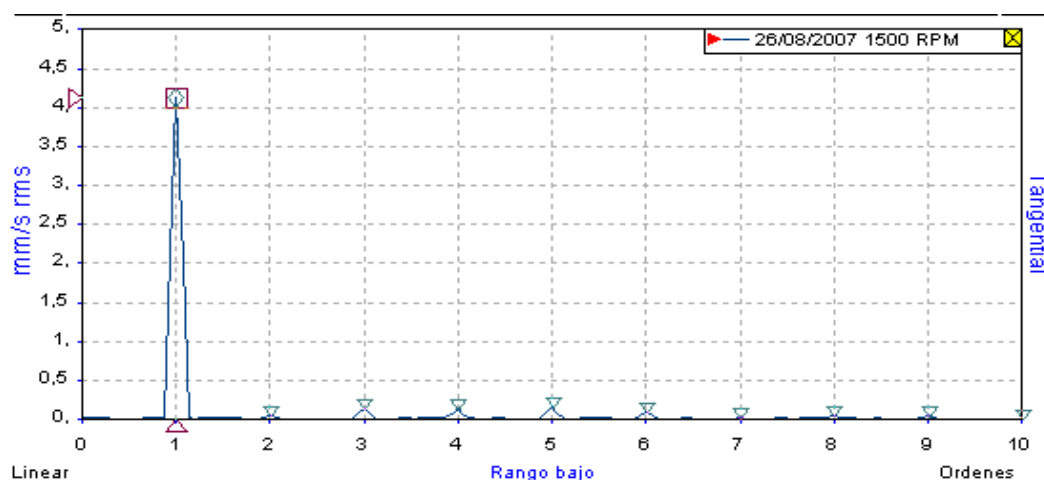
Dependiendo de la ubicación del defecto en el rodamiento, se generan vibraciones de diferente frecuencia. Cuando una superficie defectuosa hace contacto con su superficie de encuentro, se producen pulsos periódicos de corta duración. Las periodicidades con que se producen tales pulsos son función de la geometría del rodamiento, la velocidad de rotación y la localización del defecto, Harris (1966), Berry (1991). Sus frecuencias asociadas son designadas comúnmente como BPFO, BPFI, BSF y FTF1, y pueden ser calculadas analíticamente o utilizando algún software comercial.

## 2.2.2.- FALLOS DETECTABLES POR VIBRACIONES EN MAQUINAS ROTATIVAS

Los fallos que pueden detectarse mediante el análisis de vibraciones son los siguientes:

### 2.2.2.1.- Desequilibrios.

Es el fallo más habitual, y podría decirse que en torno al 40% de los fallos por vibraciones que se detectan en máquinas rotativas se deben a esta causa. Las tablas de severidad que se manejan habitualmente, y que expresan el grado de gravedad de una vibración, se refieren exclusivamente a vibración por desequilibrio. Cuando se presenta una distribución de pesos anormal en torno al eje de rotación se aprecia en la gráfica del análisis espectral una elevación de la velocidad de vibración a la frecuencia equivalente a la velocidad de rotación, como la que se aprecia en la figura 2.6.



**Figura 2.6 Desequilibrio de vibraciones**

Puede verse un único pico de vibración, que corresponde a la velocidad de rotación (la máquina gira a 1500 RPM, la misma frecuencia a la que presenta el pico). El desequilibrio que se aprecia es admisible, teniendo en cuenta la tabla de severidad, pero será necesario observar cómo evoluciona.

El desequilibrio es un problema resoluble, modificando o reparando los elementos que causan la incorrecta distribución de pesos (falta de algún elemento, distribución de pesos de forma homogénea, eliminación de residuos incrustados en los elementos móviles, deformaciones, roturas, etc.), o añadiendo unas pesas de equilibrado en los puntos adecuados que equilibren esta distribución

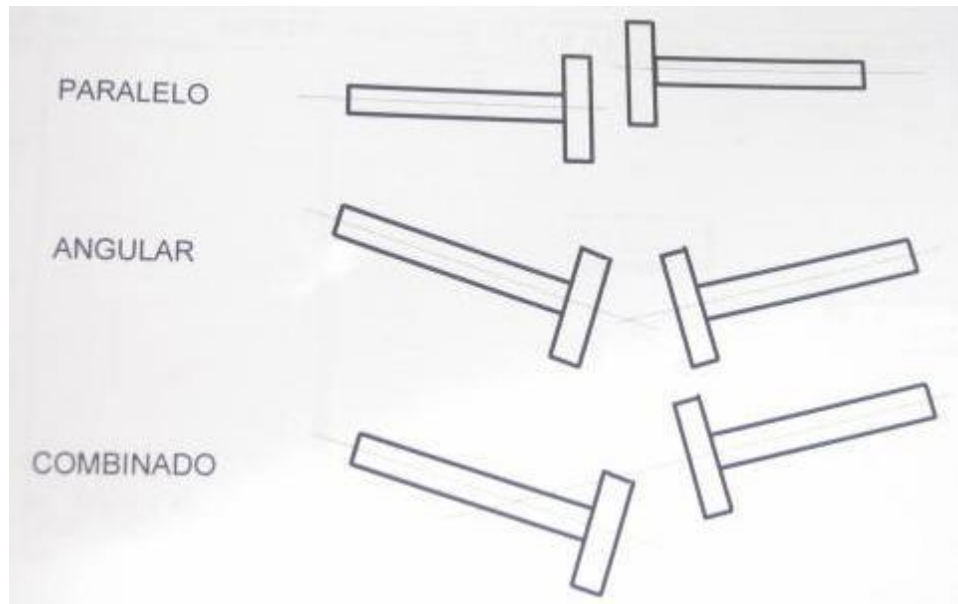
#### **2.2.2.2.- Eje curvado**

Es una forma de desequilibrio, pero que en este caso no tiene solución por equilibrado. En este caso, se detecta la primera armónica (1xRPM) y se ve claramente la segunda.

#### **2.2.2.3.-Desalineamiento**

Es una fuente de vibración fácilmente corregible, y causa más del 30% de los problemas de vibración que se detectan en la industria. Es importante alinear los equipos al instalarlos, comprobar la alineación cada cierto tiempo (anualmente, por ejemplo) y realizarla siempre que se intervenga en el equipo. Hay que tener en cuenta que existen ciertas tolerancias al desalineamiento, y que no es necesario que este sea absolutamente perfecto. Cada máquina y cada fabricante suelen aportar la tolerancia en el alineamiento. También es importante tener en cuenta que el hecho de disponer de acoplamientos flexibles no elimina la necesidad de alinear los equipos: la mayoría de los fabricantes recomienda alinear estos acoplamientos con el mismo cuidado y exactitud que si fueran acoplamientos rígidos.

El desalineamiento puede ser paralelo, angular o combinado, como puede apreciarse en la figura 2.7.



**Figura 2.7. Desalineamientos**

Las siguientes referencias pueden ser útiles a la hora de estudiar el espectro de vibración:

- Si las tres primeras armónicas son significativas en las mediciones efectuadas en la dirección radial horizontal, es muy posible que el desalineamiento sea del tipo paralelo y esté presente en el plano vertical
- Si las tres primeras armónicas son significativas en las mediciones efectuadas en la dirección radial vertical, es muy posible que el desalineamiento sea del tipo paralelo y esté presente en el plano horizontal
- Si las tres primeras armónicas son significativas en las mediciones efectuadas en la dirección axial, entonces es muy posible que el desalineamiento sea del tipo angular
- Si las tres primeras armónicas son significativas en las tres direcciones (radial horizontal, radial vertical y axial) podemos afirmar que el alineamiento que presenta el equipo es un verdadero desastre.

Es importante destacar que el nivel de vibración puede ser considerado bajo según la tabla de severidad anterior, pero si están presentes esas tres armónicas posiblemente haya un problema de desalineamiento que puede traducirse en una rotura, independientemente del nivel.

#### **2.2.2.4.- Problemas electromagnéticos.**

Los motores y alternadores, además de todos los problemas asociados al resto de equipos rotativos, son susceptibles de sufrir toda una serie de problemas de origen electromagnético, como son los siguientes: desplazamiento del centro magnético estator respecto del centro del rotor; barras del rotor agrietadas o rotas; cortocircuito o fallos de aislamiento en el enrollado del estator; o deformaciones térmicas. Suelen apreciarse picos a la frecuencia de red (50 o 60 Hz), a la velocidad de rotación (1xRPM) y armónicos proporcionales al número de polos. También es fácil apreciar en los espectros la presencia de bandas laterales que acompañan a la vibración principal. En general, tienen poca amplitud, por lo que suelen pasar desapercibidos. Es necesaria gran experiencia para identificarlos y no confundirlos con otros problemas, como desalineamiento, desequilibrio, etc.

#### **2.2.2.5.- Problemas de sujeción a bancada**

Otro de los problemas habituales en máquinas rotativas. Puede manifestarse como mala sujeción general a la bancada, o como es más habitual, con uno de sus apoyos mal fijado. En este caso, se denomina 'Pedestal Cojo', y es un problema más frecuente de lo que pudiera parecer. Se identifica en general por presentar altos niveles de vibración en la primera y segunda armónica de la frecuencia de rotación (1XRPM y 2XRPM). Es curioso que, cuando se presenta el problema, aflojando uno de los apoyos la vibración DISMINUYE, en vez de aumentar. Ese suele ser uno de los principales indicativos de la presencia de este problema.

#### **2.2.2.6.- Holguras excesivas**

En ocasiones las tolerancias de holgura en la unión de elementos mecánicos de la máquina ha sido excedida, o sencillamente, se han aflojado debido a la dinámica de operación de la máquina. Presenta las mismas frecuencias de vibración que el desalineamiento o el desequilibrio, pero cuando se intenta alinear o equilibrar la máquina se observa que los niveles de vibración no disminuyen.

### **2.2.2.7.- Mal estado de rodamientos y cojinetes**

Los fallos en rodamientos y cojinetes se detectan en general a frecuencias altas, por lo que son fácilmente identificables observando las vibraciones en el rango alto, es decir, a frecuencias elevadas (20xRPM o más). Para su análisis es conveniente tener en cuenta en número de elementos rodantes, el tipo (bolas, rodillos) etc.

- Torbellinos de aceite. Es un problema curioso y de fácil detección por análisis. Tienen su origen en una mala lubricación, que hace que la capa de lubricante varíe en espesor en el cojinete o rodamiento, dando lugar a una vibración que en general se sitúa por debajo de la frecuencia de giro de la máquina, y que suele aparecer típicamente a 0,5xRPM .
- Resonancia. La resonancia está relacionada con la velocidad crítica y la frecuencia natural de la máquina. A esa frecuencia, que es diferente para cada equipo, las vibraciones se ven amplificadas de 10 a 30 veces. En general, los fabricantes de máquinas rotativas garantizan que la velocidad crítica de sus rotores sea suficientemente diferente de la velocidad de operación de éstos, por lo que es difícil encontrar un problema de velocidad crítica en una máquina correctamente diseñada.

## **2.3.- SISTEMAS LINEALES Y NO LINEALES**

Para ayudar a entender la transmisión de vibración a través de una máquina es conveniente investigar el concepto de linealidad y lo que significa sistemas lineales y no lineales. Dentro de poco, se refiere a escalas de amplitud y de frecuencia lineal y logarítmica, pero el término "lineal" también se refiere a las características de un sistema que puede tener señales de entrada y de salida. Un sistema es cualquier aparato o estructura que puede aceptar una señal de entrada o estímulo en alguna forma y producir una señal de salida o respuesta. Ejemplos de sistemas son grabadoras y amplificadoras, que funcionan con señales eléctricas y estructuras mecánicas en las que las señales de entrada son fuerzas de vibración y las señales de salida son desplazamientos, velocidades y aceleraciones de vibraciones.



Es importante iniciar un programa de monitoreo de vibración de un tamaño manejable, y después que se tenga la experiencia irlo incrementando. Las máquinas más importantes que se deben monitorear son las principales para la productividad de la planta, y las que tienen una historia negativa de mantenimiento. Al principio no se deben incluir máquinas de velocidad variable, máquinas muy complejas y máquinas recíprocas.

Para que el programa de monitoreo tenga éxito, las mediciones se tienen que hacer según un programa. La mayoría del equipo debe de probarse mensualmente, y algunas máquinas menos importantes cada tres meses. Una prueba semanal es normal para máquinas críticas. De todos modos, es importante adaptar su programa de mediciones a las máquinas y a su estado. A medida que se adquiere experiencia, será fácil revisar el programa.

## **2.4.- DESEQUILIBRIO**

La vibración es un fenómeno físico rico en informaciones, cada movimiento y cada rotación genera aceleraciones que permanecen impresas en las estructuras de soporte. Monitorizar las aceleraciones significa obtener informaciones muy fiables acerca de los procesos en los que se generan movimientos.

En la detección de los espectros de vibraciones se dan el diagnóstico preciso de: desequilibrio, desalineación, holguras, roces, excentricidades, ejes doblados, defectos en rodamientos, fallos en engranajes, problemas eléctricos, resonancias, etc. El desequilibrio a su vez se caracteriza por un pico a la frecuencia de giro del rotor

El uso de sensores como acelerómetros permite, en el mismo contexto, medir sucesos como colisiones (aceleración g) y desequilibrio herramienta (velocidad en mm /seg RMS).

Si un rotor solo tiene desequilibrio estático, es decir que el desequilibrio está distribuido en toda su longitud y en un mismo ángulo; el eje de giro y el de inercia se separan, en paralelo, una distancia que depende de la fuerza generada por el desequilibrio.

Para compensar el desequilibrio estático podemos colocar una masa en cada lado y en sentido contrario al desequilibrio o bien una masa en el centro del rotor de un valor igual a la suma del desequilibrio estático

## **2.5.- SENSORES DE VIBRACIÓN**

Estos instrumentos están diseñados para detectar los pequeños incrementos de desplazamiento lineal que tienen lugar cuando las estructuras o los materiales vibran. Estos instrumentos son útiles en una amplia variedad de aplicaciones, como ensamblaje de discos duros, equipos de inspección y procesado de microelectrónica, análisis de componentes y materiales y diseño de máquinas.

El VS-5010 es un sensor de vibración de un solo eje, diseñado para la detección de incrementos de desplazamiento muy pequeños. Tiene una alta sensibilidad, lo que permite al operario trabajar con las superficies más pulidas y brillantes, sin necesidad de añadir ningún tipo de masa al objetivo. El espejo desmontable y ajustable, permite al operario enfocar fácilmente el objetivo.

El VS-5020 es un sensor de vibración de dos ejes, diseñado para la detección de incrementos de desplazamiento muy pequeños. La medición de dos ejes permite la detección de vibraciones de fondo, que pueden ser comparadas y separadas de la vibración del objetivo. Dos cabezales laser, con espejos giratorios, permite un fácil alineado del objetivo. Incluso las superficies más pulidas y brillantes, reflejarán la suficiente cantidad de luz. Como consecuencia, no es necesaria la adición de ningún tipo de masa al objetivo. Este sistema incluye ordenador y software.

### **2.5.1.- ACELERÓMETROS, SENSORES DE VIBRACIÓN**

Un acelerómetro es un dispositivo que permite medir el movimiento y las vibraciones a las que está sometido un robot (o una parte de él), en su modo de medición dinámica, y la

inclinación (con respecto a la gravedad), en su modo estático. De los antiguos acelerómetros mecánicos, de tamaño grande y dificultoso de construir, porque incluían imanes, resortes y bobinas (en algunos modelos), se ha pasado en esta época a dispositivos integrados, con los elementos sensibles creados sobre los propios microcircuitos.

Estos sensores, disponibles en forma de circuito integrado, son los que se utilizan normalmente en robótica experimental. Uno de los acelerómetros integrados más conocidos es el ADXL202, muy pequeño, versátil y de costo accesible. (Figura 2.8)



**Figura 2.8** Acelerómetros ADXL

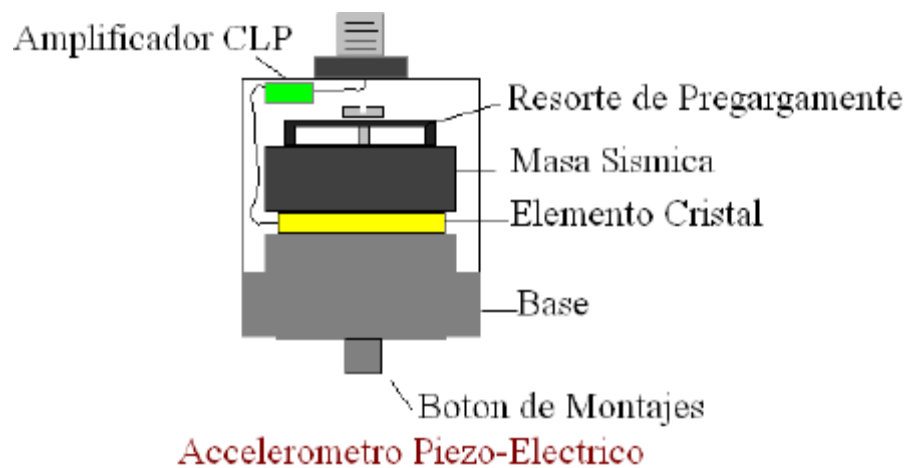
### **2.5.2.- EL ACELERÓMETRO DE DOS EJES ADXL202**

El ADXL202 es un acelerómetro de dos ejes de bajo consumo y salida digital, integrado en un chip monolítico. Mide aceleraciones hasta una escala máxima de  $\pm 2$  g. Soporta golpes de hasta 1000 g. Puede medir aceleración dinámica (como por ejemplo una vibración) y también aceleración estática, como por ejemplo la atracción de la gravedad.

Este circuito integrado tiene salidas digitales, en forma de pulsos repetidos cuyo ancho varía en relación con la medición. Estas salidas en forma de pulsos se pueden medir con microcontroladores sin necesidad de contar con una entrada para la conversión Analógica/Digital. El ritmo de repetición del pulso es ajustable de 0,5 a 10 ms por medio de un resistor. Un ciclo de relación 50% significa una aceleración de 9 g.

El ruido de la señal es muy bajo, lo que permite realizar mediciones menores a 2 mg (mili g) a una frecuencia de 60 hertz. El ancho de banda de respuesta se puede determinar por medio de capacitores de filtro conectables en ambos circuitos, X e Y.

## 2.6.- EL ACELERÓMETRO



**Figura 2.9.** Acelerómetro

El acelerómetro de tipo de compresión como se muestra en la figura 2.9; 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 está sujeto a fuerzas de cizallamiento. También hay otros tipos de diseños para acelerómetros.

Se puede considerar al acelerómetro piezo eléctrico como el transductor Standard para medición de vibración en máquinas. Se produce en varias configuraciones.

La masa sísmica está sujeta a la base con un perno axial, que se apoya en un resorte circular. El elemento piezo eléctrico 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 materias piezo eléctricos 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

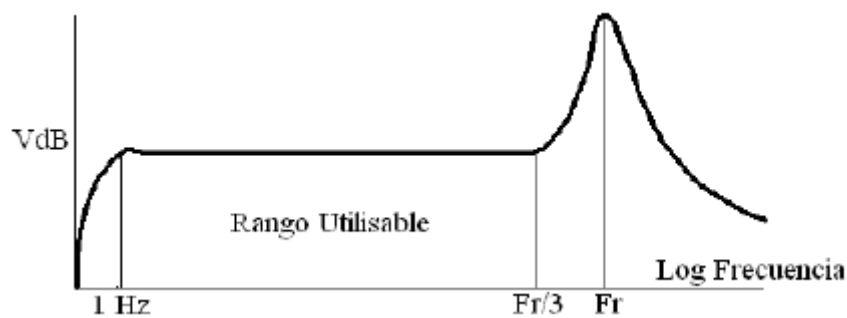
piezo eléctrico, se va llegar al llamado "punto curie" o " temperatura curie" y se pierde la propiedad piezo eléctrica. Una vez que esto pasa, el transductor está defectuoso y no se puede reparar.

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. 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 electrónico, y el límite de los niveles más altos es la destrucción del mismo elemento piezo eléctrico. 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 piezo eléctrico 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 más 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. El rango de frecuencias del acelerómetro es muy ancho y se extiende desde frecuencias muy bajas en algunas unidades hasta varias decenas de kilo hertzios. La respuesta de alta frecuencia está limitada por la resonancia de la masa sísmica, junto con la elasticidad del piezo elemento. Esa resonancia produce un pico importante en la respuesta de la frecuencia natural del transductor, y eso se sitúa normalmente alrededor de 30 kHz para los acelerómetros que se usan normalmente. Una regla general es que un acelerómetro se puede usar alrededor de 1/3 de su frecuencia natural. Datos arriba de esta frecuencia se acentuarán debido de la respuesta resonante, pero se pueden usar si se toma en cuenta este efecto. La mayoría de los acelerómetros que hoy en día se usan en la industria son del tipo

"PCI", lo que quiere decir que tienen un preamplificador interno de circuito integrado. Este preamplificador recibe su energía de la polarización de la corriente directa por el alambre de la misma señal, así que no se necesita alambrado suplementario. El aparato con que está conectado el aparato debe tener su fuerza de corriente directa disponible para este tipo de transductor. El acelerómetro PCI tendrá un límite de baja frecuencia, debido al mismo amplificador y este se sitúa generalmente a 1 Hz para la mayoría de las unidades disponibles comercialmente. Algunas unidades fueron diseñadas especialmente para ir hasta 0, 1 Hz si se necesita datos de muy baja frecuencia.

Cuando se conecta un acelerómetro PCI a la fuente de energía, el amplificador necesita unos segundos para estabilizarse. Durante este tiempo cualquier dato que la unidad recogerá será contaminado por las lentas variaciones del voltaje. Por esa razón, los recopiladores de datos deben de tener un retraso integrado, para asegurar que la unidad está en condición estable. Si el retraso es demasiado breve, la forma de onda de tiempo tendrá una rampa de voltaje en forma exponencial superpuesta sobre los datos y en el espectro se verá una característica creciente de muy baja frecuencia a veces llamada bajada de eski. Este se debe evitar, ya que compromete el rango dinámico de la medición. (Figura 2.10 )



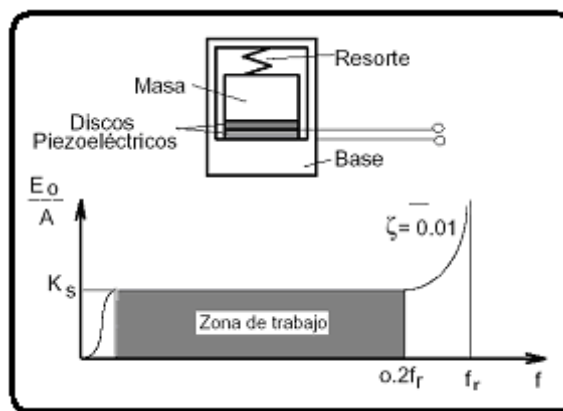
**Figura 2.10 Respuesta de frecuencia del acelerómetro**

La frecuencia de resonancia de un acelerómetro depende mucho de su montaje. El mejor tipo de montaje siempre es el montaje con botón, todo lo demás limitará el rango de frecuencia efectivo de la unidad.

Cuando se coloca un acelerómetro es importante que la ruta de vibración desde la fuente hacia el acelerómetro sea la más corta posible, especialmente si se está midiendo la

vibración en rodamientos con elementos rodantes. Cuando se usa un acelerómetro PCI se debe tener cuidado de no exponerlo a niveles de aceleración donde el voltaje de salida rebasa varios voltios. Si no, se sobrecargará el preamplificador interno y el resultado será una distorsión

Estos instrumentos son útiles para mediciones tanto de baja como de alta frecuencia, pudiendo encontrarse comercialmente una amplia variedad que cubre prácticamente cualquier tipo de aplicación, tanto para propósitos generales como para propósitos específicos.



**Figura 2.11.** Acelerómetro piezoeléctrico

Los acelerómetros son los instrumentos más utilizados en los sistemas de supervisión y medición de vibraciones, los acelerómetros piezoeléctricos son extremadamente versátiles y ampliamente usados para la supervisión de maquinarias industriales. Los acelerómetros industriales típicos miden niveles de vibración en *micro-g's* desde 60 c.p.m. hasta unos 900,000 c.p.m. (1 a 15,000 Hz). (Figura 2.11.)

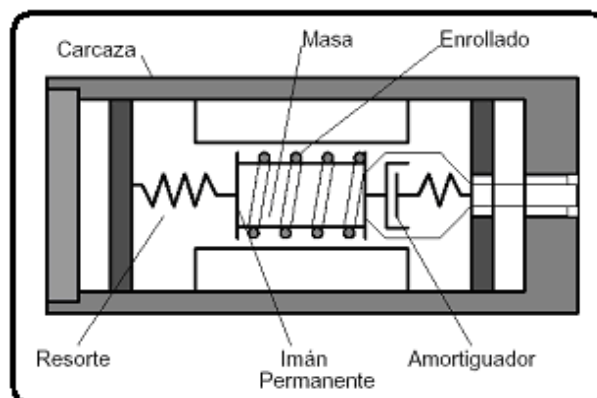
### 2.6.1.- SENSORES DE VELOCIDAD

Los sensores de velocidad (Figura 2.12) son usados para mediciones de baja a media frecuencia. Estos equipos son útiles para monitorear la vibración y el balanceo de las máquinas rotativas.



**Figura 2.12.** Sensor de velocidad DATA SENSOR

Los detectores de velocidad, en comparación con los detectores de aceleración, tienen sensibilidades más bajas para vibraciones de alta frecuencia. Por tanto, estos transductores son menos susceptibles de amplificar sobrecargas, las cuales pueden comprometer la fidelidad a bajas amplitudes y frecuencias de las señales.



**Figura 2.13.** Transductor de velocidad

Tradicionalmente, los detectores de velocidad usan sistemas electromagnéticos (bobina e imán) para generar la señal de velocidad; sin embargo, ahora los detectores piezoeléctricos de velocidad (acelerómetros que integran internamente la señal) son más resistentes y han ganado popularidad debido a sus capacidades mejoradas. (Figura 2.13)



## **CAPÍTULO III**

### **ESTUDIO Y MONTAJE**

#### **3.1.- LEVANTAMIENTO DE LOS REQUISITOS DEL SISTEMA.**

##### **3.1.1.- REQUISITOS ESENCIALES PARA LA ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL:**

- Captor Óptico que toma la señal del rotor de cola.
- Acelerómetro que recoge la señal del rotor principal.
- Captor Magnético que recoge la señal del rotor principal.
- Cableados eléctricos referencia 3284 para el acelerómetro y referencia 3319 para el captor magnético.
- Cableado eléctrico de alimentación de toma de servicio 28 V. CC.
- Cable de comunicaciones con terminal RS-232.
- Lámpara Estroboscópica.

##### **3.1.2.- REQUISITOS COMPUTACIONALES:**

###### **a.- En Software:**

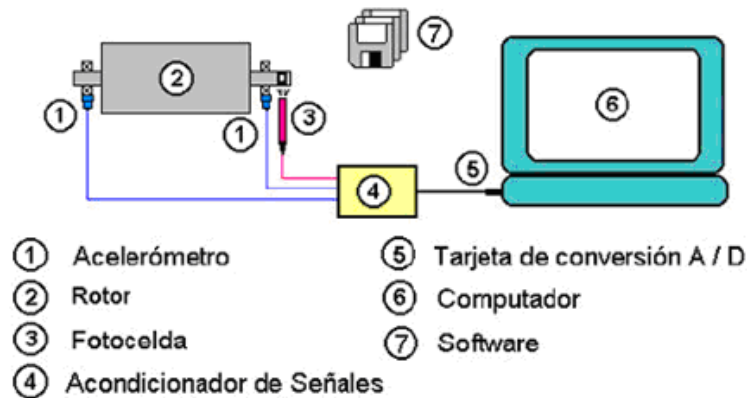
- Plataforma virtual HW-SW
- Software de instrumentación virtual LABVIEW de NATIONAL INSTRUMENTS.

###### **b.- En Hardware:**

- Interfaces de comunicación.
- Computadora personal (preferiblemente Pc portátil).
- Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ)

### 3.1.3.- CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO:

El equipo está configurado por los siguientes elementos: Figura 3.1.



**Figura 3.1.** Diagrama de la implementación física de la adquisición de datos.

Nota.- Requisitos básicos para la adquisición de las señales para su análisis y corrección del análisis vibratorio son:

- Sensor: señal que vamos a tomar en el rotor de las hélices para su mediante análisis y estudiar su comportamiento con reajuste.
- Acondicionamiento: adecuación de la señal para su manejo con tarjeta de adquisición para aislar corrientes que causen daño a nuestro equipo implementado y amplificar la señal.
- Adquisición: recepción de señales en un entorno mas adecuado y rango de voltaje (0 – 5 voltios) para el análisis en labview y dar correctivos dentro de su verificación al desbalance en la rotación de las hélices del helicóptero.
- Análisis: al tomar la señal de la vibración producida en el rotor para el análisis en Labview debiendo tomar en cuenta el error estándar en las hélices del helicóptero ajustamos con el desbalanceo reduciendo el mínimo error colocando pesas en las hélices para un mejor desempeño de vuelo y no dificultar las acciones de vuelo en el helicóptero.

### **3.2.- PREPARACIÓN DEL TRABAJO (MONTAJE DE LOS ACCESORIOS).**

La instalación de instrumentos de medición de vibración en conjuntos de generación mecánica rotativa es crítica, por el mayor desgaste de los elementos que experimenta se ha convertido en una práctica común. El objetivo principal es el de detectar un incremento en el nivel de vibración antes de la ocurrencia de un problema mecánico. Para lograr esto, es necesario el seleccionar un tipo de transductor que mida la vibración (directamente al rotor) que revele con mayor grado el tipo de problema esperado.

Puesto que cada tipo de sensor tiene sus propios parámetros de medida, limitaciones y desventajas, por lo que ningún tipo de sensor puede cumplir con los requerimientos propios del problema de vibraciones más general. En consecuencia, muchas instalaciones críticas requerirán de más de un tipo de sensor para su completa adquisición de datos necesarios.

El montaje de los accesorios, es decir; del interruptor, el detector magnético, el acelerómetro y sus soportes mecánicos de ajuste a la estructura del aeronave respectivamente; en el rotor principal se realiza siguiendo estrictamente el manual de mantenimiento (MDM) Tomo 4 Capítulo 57, Sección 10 , Subsección 502 que se refiere a la verificación y corrección de las vibraciones verticales “Z” y horizontales “Y” debidas al desequilibrio y al tracking ( balanceo y alineación ) de las palas principales el cual nos indica la secuencia para la instalación del equipo. Todo este proceso se lo realiza cuando la aeronave no se encuentra en funcionamiento y tomando las respectivas medidas de seguridad dispuestas en dicho manual.

#### **3.2.1.- MONTAJE DEL INTERRUPTOR (PLACA METÁLICA).**

Para realizar la ubicación y fijación de la parte de placa metálica (Figura 3.1 a), la misma que va a cortar la señal del captor magnético para generar la respectiva señal, se desarrollan los siguientes procedimientos:

- Quitar la tuerca que fija la bieleta de paso azul al plato cíclico giratorio.
- Colocar el interruptor (placa metálica) en la rótula baja de la biela de paso azul contra la horquilla del muñón, hacia el exterior.
- Volver a colocar la tuerca, apretar y colocar el pasador (Figura 3.1 b).



**Figura 3.1 a** Soporte y captor magnético .



**Figura 3.1b.** Colocación del interruptor  
(Placa del captor magnético) y captor magnético.

### **3.2.2.- MONTAJE DEL SOPORTE DEL CAPTOR MAGNÉTICO**

El captor magnético es colocado en un soporte a una estructura fija. Debe ser instalado con los soportes provistos por el equipo, asegurándose que el mismo este bien frenado y

ajustado en su localización prestando particular atención al cable que lo conecta con la caja colectora de señales el cual no tiene que tener ningún tipo de interferencia con los componentes dinámicos ni con los controles de vuelo. (Figura 3.2) .

- Colocar el soporte en la horquilla derecha del plato no giratorio, fijarlo mediante la brida, teniendo cuidado de no dañar el plato. (Figura 3.1.a).
- Colocar el detector magnético. Ajustar el entre hierro (Figura. 3.2.) entre el detector y el interruptor (placa que corta la señal del captor magnético) a  $1,25 \text{ mm} \pm 0,25$  ( $0.49" \pm 0.10$ ).



**Figura 3.2.** Montaje del captor magnético en soporte.

### **3.2.3.- MONTAJE DEL ACELERÓMETRO Y SOPORTE.**

Un acelerómetro consiste de un pedazo de cristal piezoeléctrico, con una resonancia específica y el cual está dentro de la armadura del sensor. Sobre el cristal se encuentra una masa o inercia. La armadura del sensor esta rígidamente conectada al medio externo vibrante. Cuando el medio externo y la armadura vibran, la fuerza de gravedad actuando en la masa intenta deformar el cristal, y éste debido a sus propiedades piezoeléctricas, genera una carga eléctrica como respuesta a la fuerza mecánica aplicada al cristal al leer esta carga se determina la aceleración. Los acelerómetros son direccionales, esto quiere decir solo miden aceleración en un eje. Para monitorear aceleración en tres dimensiones, es necesario utilizar un acelerómetro multieje (Figura 3.3.a).

Para el montaje del acelerómetro se debe seguir los siguientes pasos, para una buena fijación y sobre todo siguiendo las observaciones del manual de usuario de la aeronave (equipo Lama):

- Se coloca el acelerómetro debido a que el conjunto motriz de la VTP ( caja de transmisión principal ) y del rotor principal son un conjunto mecánicos donde se producen realmente un nivel vibratorio importante para el análisis que realizan el punto de vibración . En la horquilla de la parte superior del soporte en V de CTP (Cabeza de plato de transmisión), lado derecho, colocar el soporte. (Figura 3.3 a).



**Figura 3.3.a** Soporte y acelerómetro.

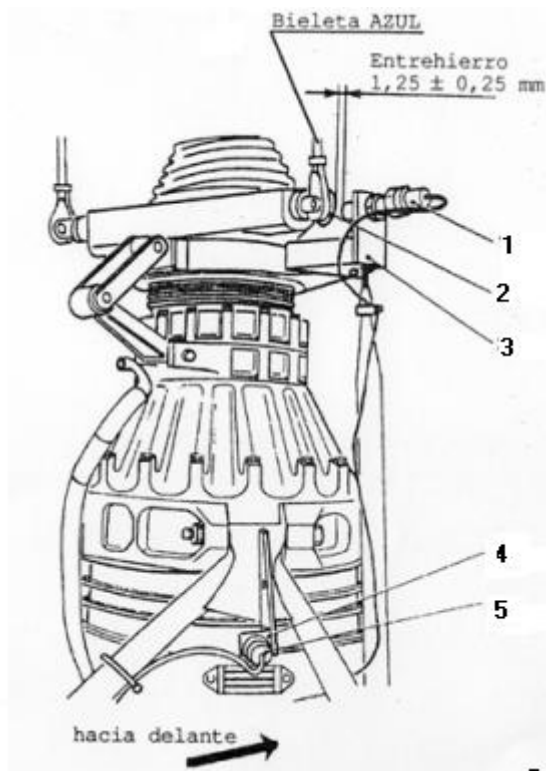
- Montar el acelerómetro en su soporte, con la toma orientada hacia al exterior. (Figura 3.3.b)



**Figura 3.3.b** Acelerómetro en soporte.



**Figura 3.4.** Montaje del acelerómetro y detector magnético.



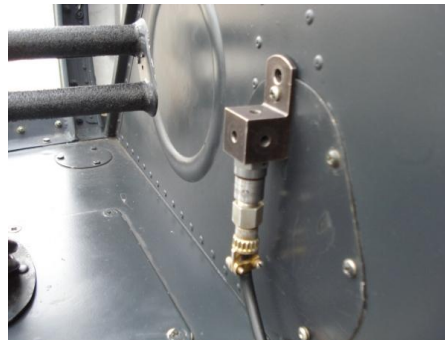
1. Captor Magnético
2. Interruptor del captor
3. Soporte del captor magnético
4. Acelerómetro
5. Soporte del acelerómetro

**Figura 3.5** Montaje de los sensores en el rotor principal.

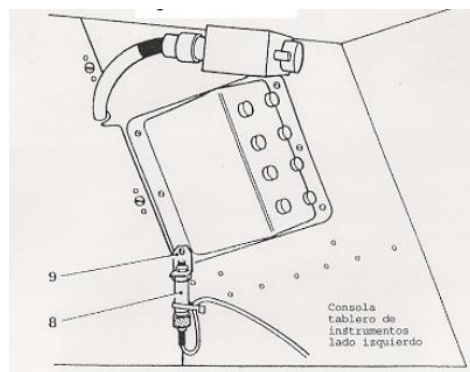
### 3.2.4.- MONTAJE DEL ACELERÓMETRO Y SU SOPORTE EN LA CONSOLA INFERIOR IZQUIERDA DENTRO DE LA CABINA.

Se debe colocar un soporte de acelerómetro (Figura 3.6) en la punta delantera en uno de los tornillos del lado izquierdo de la consola inferior dentro de la cabina para que recepte las vibraciones laterales del helicóptero para el análisis correspondiente.

- Montar el acelerómetro (Figura 3.7) en la posición vertical sobre su soporte, con la toma hacia abajo.



**Figura 3.6.** Montaje del acelerómetro en la cabina



**Figura 3.7.** Acelerómetro con soporte dentro de cabina



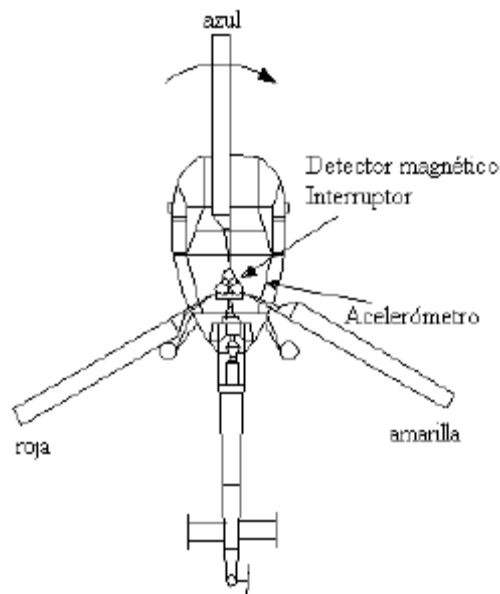
### 3.2.5.- MONTAJE DE LOS BLANCOS (REFERENCIAS A LAS PALAS).

Es necesario montar los blancos en las tres palas principales montadas respectivamente en la puntera de pala en el tercer tornillo a partir del borde de ataque. (Figura 3.8).

Pala Azul	Pala Roja	Pala Amarilla
		
Estela 1	Estela 2	Estela 3

**Figura 3.8.** Referencias que se da a las palas del helicóptero LAMA

Cada pala del helicóptero LAMA tiene su propia referencia, sin que tenga a su momento de identificarla error con otra pala, es por eso que se identifica cada una con su referencia. (Figura 3.9.)



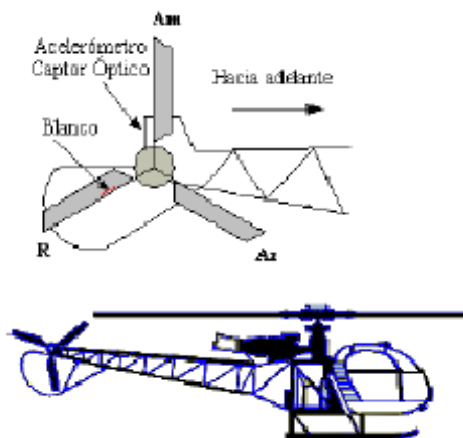
**Figura 3.9.** Montaje de los blancos en la puntera de la pala.

### 3.3.- SENSOR DE VIBRACIONES EN ROTOR DE COLA.

El sensor trabaja con una cinta reflectiva la misma que se adhiere al rotor o al eje, la cual es detectada a cada paso, lo que permite tener una referencia de velocidad y fase. Un sensor óptico se basa en el aprovechamiento de la interacción entre la luz y la materia para determinar las propiedades de ésta. Una mejora de los dispositivos sensores, comprende la utilización de la fibra óptica como elemento de transmisión de la luz.

Cabe señalar que la utilización de este sensor se da principalmente por su característica de realizar mediciones de altas velocidades, por lo que es utilizado en el rotor de cola del helicóptero LAMA, también se lo utiliza como referencia de fase para determinar la misma en relación a la señal emitida por el acelerómetro ; no necesita ningún tipo de acondicionamiento puesto que la forma de onda del sensor varia en el rango de 0v a 3v esto es cada vez que detecta el paso de un reflectivo que genera dentro del rango de un pulso del valor anteriormente mencionado.

El lector óptico es instalado, ajustado y asegurado con alambre de frenar en un soporte especialmente diseñado que acompaña al equipamiento y se coloca en las zonas no rotativas. Dado que está conectado con la caja colectora de señales a través de un cable es muy importante que el mismo no tenga ningún tipo de interferencia con los componentes dinámicos ni con los componentes de vuelo. (Figura 3.10)



**Figura 3.10.** Sensor óptico en rotor de cola

### **3.3.1.- MONTAJE DEL MATERIAL DE MEDIDA:**

- El montaje de los sensores y materiales para el análisis de vibraciones debe ser en condiciones especiales y en el área de estacionamiento de vuelo o área plana y despejada.
- Instalar el acelerómetro montado verticalmente con el conector hacia arriba y con la célula fotoeléctrica (rotor trasero del helicóptero LAMA), para que visualice y adquiera la señal en destellos que se genera con el paso de las estelas del rotor ante la luz infrarroja emitida por el sensor.
- Conectar los cableados por un lado a los captosres y por otro lado a los sensores de medida utilizados, guiar los cables hasta la parte delantera del estabilizador horizontal a lo largo del botalón de cola hasta la cabina y fijarlos en la estructura con cinta adhesiva o abrazaderas de plástico.
- Conectar el equipo del instrumento virtual, para el caso de la conexión de los sensores y asegurar de la misma forma que indica los procedimientos requeridos.
- Supervisar la seguridad de la instalación.

### **3.3.2.- MODO DE EJECUCIÓN:**

Efectuar la medición con el helicóptero funcionando en tierra, con el rotor principal en paso mínimo, pedales y paso cíclico en posición neutra. Al igual que para el uso del material de medida que debe cumplir con las especificaciones del mismo.

Para evitar niveles altos de vibración, no debe presentarse resonancia en la estructura del helicóptero o en ningún otro componente que se use para asegurar el motor a la estructura de éste. Revisar todos los componentes de sujeción del motor como la bancada, los cauchos de sujeción, el sistema de escape y el balance de la hélice.

Realizar un balance dinámico de la hélice y asegurar que esté en tolerancia, si la vibración persiste realizar un análisis de vibración para identificar los elementos que están transmitiendo la vibración, corregirlos y asegurar que los niveles estén en tolerancia.

### **3.3.3.- CONDICIONES DE RETOQUES DEL DESEQUILIBRIO**

Los reportes de operadores y experiencias en la corrección de vibraciones en el rotor de cola, indican que varias aeronaves experimentan niveles de vibración más altos que los normales a velocidades del motor entre 3600 y 4800 RPM.

Algunas posibles causas pueden ser:

- Modificaciones realizadas en el motor.
- Daño o deterioro en la bancada del motor.
- Daño o deterioro en los lord mount.
- Balance de la hélice fuera de tolerancia.
- Momento de inercia de la hélice fuera de tolerancia.
- Sistema de escape dañado.
- Falta de sincronización de carburadores.
- Contacto de la hélice con el piso.
- Fricción de la caja reductora fuera de tolerancia

#### **3.3.3.1.- TOLERANCIAS:**

Alcanzar un nivel inferior o igual a 0,2 IPS. Si un retoque de los contrapesos es necesario:

- Invertir la posición de los 6 contrapesos y hacer una nueva medición.
- Si el nivel es correcto dejar tal cual.
- Si el nivel necesita un retoque:

- Disminuir según necesidad y en mismo valor los dos contrapesos de una misma manga.
- Hacer dicha operación en dos mangas como máximo.
- Peso de contrapeso nuevo:  $55 \pm 5$  gr.

Nota : Peso mínimo de contrapeso rectificado: 40 gr. Con una altura mínimo de 14 mm. , (en un contrapeso: 1 mm. = 2 gr.).

### 3.4.- CONOCIMIENTO BÁSICO DE LAS HERRAMIENTAS.

Para el montaje del equipo analizador de vibraciones se utilizan dos tipos de herramientas como son las comunes y las especiales,

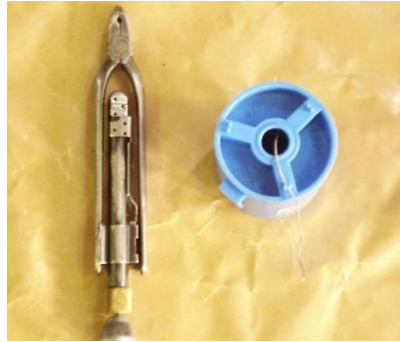
- Herramientas comunes son aquellas que se utilizan en cualquier tipo de trabajo de mecánica general como por ejemplo: ( Figura 3.11)
- Pinzas
- Llaves de boca o mixtas No. 8, 9,10.



**Figura 3.11.** Herramientas

- Herramientas especiales son aquellas que se utilizan específicamente en trabajos de mecánica de aviación: (Figura 3.12.)
- Entorchador.

- Alambre de Freno.
- Herramienta de corrección de Tabs.



**Figura 3.12.** Entorchador y alambre

### **3.5.- MONTAJE DEL SOPORTE DEL CAPTOR MAGNÉTICO; CONEXIÓN A FUENTES DE ALIMENTACIÓN**

Para las pruebas en helicóptero se puede tomar del terminal que se encuentra en la cabina misma de la aeronave de generación 28 V CC. Figura 3.14 (a). Ya que todo el proceso de corrección de vibraciones en las señales recogidas, analizadas e indicadas por el equipo Vibrex. Figura 3.14 (b)



**(a)** 28Vcc



**( b )** Conexión a 28Vcc

**Figura 3.14** Fuentes de alimentación en la cabina

Estas son las conexiones de seguridad que nos permitirán tener una absoluta medición en la toma de los datos correctivos del proceso y el posterior análisis.

## CAPÍTULO IV

# SISTEMAS DE ADQUISICIÓN, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

### 4.1.- PRINCIPIOS BÁSICOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La vibración como una oscilación, y las oscilaciones más sencillas se presentan en forma de onda senoidal expresados en términos del tiempo como  $F(t) = A\sin(\omega t + \varphi)$ , con frecuencia angular  $\omega$  y fase  $\varphi$  constantes. La frecuencia angular  $\omega$  se presenta en radianes por segundo (rad/s) y se relaciona a la frecuencia  $f$  (Hz o s<sup>-1</sup>) por medio de la siguiente fórmula:  $\omega = 2\pi f$ . La frecuencia angular siempre se habla en correlación a la fase  $\varphi$ , la cual describe el punto de inicio de la onda a partir de un punto de referencia en el tiempo inicial  $t_0$ , y usualmente se da en grados o radianes.

En aplicaciones las señales del voltaje medido son formas de onda complejas que contienen múltiples componentes de frecuencia. El análisis de sonido y vibración usualmente involucra la identificación y examen de estos componentes de frecuencia. Para hacerlo, debe convertir matemáticamente las señales del dominio de tiempo al dominio de frecuencia por medio de las transformadas de Laplace, Z-, o Fourier. El análisis de Fourier es el más común para esta aplicación ya que se obtiene la magnitud en decibeles (dB) y se puede asociar a la fase  $\omega$  (grados o radianes) para cada componente de frecuencia en una señal.

### 4.2.- HARDWARE Y SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El circuito de acondicionamiento de señales para medir el sonido y la vibración es muy directo. Un sistema típico para medir los niveles de aceleración incluye los siguientes componentes:

- Sensor
- Fuente corriente para excitar el sensor
- Hacer tierra apropiadamente para eliminar ruidos
- Conexiones de CA para remover disparos de CD en el sistema
- Un amplificador de instrumentación para mejorar los niveles de las señales del sensor.
- Un filtro de bajo flujo para reducir ruido y prevenir distorsiones en el sistema de adquisición de datos
- Muestreo simultáneo y retención de circuitos para mantener cronometradas a las múltiples señales

Como se menciona en la sección superior, las mediciones de sonido y vibración son altamente susceptibles al ruido. Puede reducir este efecto, sin embargo, al hacer que el sistema haga tierra de forma apropiada. Puede evitar hacer tierra inapropiada gracias a las iteraciones a tierra o nodos flotantes asegurando ya sea que la entrada del acondicionamiento de señales o que el sensor haga tierra, más no ambos. Si el sensor hizo tierra, debe hacer una conexión diferente. Si el sensor se encuentra flotando, debe conectar el sistema de acondicionamiento de señales invirtiendo la entrada a tierra.

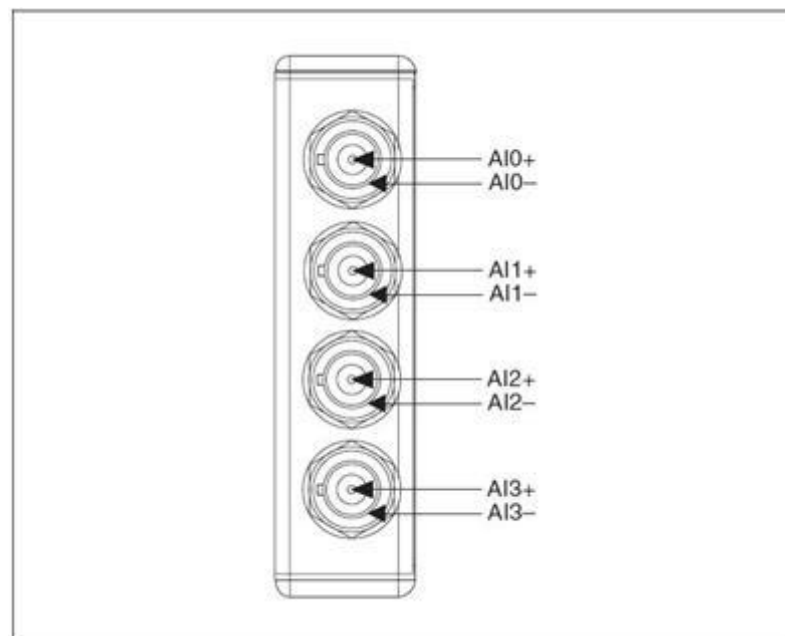
La señal adquirida a partir del sensor consiste tanto en componentes de CD y de CA, donde la porción de CD dispara la porción de CA a partir de cero. La conexión de CA remueve el disparo de CD en el sistema por medio de un capacitor en serie con la señal. Un sistema de sensor conectado en CA elimina el cambio de CD a largo plazo que tienen los sensores debido al efecto de la temperatura y del tiempo, incrementando dramáticamente la resolución y el uso del rango dinámico del sistema.

Para realizar mediciones con exactitud, la tasa de muestreo del sistema debe ser de al menos del doble de la frecuencia de las señales adquiridas. Para estar seguro que se está muestreando el rango correcto de frecuencias, agregar un filtro de bajo flujo antes del muestreo y del convertidor análogo a digital. Esto asegura la atenuación del ruido de alta frecuencia y que estos componentes de distorsión por arriba de la tasa de muestreo no distorsionen la medición.



Como ejemplo, considere el módulo NI 9234 de la Serie C de NI diseñado para mediciones de acelerómetros y micrófonos. El 9234 de NI puede muestrear simultáneamente cuatro entradas analógicas a 51.2 kS/s mientras permite la selección del software para el condicionamiento de señales IEPE, uniones de CA/CD y filtración de distorsiones. La tarjeta NI 9234 puede ser utilizada en el chasis NI cDAQ-9172.

El módulo tiene cuatro conectores BNC donde cada uno de ellos puede conectarse a un sensor IEPE. El pin central del conector, AI+, proporciona la excitación de CD y una conexión de señal de CA. La coraza del conector, AI-, proporciona el patrón de excitación de retorno y la referencia a tierra de la señal de CA. (Figura 4.1.)



**Figura 4.1.** Tareas del Conector BNC 9234 de NI

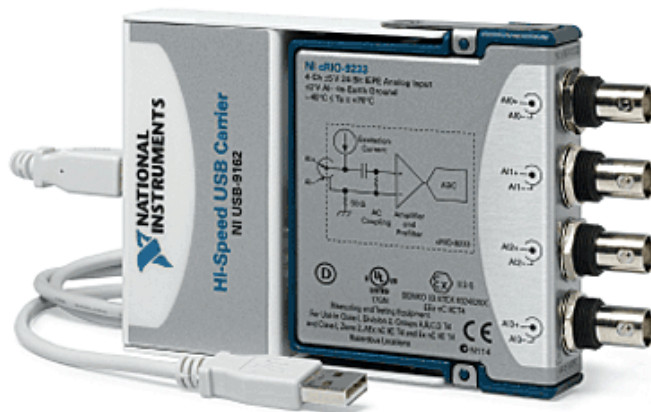
Un sensor IEPE requiere de un cable y/o conector apropiado para engancharse a las entradas BNC del módulo de la Serie C. Los acelerómetros de tres ejes tienen tres salidas, un eje a un canal de adquisición, cada uno requiriendo su propio acondicionamiento de señales.

Puede conectar ambos sensores de referencia a tierra o IEPE flotante al 9234 de NI, más debe utilizar la conexión flotante para prevenir ruidos a partir de tierra. Los sensores IEPE típicos cuentan con una caja eléctricamente aislada de los electrónicos IEPE, por lo que

conectar el sensor al 9234 de NI resulta en una conexión flotante aunque la caja del sensor se encuentre aislada.

#### 4.2.1.- SELECCIÓN DEL HARDWARE (TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS)

Para el sistema de adquisición de datos se seleccionó la tarjeta *NI DAQ USB-9234*; porque tiene la capacidad de adquirir y analizar directamente los datos de sensores de vibración tipo IEPE sin ningún tipo de acondicionamiento de señales, tiene alta resolución de 24 bits, filtros antialiasing, velocidad de muestreo de 51.2KS/s, además; el muestreo es simultáneo para todos los canales, tiene excitación directa, las entradas son para conectores BNC para la reducción de ruido, posee alto rango dinámico más que alta velocidad. ( Figura 4.2. )



**Figura 4.2.** Tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB-9234

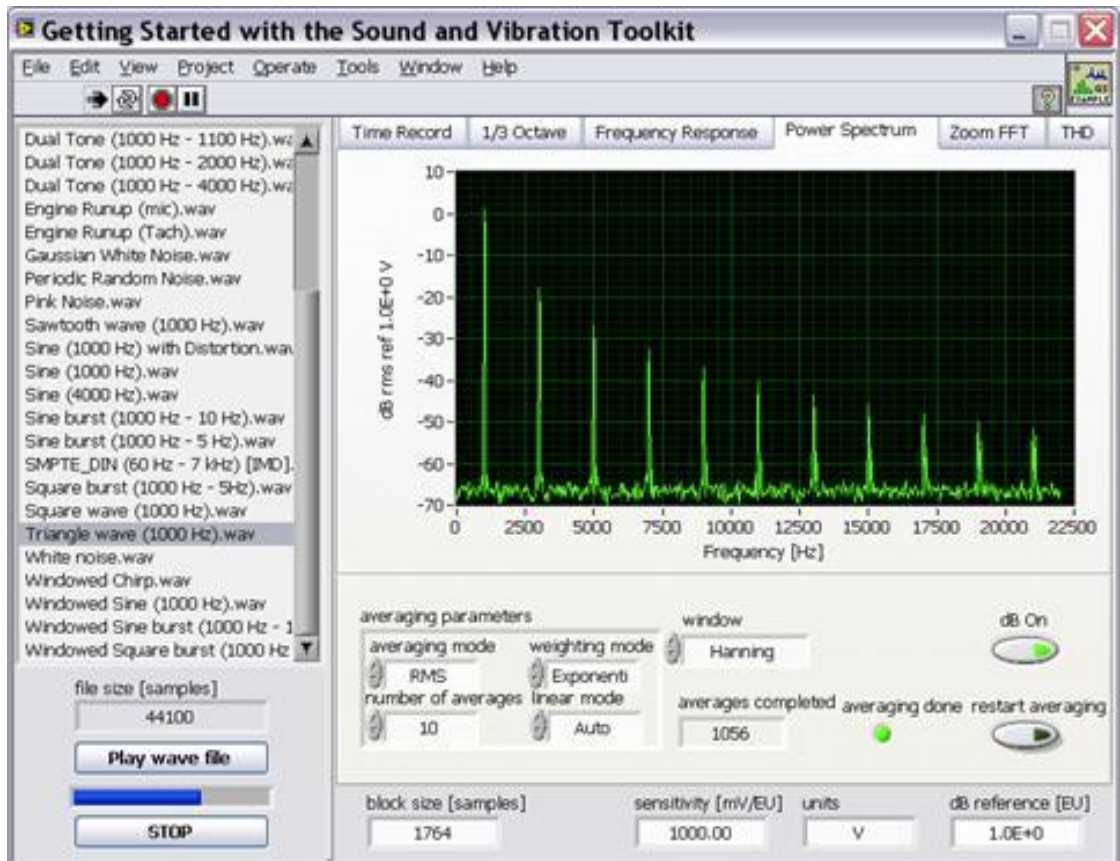
#### 4.2.2. - SELECCIÓN DEL SOFTWARE

El software que se utilizará para el desarrollo del proyecto es LabView que es un lenguaje de programación gráfica y que se presenta como la mejor opción para el desarrollo del programa de análisis e interpretación de los datos que arroja la máquina balanceadora de

rotores, además; tiene la capacidad de resolver algoritmos matemáticos avanzados, presenta reportes y es amigable para el usuario.

También se seleccionó LabView por la compatibilidad de comunicación que tiene con la tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB 9234.

En software, se puede convertir el voltaje adquirido en datos de frecuencia a través de funciones de análisis espectral (frecuencia-dominio). Un ejemplo simple es la transformada rápida de Fourier, o función FFT. se puede conducir con el software un procesamiento de datos más avanzado utilizando una de las muchas herramientas que National Instruments ofrece, como el NI Sound and Vibration Measurement Suite. (Figura 4.3)

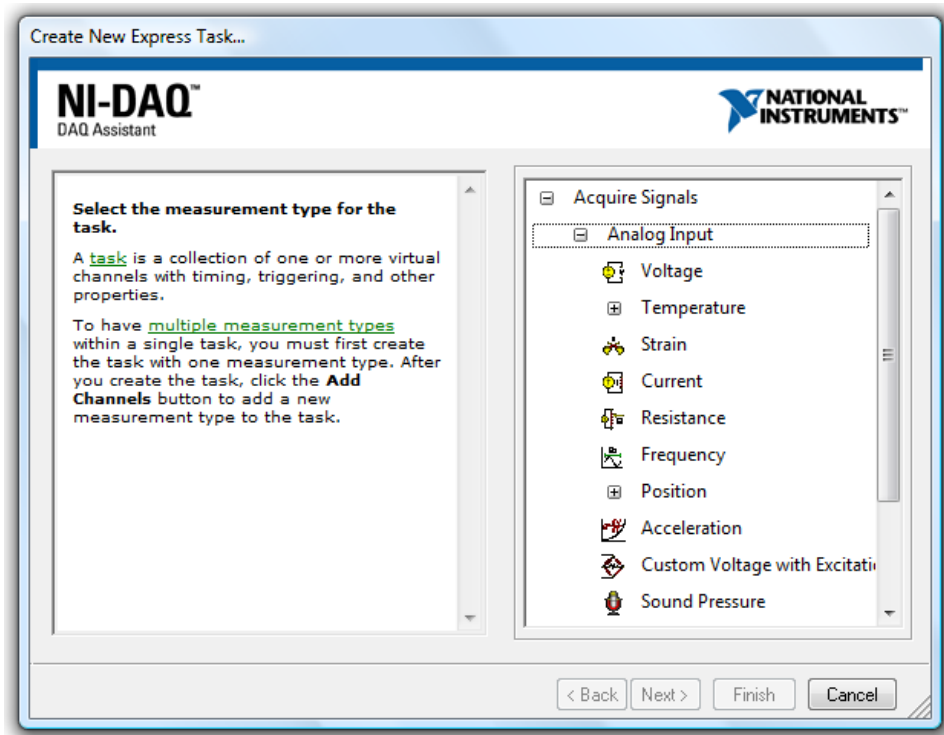
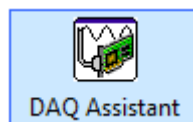


**Figura 4.3.** Señal adquirida (Análisis espectral)

#### 4.2.2.1.- DAQ configuración en Labview

Para la configuración de la tarjeta de adquisición de las señales, primero una vez abierto el programa, debemos ir al diagrama de bloques y elegir dentro de la paleta de Express la herramienta DAQ.

Siguiendo los pasos, se configura; “Adquirir la Señal”, desplazándose a la siguiente opción para escoger que tipo de señal que se va adquirir, ya sea en caso en Análogo Input y el tipo en lo que se va a trabajar, es de voltaje y aceleración. (Figura 4.4)



**Figura 4.4** Configuración DAQ dentro de Labview

Es importante mantener la misma ubicación del acelerómetro durante todo el procedimiento de balanceo por lo que los lugares de anclaje de los mismos están

determinados en sitios específicos en la aeronave indicados en el manual de mantenimiento. Un cambio de posición entre mediciones puede dar lugar a grandes errores en la definición de los contrapesos. Se recomienda marcar con una tiza la ubicación del acelerómetro para disminuir los errores. Verificar en todos los casos, que la base magnética esté bien enroscada en el acelerómetro y que ésta última esté bien pegada sobre la máquina. Cualquier movimiento relativo entre el acelerómetro y la máquina dará lugar a grandes errores de medición y definición de la posición del contrapeso.

#### **4.2.3 .- UBICACIÓN DEL FOTO TACÓMETRO (SENSOR ÓPTICO).**

El foto tacómetro debe ser montado a una distancia de 30 a 50 cm, de la cinta reflectiva y tiene que apuntar correctamente. Para el caso en que la cinta se aplique sobre una superficie brillante, es recomendable no apuntarlo en forma perpendicular, sino con cierto ángulo para evitar que se produzcan reflexiones en otros puntos del rotor que no sean la cinta. Verificar que el parpadeo del led sea constante. Si no está bien orientado, habrá reflexiones intermitentes y errores en las mediciones. Es recomendable, siempre que sea posible, hacer girar al eje a mano y verificar que la única reflexión detectada sea la de la cinta.

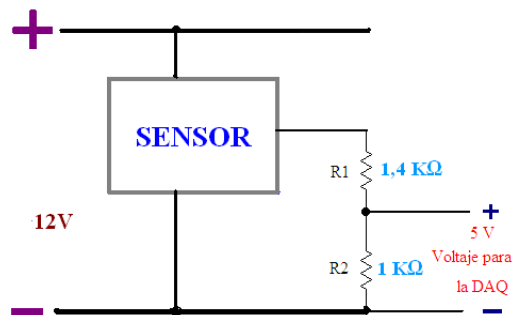
En general, cuando las vibraciones no sean demasiado altas, la base del foto tacómetro puede pegarse sobre un punto externo de la máquina. Sin embargo, para los casos en que las vibraciones sean excesivas, puede ser conveniente fijar a la base magnética del foto tacómetro sobre la máquina misma, a fin de que no haya cambios en las reflexiones por movimientos relativos.

#### **4.2.4.- ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL PARA EL FOTO TACÓMETRO**

Para obtener la señal del foto tacómetro se necesita alimentarle con una fuente externa de 10 – 30 Vdc. Para el presente proyecto se alimentará con 12 Vdc., es por ésta razón que se necesita un acondicionamiento de señal tipo PNP, porque la tarjeta de adquisición de datos

diseñada por el fabricante permite una entrada de voltaje de 0 a 5 V. La corriente máxima del foto tacómetro es de 100mA, por lo tanto el diseño se realizará con 5mA.

El circuito es un divisor de voltaje que ayudará a reducir el valor del voltaje (12V) que se aplica directamente al foto tacómetro, para ingresar los 5 V que se necesita para la tarjeta de adquisición de datos para no tener daños. (Figura 4.5)



**Figura 4.5.** Circuito de acondicionamiento para el foto tacómetro.

#### 4.2.4.1.- Cálculo de las resistencias R1 y R2

**Datos:**

$$V_1 = 12 \text{ V}$$

$$V_{R2} = 5 \text{ V}$$

$$I = 5\text{mA}$$

**Reemplazar los valores en la ecuación 4.1 y 4.2**

$$V_{R2} = V \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad [4.1]$$

$$I = \frac{V_T}{R_T} = \frac{V_T}{R_1 + R_2} \quad [4.2]$$

**Cálculos:**

$$5\text{mA} = \frac{12\text{V}}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{5V}{12V} = \frac{R_2}{R_2 + \frac{12}{5mA} - R_2}$$

**Resultados:**

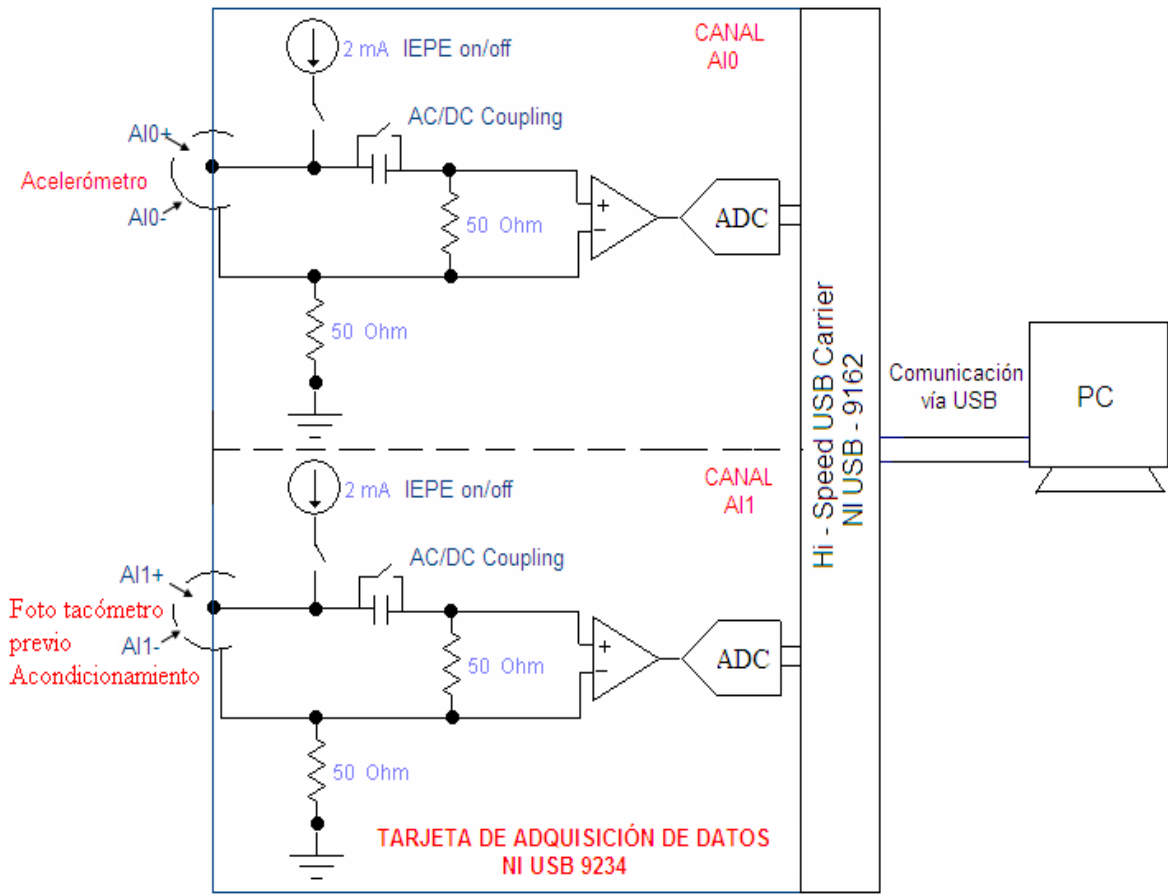
$$R_2 = 1K\Omega$$

$$R_1 = 1,4K\Omega$$

### **4.3 .- DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS**

En la figura 4.6 se muestra el diagrama eléctrico del sistema de adquisición de datos, en el cuál constan los sensores (acelerómetro y foto tacómetro) conectados a la tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB-9234 con conectores tipo BNC que ayudarán a eliminar el ruido.

Hay que tener en cuenta que el acelerómetro no necesita ningún tipo de acondicionamiento de señal porque la tarjeta de adquisición de datos le alimenta internamente con una fuente de corriente. (Figura 4.6)



**Figura 4.6** Diagrama eléctrico del sistema de adquisición de datos.

#### 4.3.1.- IMPLEMENTACIÓN EN LABVIEW

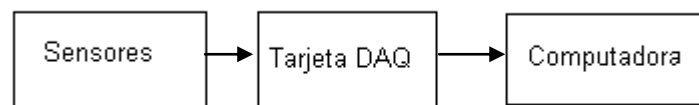
El instrumento está constituido por un panel o menú principal que es el que sirve de interface entre éste y los diferentes instrumentos individuales desarrollados para cada parte del proceso. La vista del Panel Principal del instrumento desarrollado indica el control de cada una de las ventanas que se necesitan para la medición y corrección del rotor principal y de cola. Las diferentes opciones del sistema son representadas por botones los cuales representan los enlaces entre esta ventana y el resto de sub-ventanas de los diferentes instrumentos diseñados.



Dichas herramientas fueron desarrolladas para cumplir tareas específicas, tales como medición de fase, medición de vibración y otras que se las analizó anteriormente que proveen al sistema de una mayor versatilidad y mejoran las prestaciones globales del sistema desarrollado. Esto se lo hizo en base a diagramas de bloques de cada sub-instrumento diseñado, los cuales fueron analizados y ejecutados en forma individual.

#### 4.3.2.- DIAGRAMA GENERAL

Como se muestra en el siguiente diagrama de bloques, el instrumento desarrollado se basa en la interacción de diferentes elementos principalmente de hardware que son indicados, ya que para la comunicación de los sensores con el instrumento virtual se lo hace a través de la tarjeta NI 9234 USB, esta tarjeta es necesaria por el acoplamiento y diseño ideal de la DAQ para análisis de vibraciones, ya que ésta a su vez tiene en su interior filtros antialiasing, una resolución de 24 bits y un rango dinámico de 102 db. (Figura 4.7)

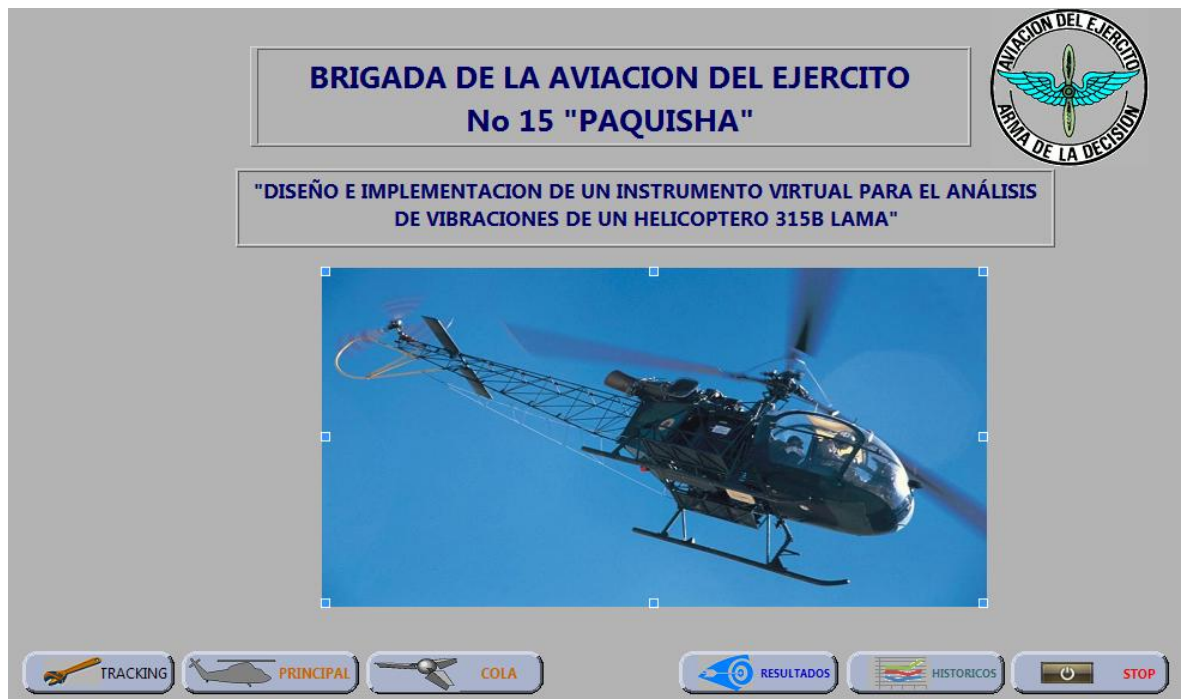


**Figura4.7** Diagrama General

El instrumento virtual desarrollado en su totalidad en LabView consta de instrumentos específicos desarrollados en cinco Sub VI, además estos se enlazan en uno solo por medio de un menú o VI principal que cumple las funciones de enlace y ejecución de cada parte del proceso de medición y corrección de vibraciones en el helicóptero.

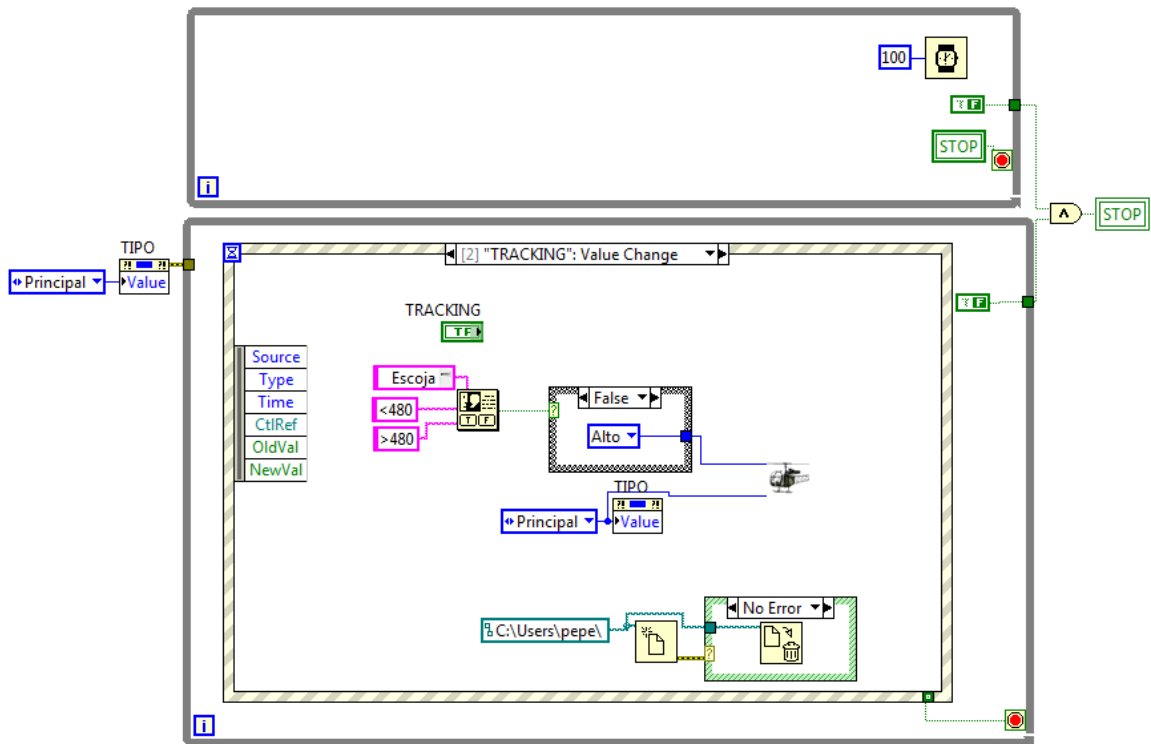
#### 4.3.3.- MENÚ PRINCIPAL

El Panel Principal del instrumento enlaza las diferentes opciones del sistema que son representadas por botones los cuales permiten los enlaces entre esta ventana y el resto de ventanas de los diferentes instrumentos diseñados, además muestra el interruptor que permite apagar el instrumento una vez finalizado el proceso. (Figura 4.8)



**Figura 4.8** Ventana del menú principal

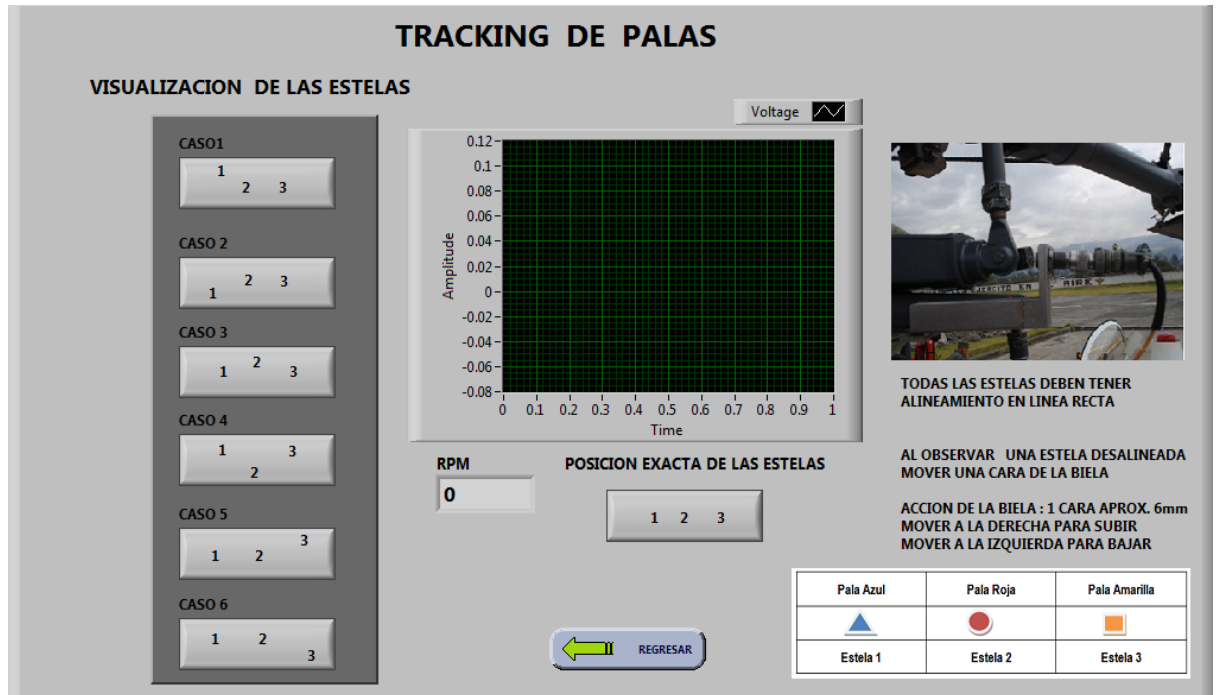
Dentro de la ventana principal podemos observar en el diagrama de bloques, el funcionamiento interno. (Figura 4.9)



**Figura 4.9** Diagrama de bloques de la ventana principal

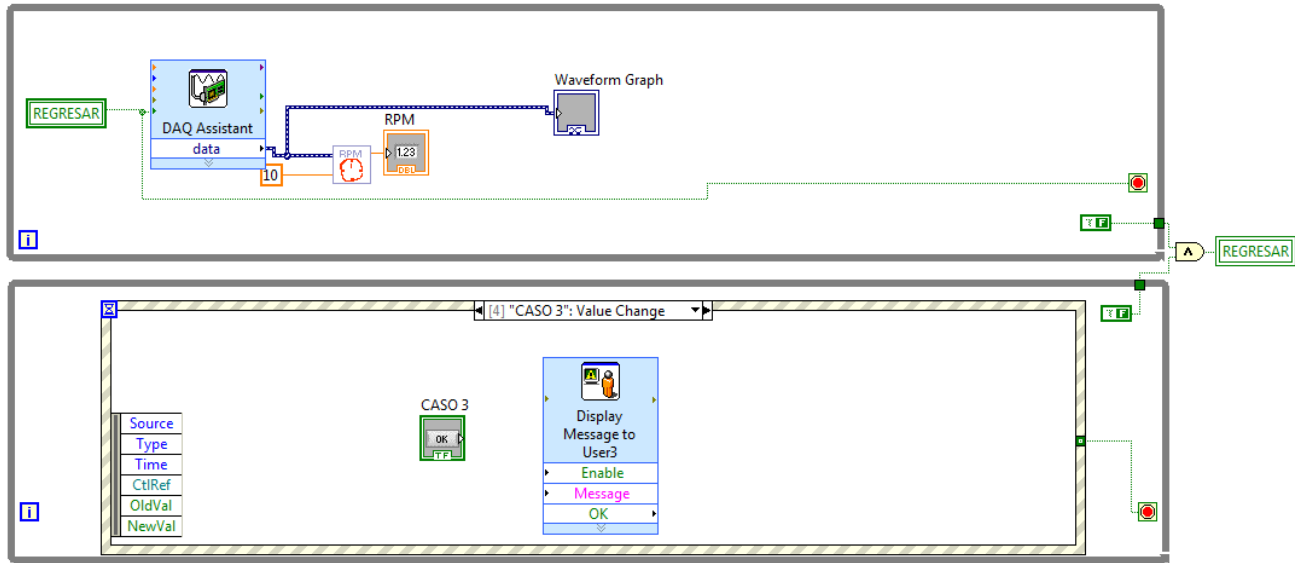
#### 4.3.4 .- TRACKING

Una lámpara estroboscópica es utilizada para iluminar blancos reflectivos que son colocados en los extremos de las palas ya sea del rotor principal o de cola de un helicóptero, de esta manera emite una señal, de esta se obtiene su frecuencia y por ende se obtiene la velocidad rotacional del rotor el cual es objeto de análisis. (Figura 4.10)



**Figura 4.10** Tracking Palas del rotor Principal

Una vez adquirida la señal por la tarjeta de adquisición de datos fue necesario por medio del software realizar una etapa de filtros digitales, el mismo que es indicado en el diagrama de bloques. La señal que emite este sensor proporciona la fase en el rotor principal, esta es determinada en combinación con la señal proveniente del captor magnético. (Figura 4.11)



**Figura 4.11** Diagrama de bloques de tracking Palas

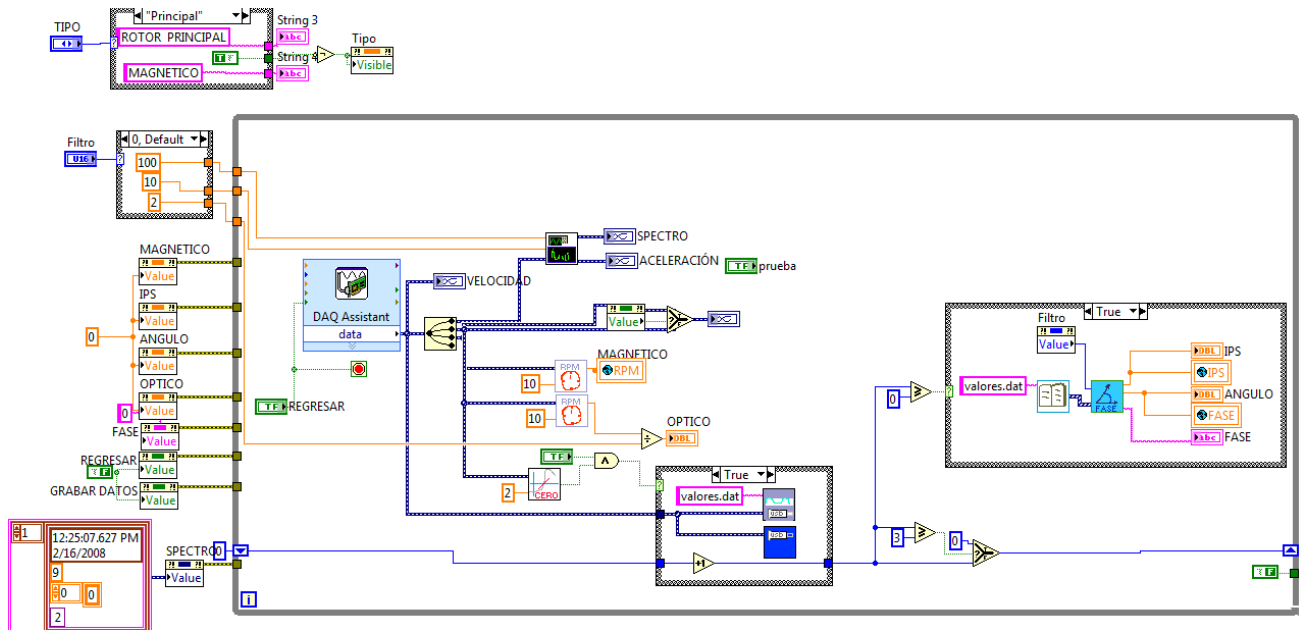
#### 4.3.5.- MEDICIÓN DE VIBRACIÓN

Para la determinación de las vibraciones en el rotor principal, realizamos una ventana básica donde se muestra las señales del acelerómetro y de captor magnético, y los niveles de espectro de frecuencia, para el análisis posterior de los resultados. Como el rotor principal y de cola del helicóptero poseen el mismo principio, el análisis de señales adquiridas, tiene el mismo tratamiento ya que el sensor acelerómetro es utilizado en ambos casos (Figura 4.12)



**Figura 4.12** Ventana de análisis de señales rotor principal

A continuación el diagrama de Bloques del instrumento, en el cual se puede observar de manera más detallada el funcionamiento interno. El mismo consta en si de un gran lazo repetitivo el cual contiene al resto de elementos del instrumento. El instrumento ofrece la opción de seleccionar el acelerómetro del cual se quiere adquirir la señal, recuerde que existen cuatro canales de la DAQ asignados a la adquisición de estas señales previamente identificadas, lo cual permite elegir el canal del cual se van a obtener las señales. (Figura 4.13)



**Figura 4.13** Diagrama de bloques del análisis de señales del rotor principal

Para el análisis de las vibraciones en el rotor de cola, realizamos un Sub VI basado en gráficas para analizar el rango de armónicos de la señal; ya que de igual manera se utiliza un sensor acelerómetro y un captor óptico, por ende, la ventana de este análisis tiene la misma contextura gráfica del rotor principal pero adquiere las señales de los sensores ya mencionados. Del mismo modo en el diagrama de bloques se hace un análisis espectral con precisión de IPS del sensor y medición de fase entre el acelerómetro y captor óptico para el previo análisis y la corrección de las vibraciones. (Figura 4.14 y 4.15)

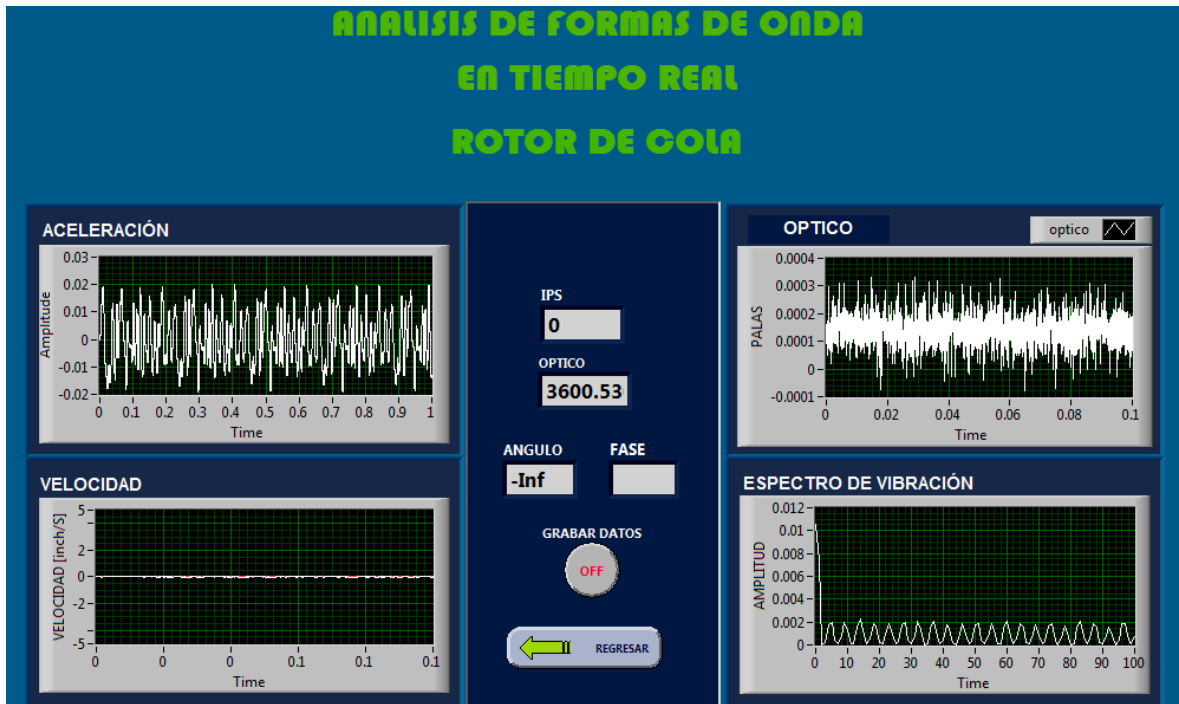


Figura 4.14 Ventana de análisis de rotor de cola

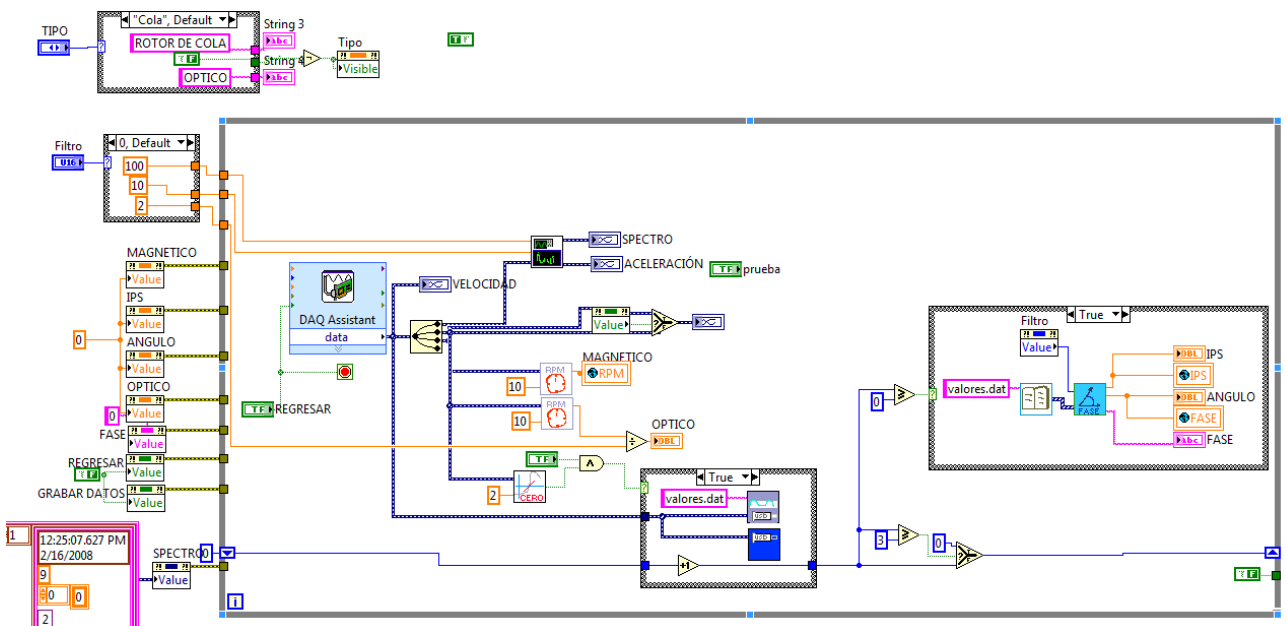


Figura 4.15 Diagrama de bloques de análisis de rotor de cola

Una vez obtenidos los armónicos, dichos valores son reajustados por una curva de ajuste para representar estos resultados en IPS que son las unidades de vibración empleadas para

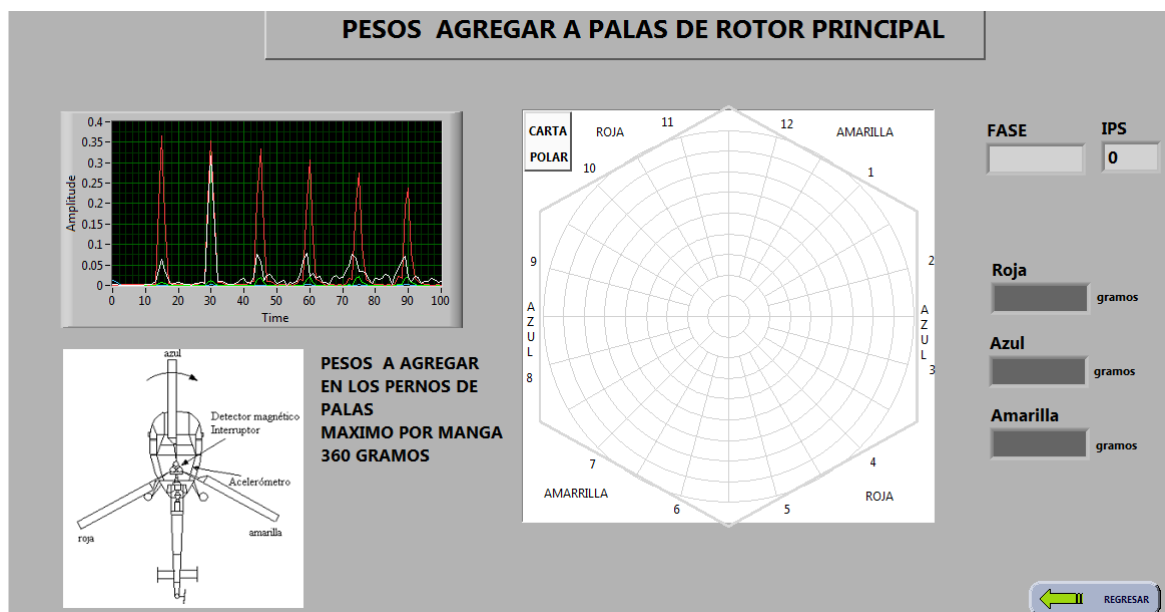


representar las mismas, finalmente estos valores son presentados en pantalla pero en forma numérica. Mayores precisiones sobre la curva de ajuste

#### 4.3.6.- CÁLCULO DE CORRECCIONES

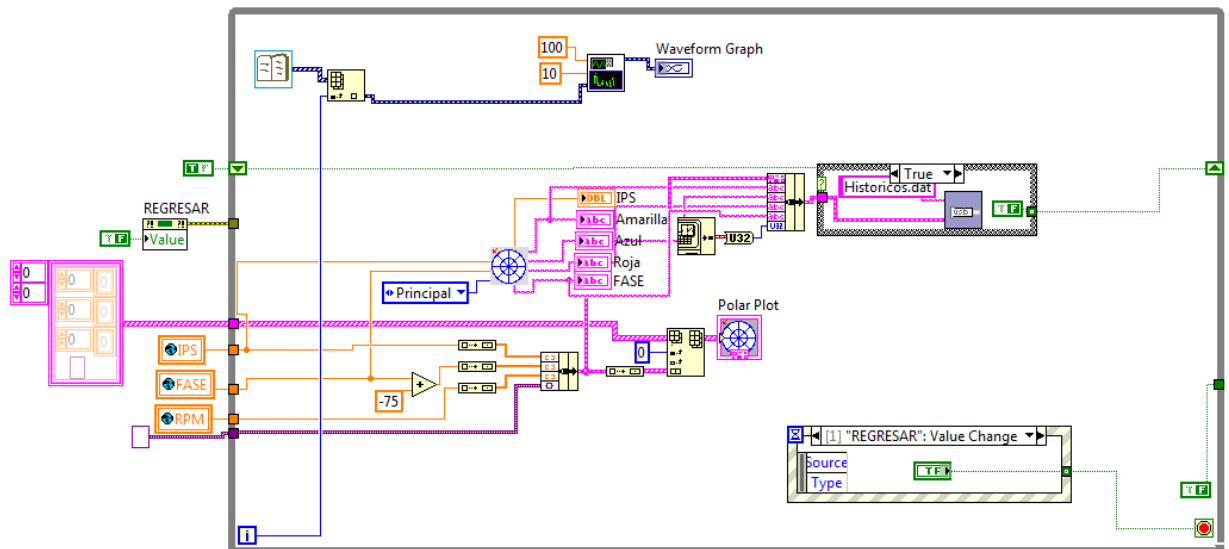
Este Sub VI tiene como propósito la determinación de los parámetros de corrección del nivel vibratorio en el helicóptero, mediante el método de la Carta Polar. Debe recordarse que existen diferentes tipos de cartas para los diferentes tipos de rotores de cada tipo de helicóptero existente, proporcionadas por los fabricantes de los mismos en los manuales de mantenimiento respectivos, además, debe considerarse que estas cartas fueron desarrolladas de manera experimental, es decir, que no tienen ningún soporte matemático o están basadas en ningún tipo de algoritmo matemático, razón por la cual su origen es fruto de un proceso experimental.

Como se puede observar, se presenta en pantalla información referente al nivel vibratorio medido por el acelerómetro en IPS en la opción instrumento Vibraciones, además muestra la fase medida en horas en la opción instrumento Fases, de las cuales se quieren realizar los cálculos de los parámetros de corrección respectivos. (Figura 4.16)



**Figura 4.16** Ventana del Corrección de vibraciones en la carta polar para el rotor principal

Para el rotor Principal los datos de vibración en IPS y fase en Horas son procesados dentro de un algoritmo matemático que se asemeja al uso de la Carta Polar en papel, dicho algoritmo se obtuvo en base a un profundo análisis trigonométrico y a ciertas características geométricas determinadas en las mismas que permitieron desarrollar un sistema de cálculo de los parámetros de corrección de manera equivalente al uso de la Carta Polar. (Figura 4.14)



**Figura 4.17** Diagrama de bloques de la corrección de vibraciones del rotor principal

De la misma manera utilizamos el mismo concepto de la carta polar para el rotor de cola, ya que solo los datos que usamos para la corrección de las vibraciones son los ips y la fase respectivamente para cada rotor. (Figura 4.18 y 4.19).

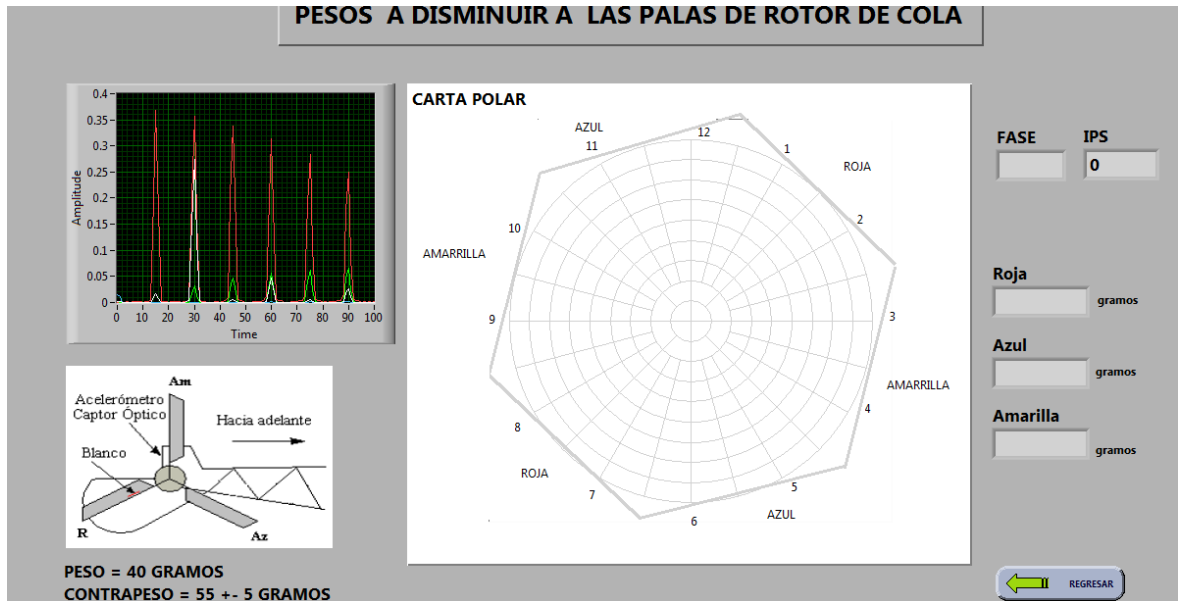


Figura 4.18 Corrección de vibraciones rotor de cola

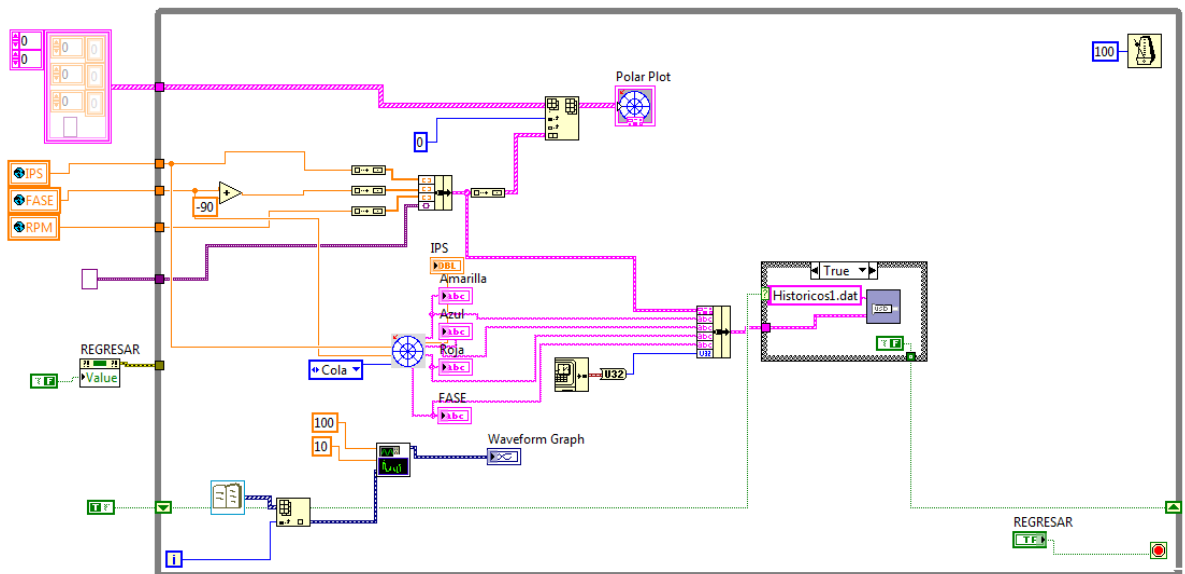
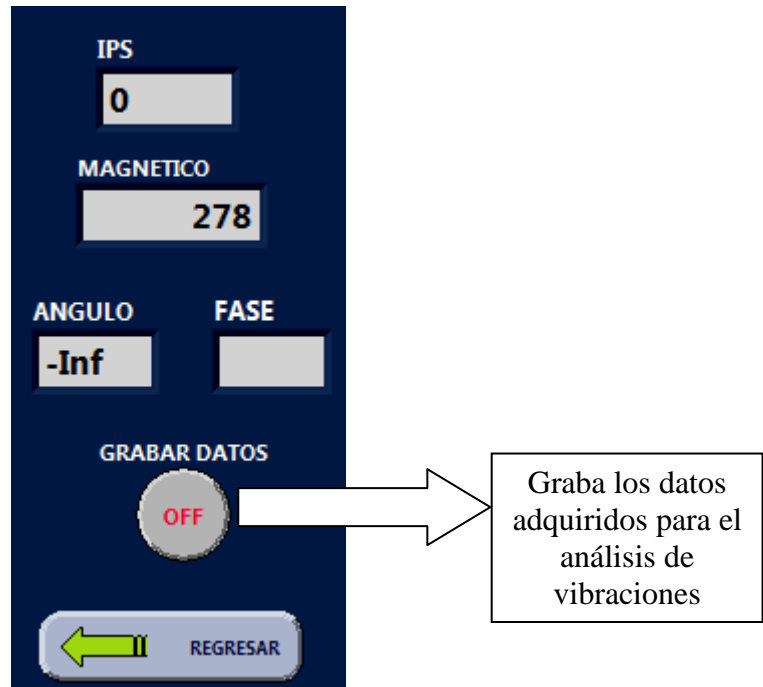


Figura 4.19 Diagrama de bloques Corrección de vibraciones rotor de cola

#### 4.3.7.- GUARDAR DATOS

Esta opción tiene como objetivo el almacenamiento de los datos de vibración, fase, fecha y parámetros de corrección es parte al Sub VI de cada análisis de forma de onda en rotor principal y de cola, en un archivo con el propósito de establecer un histórico de las

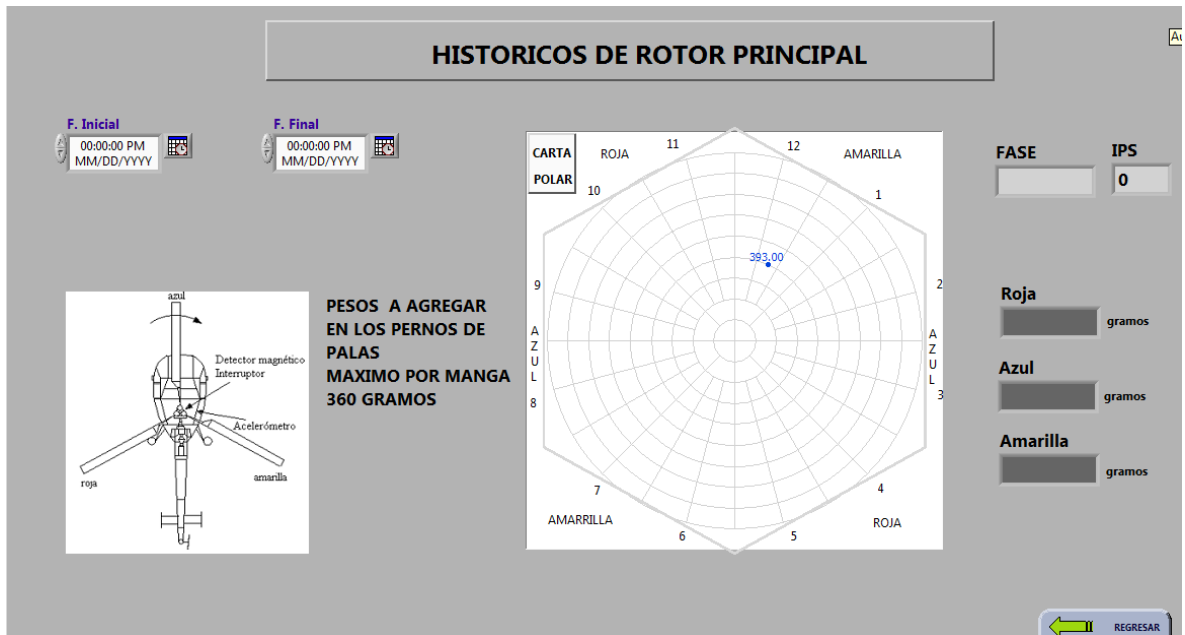
correcciones realizadas. La opción no constituye ni tiene ningún instrumento desarrollado específicamente para este, únicamente contiene instrumentos desarrollados por LabView para la manipulación de archivos. (Figura 4.20)



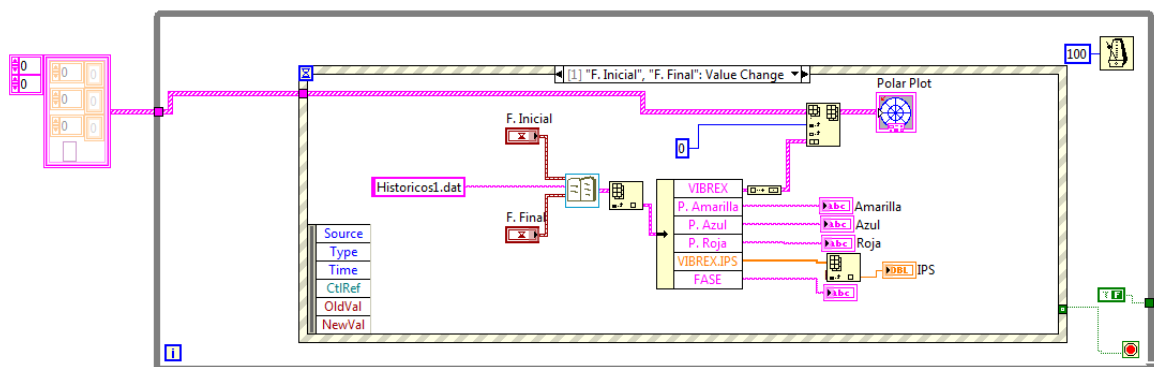
**Figura 4.20** Guardar datos

#### **4.3.8.- REVISIÓN DE HISTÓRICOS**

Instrumento desarrollado con el propósito de permitir la revisión de los datos almacenados en el archivo al presionar el botón de guardar en el menú principal. (Figura 4.21 y 4.22)



**Figura 4.21** Ventana de revisión de históricos rotor principal



**Figura 4.22** Diagrama de bloques de revisión de históricos rotor principal

De la misma manera realizamos una revisión de históricos para el rotor de cola dentro del instrumento desarrollado. (Figura 4.23 y 4.24)

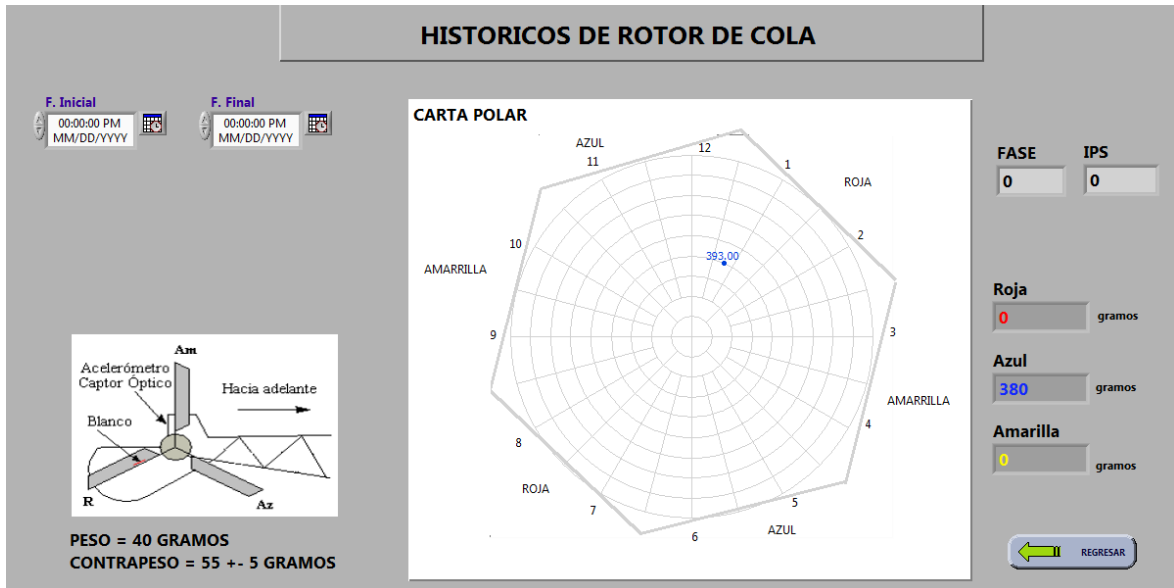


Figura 4.23 Ventana revisión de históricos rotor de cola

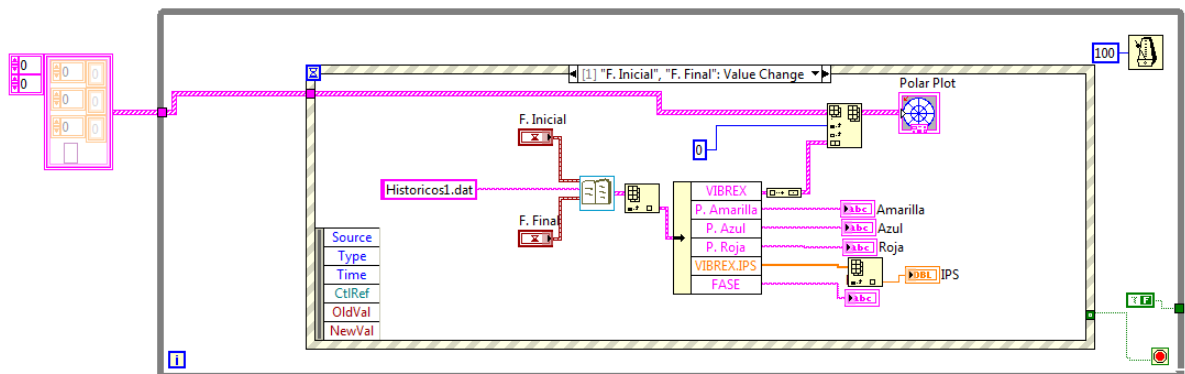


Figura 4.24 Diagrama de bloques revisión de históricos rotor de cola

#### 4.4 .- DETERMINACIÓN DE DATOS CORRECTIVOS EN EL PROCESO

Al igual que para el rotor principal para establecer los pesos de balanceo se requieren únicamente dos datos: El valor en IPS de la vibración del rotor, en este caso del rotor de

cola y la fase referencial del peso que causa el desbalanceo, con ambos datos se procede de igual forma que el caso del rotor principal.

Debido a que este sistema necesita realizar varias pruebas para su funcionamiento final, las pruebas individuales y varias pruebas en conjunto se realizaron en un banco de pruebas dispuesto en el laboratorio de la Brigada, el mismo es parte del sistema Vibrex, una vez realizadas las mismas, se realizaron pruebas reales, esto es, con una completa instalación del sistema en un helicóptero LAMA. Una vez revisada toda la información reunida acerca del funcionamiento de todos los sensores y realizado el respectivo acondicionamiento virtual del proceso real en el análisis de vibraciones

El trabajo de medición e interpretación de las señales de los sensores debió ser realizado de manera experimental, utilizando las herramientas disponibles en laboratorio como banco de pruebas, el cual no ofrece el suficiente número de puntos referenciales para establecer un parámetro más preciso del funcionamiento de los mismos, por lo cual el rango de error de los resultados obtenidos puede llegar a ser muy elevado.

Debiendo seguir una referencia en los manuales de mantenimiento del helicóptero previo al balanceo de vibraciones tanto como rotor principal y el de cola, primero debemos realizar una alineación de las palas rotor principal (tracking) dando un rango de IPS 0.2 y una desviación de 6 mm por flasheo de luz en cada pala, alineando las estelas de cada pala en línea recta a 6 mm de cada número de las estelas.

Una vez ejecutada ésta alineación, realizamos el análisis respectivo de vibraciones con el acelerómetro conectado en la base del rotor principal dando un nivel tolerable de IPS de 0.3 a 0.75; presentando en las medidas tomadas de 0.6 ips con fase de 11:30; como valores de acuerdo al instrumento virtual diseñado, dando así los pesos a agregar en cada una de las palas con respectiva referencia de identificación en color o número de estela:

Rojos: 295 gr., es el peso a agregar en la pala.

Azul: 0 gr., es la pala que se establece de referencia por lo que no necesita peso a agregar.

Amarillo: 320 gr., es el peso a agregar en la pala.

Con 354 R.P.M., son las revoluciones constantes del rotor principal.

Nota.- Para el caso del rotor de cola es el mismo principio de agregar pesos en las palas para balancear el plano de rotación.



## CAPÍTULO V

# DISEÑO DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CORRECCIÓN

### INTRODUCCIÓN

Se describen de manera general, como funciona el instrumento desarrollado, sus elementos y conexión. Se presentan diagramas de bloques que permiten identificar los diferentes componentes de los cuales está compuesto el sistema de análisis de vibraciones y se explica de manera global el propósito de cada bloque. En cuanto al hardware elegido para la adquisición de los datos es empleada la DAQ USB-9234, para el desarrollo del presente proyecto, razón por la cual se enfocó la utilización de la misma, que tiene internamente filtros anti-aliasing, resolución de 24 bits, rango dinámico de 102 dB y máxima velocidad de muestreo de 51.2 kS/s por canal, que nos permite adquirir la señal en tiempo real y mayor número de datos muestreados y adquiridos para el análisis correspondiente en nuestro instrumento virtual en la corrección de vibraciones de conjuntos mecánicos rotatorios.

El análisis para la frecuencia (o espectral), es la técnica más comúnmente empleada para el diagnóstico de fallas por medio del análisis de vibraciones. Se pueden identificar fallas típicas tales como desbalanceo de rotor, desalineamiento, soldaduras mecánicas y defectos en rodamientos. La idea fundamental del análisis frecuencial es encontrar la relación existente entre la frecuencia de las componentes discretas presentes en el espectro y la frecuencia de las fuerzas dinámicas que generan las vibraciones.

Durante la etapa de recolección de datos de vibración, es posible mejorar la *SNR* (relación señal-ruido) incrementando el número de promedios y/o mejorando la resolución en frecuencia (utilizando más líneas en el espectro). Adicionalmente se requiere del uso de sensores con bajo ruido eléctrico (inherente) y alta sensibilidad, también la disminución del

ruido en la adquisición de la señal es más óptimo utilizar la DAQ USB-9234 que presenta filtro de anti ruido velocidad en muestrear los datos adquiridos

## **5.1.- DESCRIPCIÓN FÍSICO DEL SISTEMA**

Las funciones realizadas por el instrumento virtual diseñado, están realizadas en base a diagramas de bloques de cada Sub VI diseñado, los cuales fueron analizados en forma individual, se detalla el funcionamiento global del sistema tanto en la parte de hardware y software, además se realiza un análisis más profundo de los instrumentos utilizados y su incorporación a la herramienta general especialmente diseñada en este proyecto, dichas herramientas fueron desarrolladas para cumplir tareas específicas, tales como medición de fase, medición de vibración y otras que se las analizó anteriormente que proveen al sistema una mayor versatilidad y mejoran las prestaciones globales.

Es necesario mencionar que el sistema debió ser adaptado a los elementos con los que cuentan los equipos analizados en el CAPÍTULO II y III, esto debido a que el sistema es experimental ya que, si bien es cierto se cuenta con la tarjeta de adquisición de datos( USB 9234) junto con el software LabView, la información concerniente a los sensores ha sido clasificada por sus fabricantes por ser de uso militar por lo que se ha trabajado en base a pruebas empíricas y a un profundo análisis de los datos técnicos de sensores similares o con la poca información existente acerca de los mismos. Ya que el costo de los sensores es extremadamente alto así como los cables y conectores para realizar la interconexión.

Los cables en sus extremos cuentan con conectores que deben estar perfectamente asegurados, por el trabajo a desempeñar, si bien en teoría son los que llevan la señal de los diversos sensores, deben poseer características tales como soportar altas y bajas temperaturas, así como ser muy resistentes e impedir la filtración de ruido en los mismos, por estas razones se utilizarán los cables provistos por los fabricantes del los equipos mencionados

## **5.2.- OPTIMIZACIÓN, CALIBRACIÓN Y AJUSTE DEL HW Y SW**

Debido a las características propias de cada tipo de sensor, a su diferente valor en lo que se refiere a su voltaje de alimentación, se hizo necesaria la separación o agrupación de sensores para obtener las diferentes señales por lo que se los separó y clasificó de la siguiente manera.

- Sensores utilizados para alineación de las palas del rotor principal
- Sensores utilizados para el balanceo de las palas del rotor principal y de cola de un helicóptero.

Al realizar las diferentes pruebas en laboratorio, se encontró que la activación del sensor óptico y lámpara estroboscópica, alteraban los valores que se refiere a la obtención de IPS por parte de los acelerómetros por lo que la solución a este problema es separar la obtención de datos.

Para una obtención de datos correctos, es necesario cortocircuitar tierras, esto es unir el polo negativo de la fuente de alimentación, señal de sensores y de la tarjeta de adquisición de datos.

## **5.3.- PRUEBAS EXPERIMENTALES**

Como punto de inicio del trabajo de balanceo, todas las palas del rotor de cola del helicóptero deben tener un peso añadido de 55,5 gr., es decir se debe partir del peso máximo que puede ser añadido en cada pala y se puede sustraer peso hasta dejar en cada pala un mínimo de 40 gr. Por lo tanto si se dá el caso de que la carta polar arroje un resultado de peso al sustraer; cuyo resultado arroje un peso en la pala menor a 40gr o los pesos de corrección han alcanzado sus límites de corrección y persiste el desequilibrio, el operario deberá realizar los denominados cambios mayores en el rotor de cola, antes de retomar desde el punto inicial nuevamente el proceso de balanceo.

No se hizo acondicionamiento de señales necesarios ya que esta tarjeta DAQ USB 9234 tiene un filtro antialiasing y un acondicionamiento de señales IEPE seleccionable por software (0 ó 2 mA).

Los procesos efectuados son:

- Instalación y configuración de la tarjeta de adquisición de datos USB 9234.
- Adquisición de datos de los diferentes sensores a través de la tarjeta de adquisición de datos 9234. Monitoreo y control de la adquisición de datos mediante LabView.
- Obtención e interpretación de la señal de los acelerómetros.
- Obtención e interpretación de la señal del captor magnético, captor óptico y pistola estroboscópica.

## **5.4.- ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **5.4.1.- ALCANCES**

En el desarrollo del tema de tesis: “DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN ANALIZADOR DE VIBRACIONES VIRTUAL POR SOFTWARE LABVIEW PARA UN HELICÓPTERO LAMA 315-B”, podemos indicar que se implementó por Software equipos de medición virtuales, que realizarán las mismas funciones en la corrección de vibraciones utilizando la plataforma virtual (HW-SW) cuyo entorno de programación gráfica es Labview, desarrollando sistemas sofisticados de medida, pruebas y control usando íconos gráficos e intuitivos y cables que parecen un diagrama de flujo, el instrumento virtual ofrece una integración incomparable con miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos por lo que se pueden desarrollar instrumentos virtuales, que comparados con equipos físicos, adquiere las mismas prestaciones que el equipo Vibrex 2000.

Por lo que la implementación tiene su alcance exclusivo para el balanceo del rotor principal y el rotor de cola del Helicóptero Lama, siendo este una aproximación real de los pesos requeridos para el balanceo tanto en los planos de rotación que se comportan de

igual manera que los conjuntos giratorios, por lo que se deduce en sus análisis, encontrar zonas de desbalance, al cual debemos reducir vibraciones hasta niveles permitidos, en nuestro caso determinados en el Manual de Mantenimiento de la Aeronave.

Una de las ventajas de LabVIEW es: "La potencia está en el Software", que con la aparición de los sistemas multinúcleo se ha hecho aún más confiable, por lo que se ha reducido el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo (no sólo en ámbitos de Pruebas, Control y Diseño). Inicialmente podemos indicar que este software elaborado, puede servir de base para seguir desarrollando un instrumento virtual para la corrección de vibraciones, basados en el ábaco o carta polar, que consta en el manual de mantenimiento, que es diseñada y está en función el número de palas que componen el rotor principal y el rotor de cola de cada uno de los tipos de helicópteros que posee la Brigada de la Aviación del Ejército de acuerdo al siguiente detalle:

**Tabla 5.1** Cuadro explicativo del No. de palas del rotor principal y de cola.

ORD.	TIPO	No. PALAS R. PRINCIPAL	No. PALAS R. COLA
1	Gazalle	3	13
2	Ecuriel	3	2
3	Puma	4	5
4	Súper Puma	4	5
5	MI-171	5	3

Por lo que se establece que es necesario elaborar una tabla de valores específicos de cada aeronave, para que los mencionados valores sean una aproximación verdadera de los pesos a incrementar para reducir el nivel vibratorio requerido.

#### **5.4.2.- LIMITACIONES**

El software diseñado para la corrección de vibraciones, está limitado solo para el Helicóptero Lama, por lo que se hace necesario seguir desarrollando o integrando el análisis para el balanceo para la corrección de vibraciones a otros tipos de helicópteros antes indicados en la Tabla 5.1

Como parte de la adquisición de datos, la Tarjeta de Adquisición NI DAQ USB-9234, tiene solo cuatro entradas y salidas lo que limita la conexión física de más sensores para incorporar más variables de medición cuando se muestrean señales.

Las longitudes de los cables de conexión del acelerómetro, captor magnético y captor óptico se diseñaron con la distancia mínima (12.5m.) para que señal en la adquisición de datos sea menos distorsionada no haya interferencias, por lo que es necesario tener en cuenta las siguientes indicaciones:

- Mantener los conductores de entrada y salida tan lejos como sea práctico de los generadores de interferencias electromagnéticas y electroestáticas.
- Simplificar los caminos de corriente conmutada para evitar crear bucles de masa y así minimizar la inducción de picos de interferencia adicionales.
- Disponer blindajes entre la fuente generadora de interferencia y los conductores sensibles de entrada y salida, para reducir la inducción del ruido producido por el motor la aeronave que genera un elevado nivel de decibeles.
- Minimizar el acoplamiento capacitivo al chasis.
- Mantener las líneas con transitorios  $di/dt$  y  $dv/dt$ , lo más corta que sea posible para reducir el área efectiva del transmisor de interferencia y las capacitancias parásitas.

Dentro de limitaciones podemos exponer la disponibilidad de las aeronaves era muy restringida, para realizar la comprobación y la aplicación del instrumento virtual implementado.

Dentro del plazo establecido en la elaboración del equipo virtual , tuvimos retraso en la ejecución del tema de tesis por la demora en la compra del equipo Vibrex 2000 y de la lámpara estroboscopia, por lo que no se podía comparar la toma de datos tanto para determinar la fase en horas y el peso a adicionar en cada una de las palas tanto para el rotor principal y el de cola.

## 5.5.- ANÁLISIS TÉCNICO – ECONÓMICO

Logrando los objetivos generales y parciales planteados para el proceso de esta investigación en el “DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN ANALIZADOR DE VIBRACIONES VIRTUAL POR SOFTWARE LABVIEW PARA UN HELICÓPTERO LAMA 315-B” ( instrumento virtual), se puede considerar que al desarrollar instrumentos virtuales en cualquier software de instrumentación industrial, nos admite un considerable ahorro de recursos económicos, horas de investigación, simplicidad en los acondicionamientos de las señales.

A continuación presentamos los valores que necesarios para la elaboración del tema de tesis de acuerdo al siguiente detalle. (Figura 5.2)

**Tabla 5.2** Cuadro explicativo de los valores económicos utilizados en el desarrollo del Proyecto

<b>Recurso</b>	<b>Valor</b>
Tarjeta de adquisición de Datos	\$2200.00
Acelerómetro	\$600.00
Captor óptico	\$100.00
Captor magnético	\$100.00
Movilización(Consultas y revisiones)	\$300.00
Varios	\$200.00
<b>TOTAL DEL PROYECTO</b>	<b>\$3500.00</b>

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 6.1.- CONCLUSIONES

1. Al finalizar el proyecto de tesis se logró cumplir el objetivo general trazado que fue el de diseñar e implementar un analizador de vibraciones para el balanceo y la corrección de vibraciones en el helicóptero 315 B Lama.
2. El diseño e implementación se basó en el acondicionamiento, de las señales en voltajes que soporta la Tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB-9234, en tiempo real.
3. La adquisición de datos fueron por medio de la tarjeta antes mencionada y su análisis respectivo se realizó en plataforma virtual (HW-SW) cuyo entorno de programación gráfica es Labview, en el cual se elaboró el software del instrumento virtual.
4. Se llegó a determinar en forma aproximada los valores en peso para el balanceo de los rotores principal y de cola en los parámetros determinados en el Manual de Mantenimiento.
5. Se realizó la comparación de los datos obtenidos por el instrumento virtual con relación al equipo Vibrex 2000 plus, que eran similares, pudiendo tener como resultados un margen mínimo de error.
6. Dentro del análisis realizado en el instrumento virtual se determinaron los datos correctivos en pruebas realizadas dando como resultado un porcentaje de error de 1% bajo las mediciones junto con el Vibrex real, siendo un valor dentro de una tolerancia aceptable.



7. En las implementaciones mecánicas de los sensores en el helicóptero LAMA realizadas se determinó la alta sensibilidad de los mismos de acuerdo a la precisión de la posición en la estructura para obtener los resultados adecuados.
8. El desarrollo del diseño y construcción del analizador de vibraciones virtual, garantiza que con la tecnología se implemente un instrumento virtual y es posible reducir los costos que involucraría en la compra para la adquisición de equipos como el Vibrex 2000, para la corrección de vibraciones que permite el control, la automatización y la simplificación de procesos.
9. Las interfaces determinadas en el VI's principal y en los Sub VI's nos visualiza cada medición, es de fácil manejo por el operador, con datos concretos para que el mecánico pueda analizar y realizar el balanceo en la parte mecánica en el rotor principal y de cola.

## **6.2.- RECOMENDACIONES**

1. Que se siga desarrollando el software, para implementar un instrumento virtual multifuncional que permita analizar y corregir las vibraciones de los Helicópteros que dispone la 15- BAE, Tabla 5.1.
2. Que se dé una capacitación al personal de técnicos que operarán el instrumento virtual teniendo la previsión que los sensores (captor óptico, captor magnético, acelerómetros y lámpara estroboscópica) son muy sensibles, por lo que deben ser manipulados con el mayor cuidado, estos pueden perder su sensibilidad lo que provocará cambios sustanciales en la toma de medidas por lo que pueden generar datos incorrectos.
3. La necesidad de la adquisición de un PC personal portátil, disponer del software Labview y que este tenga la licencia respectiva para desarrollar instrumentos virtuales para cualquier utilidad.

4. Utilizar los instrumentos adecuados y fuentes internas para la alimentación eléctrica de los sensores y el equipo a realizar las mediciones tomando las precauciones dadas en el manual de usuario
  
5. Utilizar la tarjeta DAQ con rango de voltaje indicado en las especificaciones técnicas, ya que se deben manejar voltajes de hasta 10 Voltios DC para no tener problemas en la adquisición y adecuación de la señal en el programa virtual.

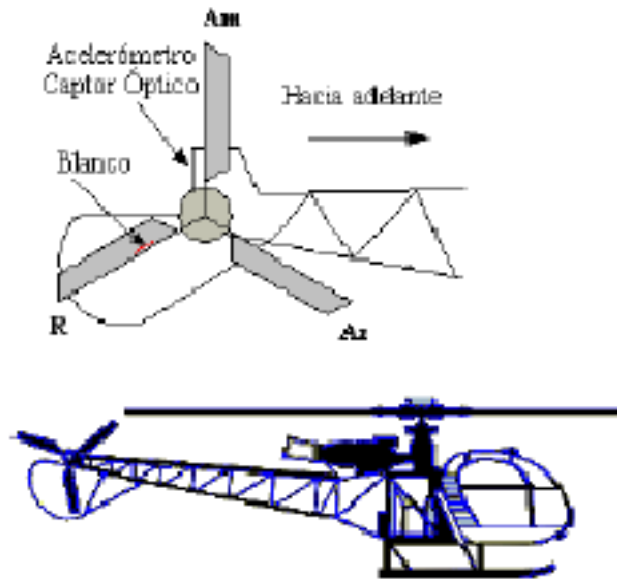
## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ENLACES

- Robinson, J. C., *P/PM Technology*, Vol. 8, 1995, N°6, pp. 47-50.
- Tandon, N. Nakra, B. C. *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 24, 1992, N°3, pp. 3-10.
- BALANC, OPERATION OF VIBRATION ANALYZER BALANCERS, Hilliard, 1986.
- SAN ANDRES ALBERTO, BALANCEO DINÁMICO DE ROTORES.
- Randon, N. Choudhury, A. *Tribology International*, Vol. 32, 1999, pp. 469-480.
- Chadwick-Helmuth Electronics, Inc, Operation and Service Instructions Tracker/Balancer, 177m-7 and Strobex blade tracker, 135M-10B.
- HWEL, Hsu, Análisis de Fourier, Tomo I, Primera Edición, Ibero América 1970, Pág 183-189.
- [www.ChadwickHelmuthProducts.com](http://www.ChadwickHelmuthProducts.com), Vibrex
- [www.ni.com](http://www.ni.com), Configuración
- [www.bannerengineering.com](http://www.bannerengineering.com)
- [www.EGM.com](http://www.EGM.com), Accelerometers \
- [www.AzimaDLI.com](http://www.AzimaDLI.com)

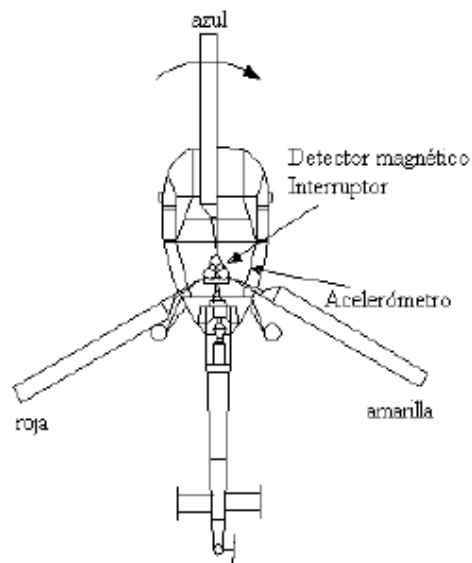
## MANUAL DEL USUARIO

En nuestro manual del usuario vamos a realizar como primer paso el conocimiento del helicóptero LAMA 315B y donde van cada uno de los sensores. (Figura a y b).

LAMA: peso = 1900Kg. aprox.



**Figura a. Sensores en rotor de cola**



**Figura b. Sensores en el rotor principal**

### **MEDIDA DE PUNTO FIJO, RÉGIMEN REGULADO.**

- Visualización del Tracking (paso de las tres palas por un mismo punto) en la punta de la pala. Desviación máxima: 6mm, 1/4" (entre las tres estelas). Volver a efectuar el ajuste en las bieletas de paso si fuera necesario. Esto para vibraciones verticales Z
- No ajustar la bieleta roja.
- Medida del 1 omega Y (Desequilibrio). 0,3 IPS máximo. Corregir si fuese necesario, esta corrección se la realiza a través de los pesos ubicados en las mangas de las tres palas.

### **COLOCACIÓN DE LOS CABLES.**

Proceder a la colocación y recorrido de los cables. Unirlos y asegurar el desplazamiento de los mandos (sin tensión excesiva en los cables en todas las configuraciones).

#### **Control de instalación.**

- Controlar el entre hierro entre el detector magnético y el interruptor.
- Efectuar una rotación manual de las palas para cerciorarse de la ausencia de interferencia mecánica.
- Controlar al desplazamiento de los mandos de vuelo.
- Controlar el recorrido y la conexión de los cables.
- Verificar el posicionamiento y el apriete de los blancos, de los soportes y de los detectores.

### **MEDIDA EN ESTACIONARIO DES (DENTRO DEL EFECTO DE SUELO).**

- Visualización del Tracking (paso de las tres palas por un mismo punto) en la punta de la pala. Desviación máxima: 6mm, 1/4" (entre las tres estelas). Volver a efectuar el ajuste en las bieletas de paso si fuera necesario. Esto para vibraciones verticales Z.

- Medida del 1 omega Y (Desequilibrio). 0.2 IPS máximo. Corregir si fuese necesario, esta corrección se la realiza a través de los pesos ubicados en las mangas de las tres palas.

**MEDIDA EN ETAPA A PMC (POTENCIA MÁXIMA CONTINUA) ALTITUD APROXIMADAMENTE 1500 PIES.**

- Visualización de los blancos para información.
- Medida de 1 omega Y (lateral) para información.
- Medida de 1 omega Z (vertical), 0.2 IPS máximo.
- Corregir en el tab T6 si fuera necesario,(según ábaco de la Fig.2.2 y método correspondiente).

**Medida en etapa de viraje de inclinación a 45 PMC (Potencia Máxima continua).**

- Visualización del tracking para información.
- Verificación de la medida 1 omega Z (vertical). 0.3 IPS máximo.
- Corregir si fuera necesario efectuando un compromiso con el retoque pedido en la PMC según el ábaco de la Fig.2.2.

**LÍMITE DE LAS ACCIONES CORRECTORAS.**

**TOLERANCIAS.**

- Tracking de las palas (paso de las palas por el mismo punto): en tierra 6 mm, estacionario 6mm.
- Bieletas de paso: sin corrección en la bieleta roja.
- Alabeo tab (movimiento del tab hacia arriba o hacia abajo):  $\pm 5$  en el tab T6, según el método indicado.

- 1 omega Y (desequilibrio): 0.2 IPS.
- 1 omega Z (vertical): Todo vuelo: 0.2 IPS. Viraje: 0.35 IPS.
- Pesos de la manga: 360 gr. máximo por manga. Una manga siempre debe permanecer sin peso.

#### **CORRESPONDENCIA DE MEDIDA.**

- Acción de biela: 1 cara aproximadamente 6 mm.
- Acción de tab: 1 aproximadamente 5 mm.

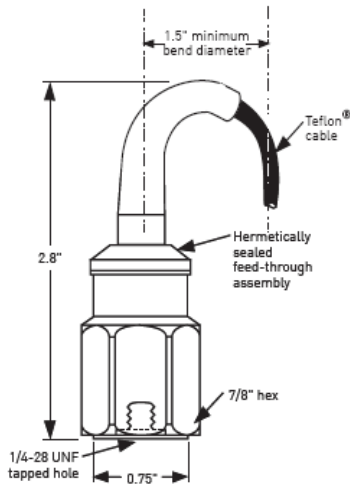
# ANEXO 1 DATOS TÉCNICOS DE ACELERÓMETRO

Wilcoxon Research



### Features

- Rugged design
- Corrosion resistant
- Hermetic seal
- Case isolated
- ESD protection
- Reverse wiring protection



## Models 786F General purpose, integral cable accelerometer

### Dynamic

Sensitivity, $\pm 5\%$ , 25 °C .....	100 mV/g
Acceleration range .....	80 g peak
Amplitude nonlinearity .....	1%
Frequency response, nominal:	
$\pm 10\%$ .....	1 - 8,000 Hz
$\pm 3$ dB .....	0.5 - 13,000 Hz
Resonance frequency .....	30 kHz
Transverse sensitivity, max. ....	5% of axial
Temperature response:	
-50°C .....	-5%
+120°C .....	+5%

### Electrical

Power requirement: voltage source .....	18 - 30 VDC
current regulating diode .....	2 - 10 mA
Electrical noise, equiv. g:	
Broadband 2.5 Hz to 25 kHz .....	700 $\mu$ g
Spectral 10 Hz .....	10 $\mu$ g/ $\sqrt$ Hz
100 Hz .....	5 $\mu$ g/ $\sqrt$ Hz
1000 Hz .....	5 $\mu$ g/ $\sqrt$ Hz
Output impedance, max .....	100 $\Omega$
Bias output voltage .....	12 VDC
Grounding .....	case isolated, internally shielded

### Environmental

Temperature range .....	-50 to 120°C
Vibration limit .....	500 g
Shock limit, min .....	5,000 g
Electromagnetic sensitivity, equiv. g, max .....	70 $\mu$ g/gauss
Sealing .....	hermetic
Base strain sensitivity, max .....	0.0002 g/ $\mu$ strain
Hydrostatic pressure .....	100 psi

### Physical

Sensing element design .....	PZT ceramic / shear
Weight .....	90 grams
Case material .....	316L stainless steel
Mounting .....	1/4 - 28 UNF tapped hole
Mating connector .....	not applicable
Integral cabling .....	J9T2A, 16 ft., blunt cut

Function	786F cable conductor
Power/signal	white
Common	black
Case	shield

Accessories supplied: sf6 mounting stud (international customers specify mounting requirements); calibration data (level 2).

Wilcoxon Research Inc  
20511 Seneca Meadows Parkway  
Germantown, MD 20876  
USA

Tel: 301 330 8811  
Fax: 301 330 8873  
Email: sensors@wilcoxon.com

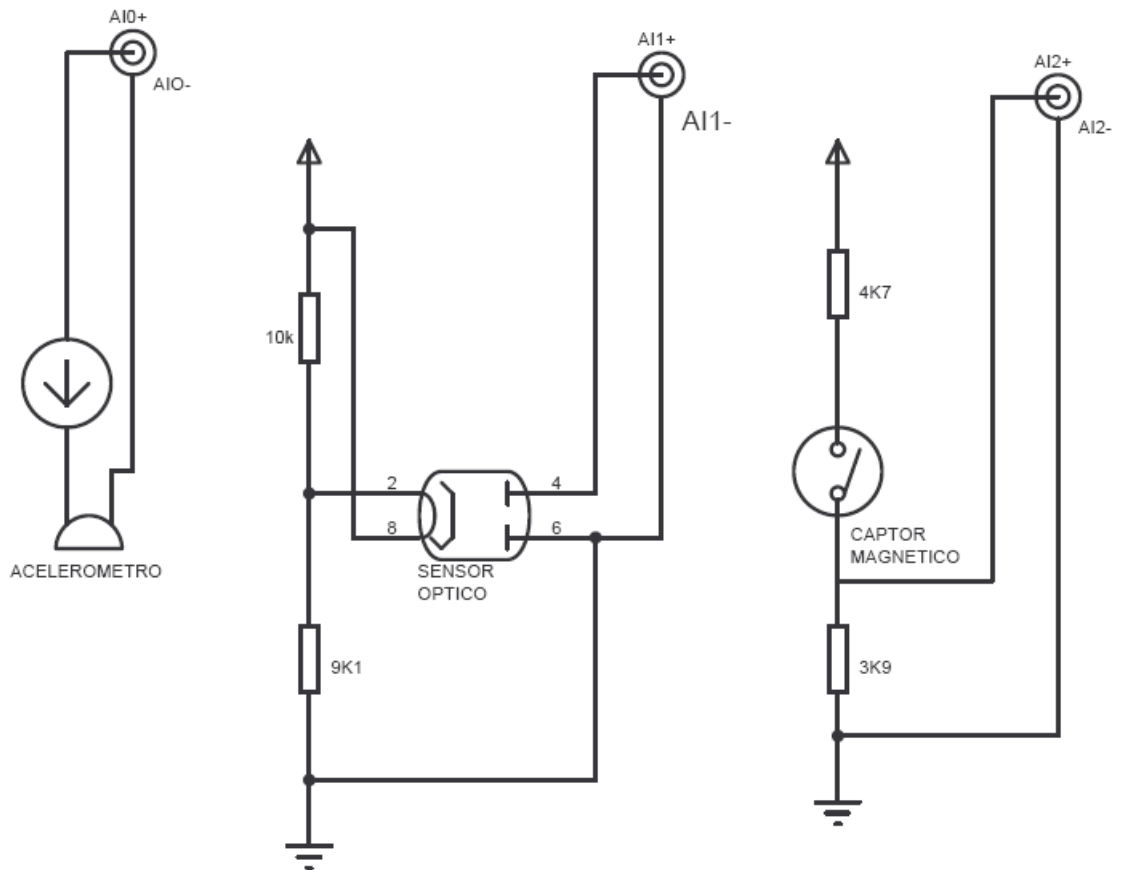
www.meggitt.com

**MEGGITT**  
smart engineering for  
extreme environments  
98504 Rev.0.2 2/07



## ANEXO 2

### CONEXIONES DE SENSORES CAPTOR MAGNÉTICO – CAPTOR ÓPTICO- ACELERÓMETRO



## ANEXO 3

### TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

#### NI USB-9234

4-Channel,  $\pm 5$  V, 51.2 kS/s per Channel, 24-Bit IEPE



- Máxima velocidad de muestreo de 51.2 kS/s por canal, entrada de  $\pm 5$  V
- Resolución de 24 bits, rango dinámico de 102 dB, filtros anti-aliasing
- Acoplamiento de AC/DC seleccionable por software, acoplado en AC (0.5 Hz)
- Acondicionamiento de señales IEPE seleccionable por software (0 o 2 mA)
- Compatibilidad con sensores inteligentes TEDS
- Transferencia de datos Hi-Speed USB y USB energizado por bus
- Más información:

- 24-bit resolution
- 102 dB dynamic range
- 4 simultaneous analog inputs
- $\pm 5$  V input range
- Antialiasing filters
- TEDS read/write

#### Recommended Software

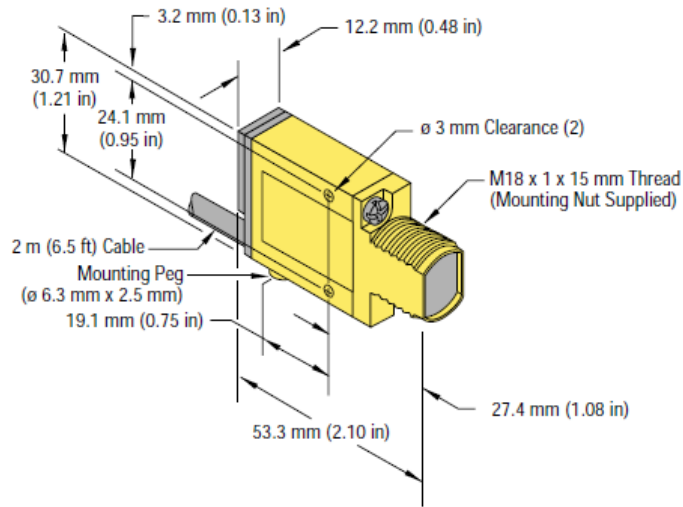
- LabVIEW
- Sound and Vibration Toolkit
- Sound and Vibration Measurement Suite

#### Supported Hardware Platforms

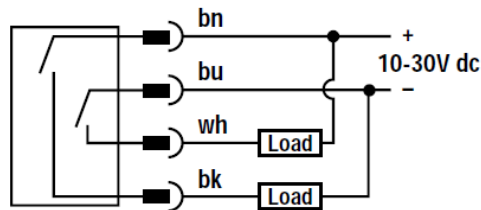
- NI CompactDAQ
- CompactRIO
- Hi-Speed USB carrier
- Wi-Fi/Ethernet carrier

## ANEXO 4 CAPTOR ÓPTICO

(ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE)



### DC Sensors with Quick Disconnect (4-Pin Euro-Style)



- Compact, modulated, self-contained retroreflective sensors for 10-30V dc operation
- Choose standard visible model for highest excess gain and greatest range, or polarized models for detection of shiny objects
  - Includes Banner's exclusive AID™ alignment system; US patent number 4356393
  - Switch-selectable for light operate or dark operate
  - Highly repeatable 1 millisecond response
  - Both sourcing and sinking outputs (150 mA max. each); continuous overload and short-circuit protected
  - Physically and elect

## ANEXO 5

### MAGNETIC PICKOFF (ESPECIFICACIÓN DEL FABRICANTE)

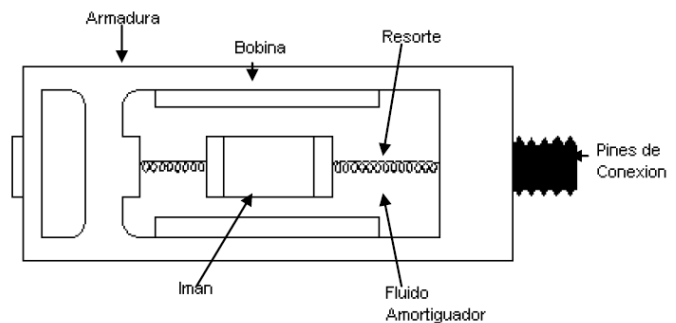
Magnetic pickoff sensors are devices which sense the rotation of the magnets in the tips or faces of the Flow Technology positive displacement flowmeter's impellers, and typically produce a low-voltage sine-wave signal whose frequency and amplitude is proportional to the rotational velocity of the impellers. The magnetic pickoff sensor acts essentially like a small generator, producing a current as lines of magnetic flux are cut. These magnetic pickoff sensors are non-powered devices.

#### 3030-S21/3030-L21

Low-drag magnetic pickoff sensor. Supplied with 12-inch integral pigtail signal cable leads. Recommended primarily where close-coupling to a transmitter or local display is required. The 3030-L21 is a longer version of the 3030-S21 pickoff.

#### 3030-HTB

Uses an amphenol quick disconnect for coupling to a separate signal cable. Recommended for operating temperatures from 250° F to 450° F (121° C to 232° C).

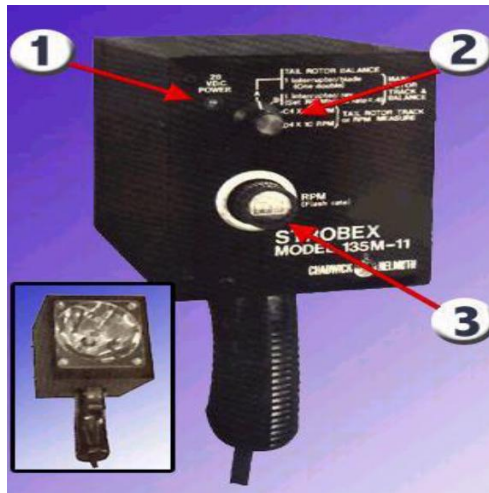


## ANEXO 6

### LÁMPARA ESTROBOSCÓPICA

La lámpara estroboscópica es utilizada para iluminar blancos reflectivos que son colocados en los extremos de las palas ya sea del rotor principal o de cola de un helicóptero, de esta manera emite una señal, de la misma se obtiene su frecuencia y por ende se obtiene la velocidad rotacional del rotor el cual es objeto de análisis.

Lámpara estroboscópica (strobex) cuenta con un gatillo el mismo que se encuentra en la manija, este activa la fuente de alimentación DC, también cuenta con un selector de 5 posiciones, un flash que emite una intensidad de luz y un dial que permite regular el número de revoluciones por minuto el mismo que ajusta la repetición del flash.



1. Indicador de fuente de alimentación on/off.
2. Selector de modos.
3. Dial regulador de RPM.

#### MODOS DE OPERACIÓN DEL STROBEX

Modo A.- el strobex opera en modo de esclavo cuando el interruptor se encuentra en esta posición, es activado por el operador, es utilizado para realizar el balanceo del rotor principal y de cola, este modo no permite la utilización del dial. También utilizado para pequeños sistemas rotacionales (solo es utilizado para helicópteros que dispongan de dos palas).

Modo B.- cuando está ubicado en este modo el strobex es utilizado para realizar la alineación del rotor principal, ya que para realizar esta labor se necesita un mayor grado de intensidad de luz, también utilizado para helicópteros con tres o más palas.

Modo C.- cuando se encuentra en esta posición el strobex es utilizado como tacómetro realizando mediciones de velocidad en RPM, por medio del dial midiendo de 100 a 1000 RPM. El modo C provee alta intensidad de luz al igual que el modo B.

Modo D.- cuando el interruptor se encuentra en este modo el strobex es utilizado para alineación del rotor principal y medición de velocidad, debe recalarse que este modo provee una baja intensidad de luz como en el modo A.

Modo E.-cuando el interruptor es colocado en esta posición el strobex puede realizar todas las labores anteriormente mencionadas en los otros modos, en este modo también se da una baja intensidad de luz.

Latacunga, Julio del 2.010

**ELABORADO POR:**

-----  
Mario Efraín Acurio Gamboa

-----  
Pepe Fernando Ibáñez Jácome

**APROBADO POR:**

-----  
Ing. Armando Álvarez S.  
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA  
ELECTRÓNICA ESPECIALIDAD INSTRUMENTACIÓN

**CERTIFICADO POR:**

-----  
Dr. Eduardo Vásquez  
SECRETARIO ACADÉMICO