

CAPITULO I

VIBRACIONES BÁSICAS DE MAQUINARIA

Un analista sin los conocimientos básicos es como una máquina mal cimentada.

Tradicionalmente, las vibraciones se han asociado con fallas en las máquinas: desgaste, funcionamiento anormal, ruido y daños estructurales. Sin embargo, en los últimos años, las vibraciones han sido usadas para ahorrar a la industria millones de dólares por paros de maquinaria. La evaluación de los cambios en los niveles de vibración de las máquinas se ha convertido en parte importante de la mayoría de los programas de mantenimiento. Evaluaciones similares se han empleado para resolver problemas de diseño, así como para establecer la causa de problemas de funcionamiento anormal y fallas crónicas.

En este capítulo se tratan los fundamentos de las vibraciones mecánicas y la forma en que se miden. Se definen las unidades y su terminología. Se enumeran las conversiones de unidades de amplitud y de frecuencia. Se explica el ángulo de fase entre distintos puntos medidos y su significado. Finalmente, se describen algunas propiedades de las máquinas.

UNIDADES DE VIBRACIÓN

Las unidades básicas utilizadas en este libro para describir las fuerzas de vibración y su movimiento son:

TABLA 1. 1

| | Parámetro | Sistema Internacional | Sistema Imperial o Inglés |
|-----------------------|-------------------------------|--|--|
| Amplitud de vibración | Desplazamiento | micrómetro Pico a Pico (μm P-P) | milésimas de pulgada Pico a Pico (mils P-P) |
| | Velocidad | milímetros/segundo Cero a Pico o rms (mm/s 0-P o rms) | pulgadas por segundo Cero a Pico o rms (ips 0-P o rms) |
| | Aceleración | metros / segundo al cuadrado Cero a Pico (m/s^2 0-P) | g 's pico o rms (1 g = 386.1 in/s^2) |
| | Masa | kilogramos (kg) | libras masa (lbm) |
| | Fuerza | Newtons (N) | libras fuerza (lbf) |
| | Frecuencia | ciclos por minuto (cpm) ciclos por segundo o Hertz (cps o Hz) radianes por segundo (rad/s) | ciclos por minuto (cpm) ciclos por segundo o Hertz (cps o Hz) radianes por segundo (rad/s) |
| | Fase o desplazamiento angular | grados sexagesimales o radianes ($^\circ$ o rad) | grados sexagesimales o radianes ($^\circ$ o rad) |
| | Velocidad de rotación | revoluciones por minuto (rpm) | revoluciones por minuto (rpm) |

Equivalencias:

$$1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$1 \text{ g} = 386.1 \text{ in/s}^2 = 32.2 \text{ ft/s}^2 = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ mil} = 0.001 \text{ in} = 25.4 \mu\text{m}$$

ips = inches per second = in/s (pulgadas / segundo)

rms = root mean square (valor cuadrático medio)

Una revolución del eje o un periodo de vibración es igual a 360°

$$1 \text{ radián} = 180^\circ/\pi = 57.2957^\circ \dots \approx 57.3^\circ$$

La Naturaleza Física de las Vibraciones

Las máquinas y estructuras vibran en respuesta a una o más fuerzas pulsantes comúnmente llamadas fuerzas de excitación. Como ejemplo, podemos mencionar el desbalance de masa o las fuerzas originadas por desalineamiento. El proceso es de causa y efecto (Figura 1.1) La magnitud de la vibración no depende solamente de la fuerza sino también de las propiedades del sistema, ambas pueden depender de la velocidad de la máquina. Las propiedades del sistema son: masa, rigidez y amortiguamiento.

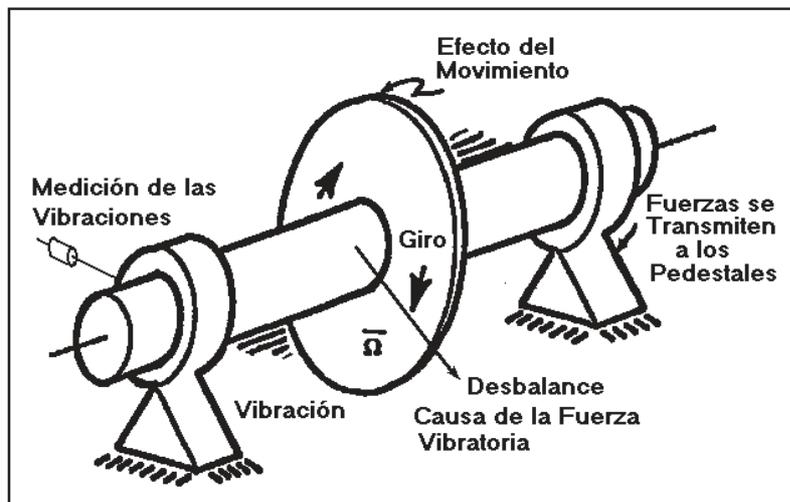


Figura 1.1. Naturaleza de la vibración de una máquina; Causa y Efecto.

La masa, es el peso dividido entre la constante gravitacional (ver figura 1.2a); La rigidez, depende de la elasticidad de los materiales del sistema y se expresa como el cociente de la fuerza por unidad de deflexión (N/m, lbf/in) La rigidez se determina aplicando una fuerza (en N o lbf) a una estructura mientras que se mide su deflexión (ver figura 1.2b); El amortiguamiento, es la

medida de la habilidad de un sistema para disipar energía vibratoria. El amortiguamiento es proporcional ya sea al desplazamiento, en caso de estructuras, o a la velocidad, en caso de amortiguadores tales como los empleados por los automóviles y cojinetes de película de aceite o cojinetes hidrodinámicos (ver figura 1.2c)

La causa de la vibración es usualmente gobernada por varios factores tales como: la operación para la cual la máquina ha sido diseñada en un proceso; tolerancias de manufactura e instalación y defectos de los componentes de la máquina debidas a manufactura y a desgaste. Las vibraciones pueden ser utilizadas para identificar defectos que se originan por diseños defectuosos, fallas de instalación y desgaste.

Movimiento Vibratorio

Existen tres características fundamentales de la vibración son: frecuencia, amplitud y fase.

La frecuencia se define por el número de ciclos o eventos por unidad de tiempo. Se expresa en ciclos por segundo o Hertz (cps o Hz), en ciclos por minuto (cpm), u órdenes de la velocidad de operación si la vibración es inducida por una fuerza a la velocidad de giro. La velocidad de operación de una máquina, así como sus velocidades críticas, se expresan en revoluciones por minuto (rpm)

El período (T), se obtiene de la forma de onda (amplitud vs. tiempo, Figura 1.3) y es el recíproco de la frecuencia ($T = 1/f$) El período se define como el tiempo requerido para completar un ciclo de vibración.

La Amplitud (A), es el valor máximo de la vibración en una cierta localidad de la máquina.

La Fase es la diferencia angular medida en grados o radianes entre vibraciones de la misma frecuencia (Figura 1.4) Esta diferencia angular también puede medirse en unidades de tiempo. En la figura 1.4 se observa que el pico de la vibración registrada en el punto B (trazo superior), ocurre en el tiempo, antes que el pico registrado en el punto A (trazo inferior) Se dice entonces, que la vibración registrada en el punto B está adelantada con respecto al punto A.

La fase puede usarse para determinar la relación en tiempo entre una fuerza de excitación y la vibración que causa; por ejemplo, la fuerza originada por desbalance de masa y la vibración que genera. Esta relación angular puede emplearse para efectuar un balanceo de la máquina.

Al movimiento que se repite a intervalos regulares, se le llama periódico (Figura 1.3) La forma de onda senoidal de la Figura 1.3 tiene un período (T) El período se mide en segundos o milisegundos (s o ms)¹ La frecuencia (f) es igual al inverso del período o $1/T$ La forma más básica del movimiento periódico es el movimiento senoidal (comúnmente llamado movimiento armónico simple) que se representa por una senoide (Figura 1.3)

¹ El periodo es medido en segundos o milisegundos [1,000 milisegundos (mseg) = 1 seg. para obtener segundos a partir de milisegundos, mover el punto decimal hacia la izquierda tres lugares o dividir entre 1,000

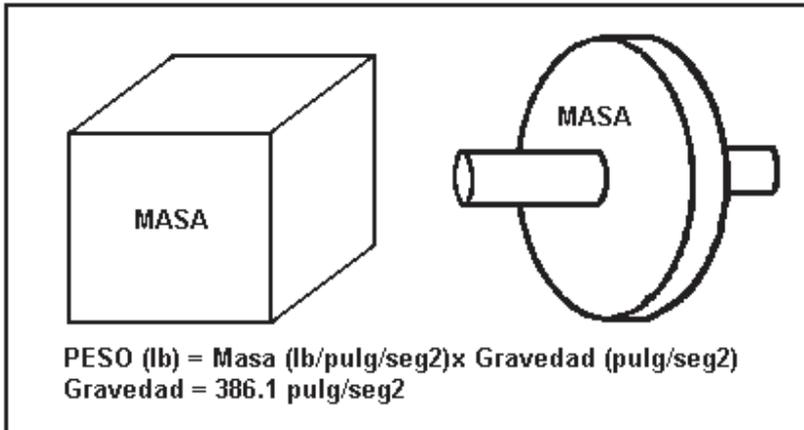


Figura 1.2a. Propiedad del Sistema: masa.

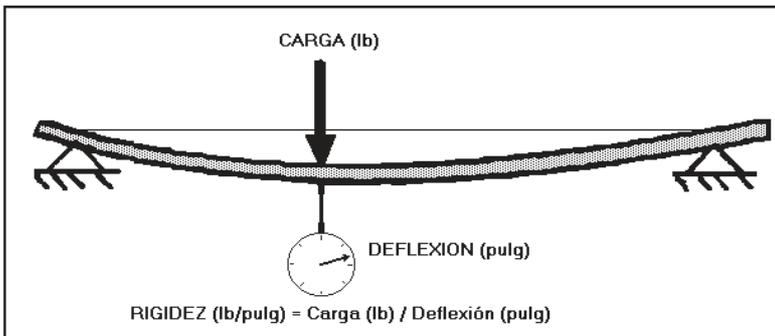


Figura 1.2b. Propiedad del Sistema: rigidez.

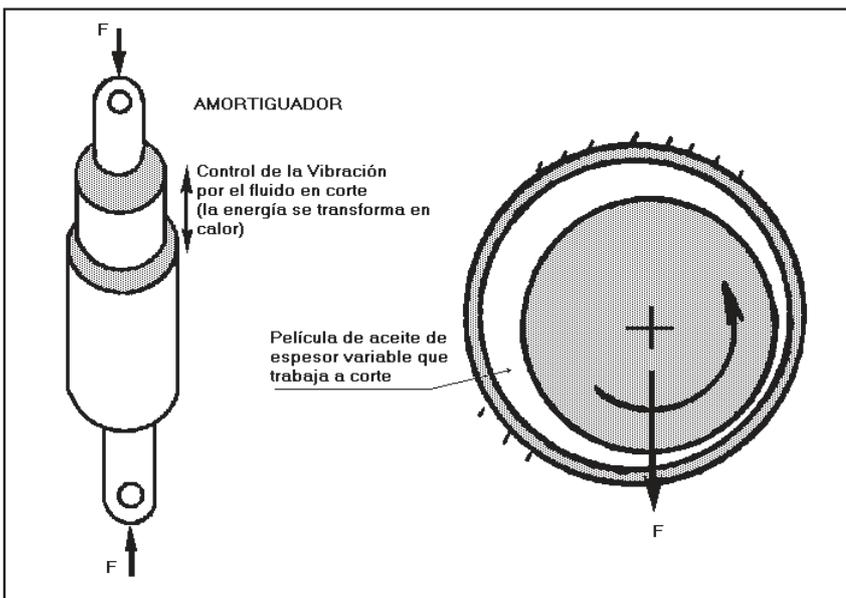


Figura 1.2c. Propiedad del Sistema: Amortiguamiento

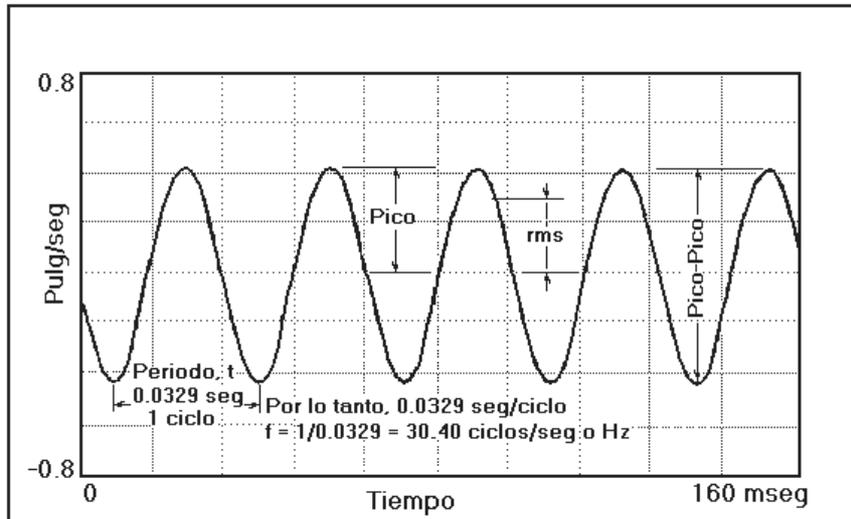


Figura 1.3. Vibración Armónica de un Rotor.

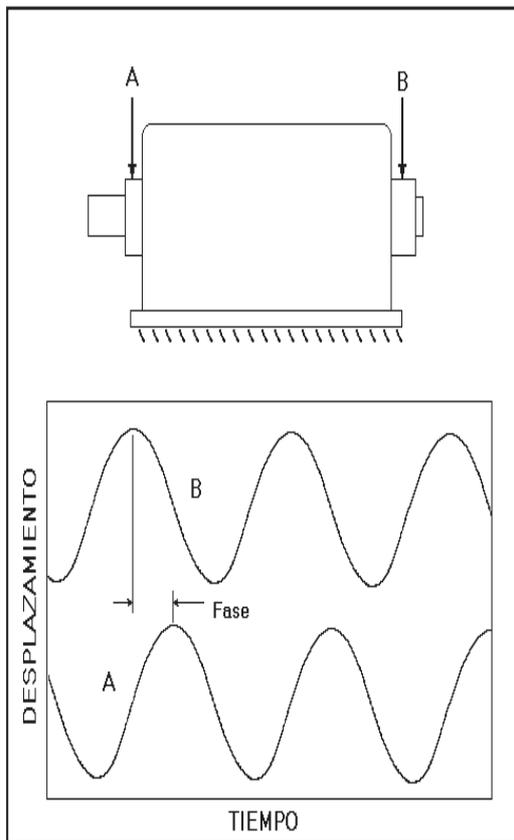


Figura 1.4. Medición del ángulo de fase

Algunos movimientos vibratorios de máquinas son armónicos simples, como ejemplo podemos mencionar la vibración de una máquina debida a desbalance de masa que ocurre a la frecuencia de la velocidad de operación. Sin embargo, la mayoría de las máquinas tienen múltiples componentes de frecuencias distintas que generan una vibración no armónica aunque sí periódica, tal como la mostrada en la Figura 1.5.

Los armónicos son múltiplos enteros (1, 2, 3, 4..) de cualquier vibración senoidal. Los órdenes son múltiplos enteros de la frecuencia de la velocidad de operación de la máquina.

La amplitud de vibración puede expresarse de varias maneras: valor cuadrático medio (rms), cero a pico (0-P) y pico a pico (P-P) ver Figuras 1.3 y 1.5: La amplitud pico a pico se mide en la forma de onda de picos adyacentes positivo y negativo. Para una señal armónica simple como la mostrada en la Figura 1.3, los valores rms o pico pueden expresarse en términos del valor pico a pico: el valor pico es igual a la mitad del valor pico a pico y, el valor rms es

igual a 0.707 el valor pico.

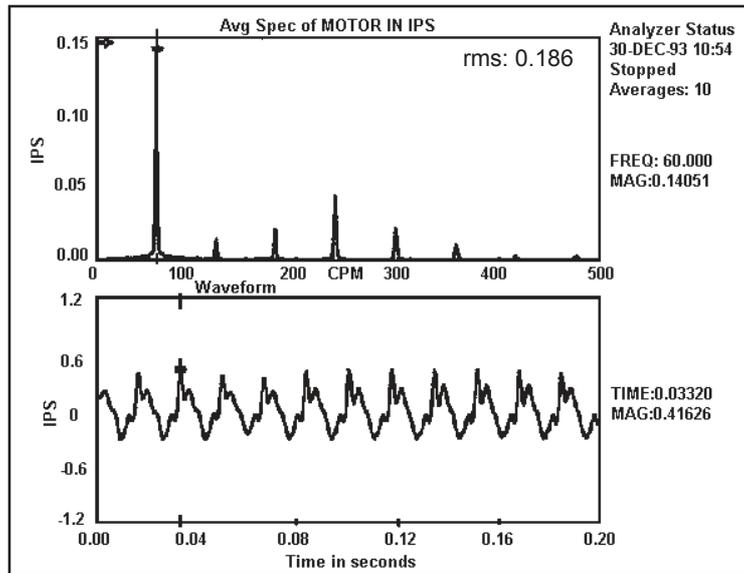


Figura 1.5. Espectro y Forma de Onda de un Motor.

Para cualquier forma de onda no armónica tal como la mostrada en la Figura 1.5, el valor rms no puede convertirse a valor pico ni viceversa. La amplitud positiva normalmente no es igual a la amplitud negativa de una forma de onda no armónica. El valor pico es el valor más grande, ya sea positivo o negativo. En general, el valor pico a pico no será igual a dos veces el valor rms. La multiplicación del valor rms por 1.414 ($1/\sqrt{2}$) no es un valor pico verdadero a menos que la vibración sea armónica; esto es, que la vibración sea de una sola frecuencia. Muchos instrumentos despliegan el valor pico como 1.414 veces el valor rms. Esto no es un valor pico verdadero a menos que la forma de onda sea senoidal. Notemos que el valor rms se relaciona con la energía de la vibración², en una máquina. Por ejemplo, el valor rms de la forma de onda mostrada en de la Figura 1.5 es de 0.186 ips y el valor pico es 0.416 ips. Notemos que al multiplicar 0.186 ips por 1.414, se obtiene un valor pico igual a de 0.263 ips. Este pico se conoce comúnmente como “pico derivado”.

El número de ciclos por unidad de tiempo es la frecuencia de la vibración y es igual al inverso del periodo:

$$T = \text{periodo, s/ciclo}$$

$$f = 1/T, \text{ ciclos/s (cps)}$$

² El valor rms puede ser definido matemáticamente por la siguiente fórmula: $A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2}(v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + v_4^2 + \dots + v_n^2)}$, donde v_i son las amplitudes pico de cada armónica que compone la vibración; n es el número de componentes. El valor rms también puede obtenerse por circuitos eléctricos analógicos especiales.

$$N = 60 \times f, \text{ ciclos / minuto (cpm)}$$

La vibración con un período de 11.899 ms (0.0119 s) tiene una frecuencia de 84.04 Hz o 5,042 cpm de acuerdo a la simple ecuación $f = 1/T$.

Parámetros empleados para medir vibraciones

Las medidas empleadas para evaluar la magnitud o cantidad de vibración en maquinase muestran en la Tabla 1.2

TABLA 1. 2

| Medida | Unidades | Descripción |
|----------------|--|---|
| Desplazamiento | μm P-P; mils P-P | Movimiento de las máquinas o estructuras, se relaciona con esfuerzo. |
| Velocidad | mm/s 0-P o rms; ips 0-P o rms | Rapidez de cambio del desplazamiento, se relaciona con fatiga. |
| Aceleración | m/s^2 0-P o rms; $\text{g}'\text{s}$ 0-P o rms | Está relacionado con las fuerzas presentes en las componentes de las máquinas |

Desplazamiento: Es la medida dominante a bajas frecuencias y se relaciona con el esfuerzo en miembros estructurales flexibles. Se expresa en μm P-P o mils P-P debido a que, generalmente, los desplazamientos de las máquinas son no armónicos y los picos positivos tienen magnitud distinta a los picos negativos. El desplazamiento se usa para medir vibraciones de baja frecuencia (inferior a 1200 cpm o 20 Hz) sobre las cubiertas de los cojinetes y en estructuras. El desplazamiento también se emplea comúnmente para medir el desplazamiento relativo de un eje y su cojinete o entre la carcasa de la máquina y el eje. En este caso, se usa a la frecuencia de velocidad de operación y a órdenes de ésta. La figura 1.6 muestra el desplazamiento y la aceleración armónicos en función de una velocidad constante de 0.2 ips en un rango de frecuencias de 10 a 1000 Hz. El desplazamiento para una velocidad de 0.2 ips a 600 cpm (10 Hz) es igual a 6.4 mils P-P, mientras que para 60,000 cpm (1,000 Hz) es igual a 0.064mils P-P. Es por lo tanto difícil medir el desplazamiento a altas frecuencias debido a las bajas amplitudes de la vibración en relación con el “ruido” de la señal.

Velocidad: Es la rapidez del cambio del desplazamiento con respecto al tiempo. Depende tanto del desplazamiento como de la frecuencia y está relacionada con la fatiga del material. Mientras más alto sea el desplazamiento y/o la frecuencia de la vibración, mayor es la severidad de vibración de una máquina en determinada localidad. La velocidad se emplea para evaluar la condición de las máquinas en un rango de frecuencia de 600 a 60,000 cpm (10 a 1,000 Hz)

Aceleración: Es la medida dominante a altas frecuencias es proporcional a la fuerza sobre una componente de una máquina, tal como un engrane y es empleada para evaluar la condición de la

máquina cuando las frecuencias exceden a 60,000 cpm (1,000 Hz) En la Figura 1.6 una vibración de 0.2 ips a 1000 Hz, es igual a una aceleración de 3.25 g's y para 0.2 ips a 600 cpm (10 Hz), la aceleración es solamente de 0.03 g's. Concluimos que la aceleración es una medida inadecuada a bajas frecuencias debido a que la amplitud de señal es baja.

Conversión entre medidas. Una ilustración gráfica de la relación entre el desplazamiento, velocidad y aceleración armónicos se observa en la Figura 1.7. Para *movimiento armónico* los valores pico del desplazamiento, velocidad y aceleración pueden calcularse empleando las relaciones

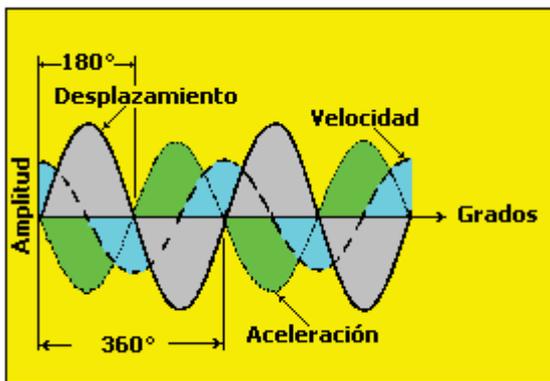


Figura 1.7. Relaciones entre el Desplazamiento, Velocidad y Aceleración. mostradas en la Tabla 1.3:

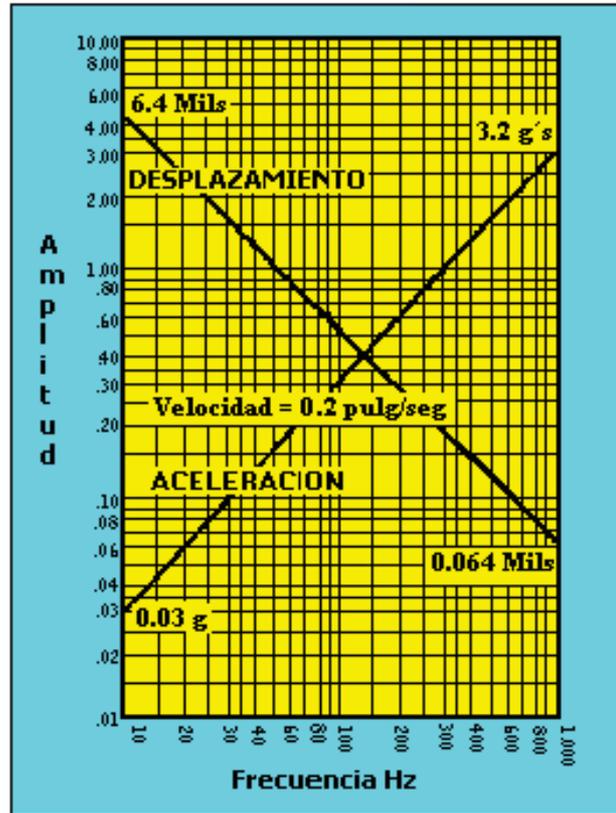


Figura 1.6. Gráfico de Desplazamiento y Aceleración para una Velocidad constante de 0.2 pulg/seg.

Tabla 1.3

| |
|--|
| Velocidad = $2\pi fD$ |
| Aceleración = $2\pi fV = (2\pi f)^2 D$ |
| D : Desplazamiento pico (Pulgadas) |
| f : Frecuencia (ciclos/s) |
| V : Velocidad (ips) |
| A : Aceleración (in/s^2) ($1 \text{ g} = 386.1 \text{ in/s}^2$) |

De acuerdo con la Figura 1.7, podemos observar que existe una diferencia angular de 90° entre el desplazamiento y la velocidad. La velocidad está adelantada con respecto al desplazamiento. Por otro lado, observamos que la diferencia angular entre el desplazamiento y la aceleración es de 180° , es decir, el pico máximo del desplazamiento ocurre medio ciclo después en el tiempo.

Ejemplo 1.1: Convertir un desplazamiento de 2 mils P-P con una frecuencia de 1,775 cpm a velocidad en ips 0- P y mm/s 0-P.

Solución:

$$2 \text{ mils P-P} = 1 \text{ mil 0-P} = 0.001 \text{ in 0-P} = 25.4 \text{ } \mu\text{m 0-P}$$

$$f = 1,775 \text{ cpm} = 1,775 \text{ ciclos/ } 60\text{s} = 29.58 \text{ cps o } 29.58\text{Hz}$$

$$\text{Velocidad} = 2\pi fD$$

$$V = 2\pi(29.58) \times 0.001 \text{ ips} = 0.186 \text{ ips 0-P}$$

La velocidad expresada en el sistema métrico es:

$$V = 0.186 \times 25.4 \text{ mm/s} = 4.72 \text{ mm/s 0-P}$$

Ejemplo 1.2: Convertir una velocidad de 0.15 ips 0-P a 6,000 Hz a aceleración en g's rms y $\text{m/s}^2 \text{ rms}$

Solución:

$$A = 2\pi fV = (2\pi f)^2 D$$

$$A = 2\pi(6,000)(0.15 \text{ in/s}^2 \text{ 0-P})$$

$$A = 5,655 \text{ in/s}^2 \text{ 0-P}$$

$$A = 5,655/386.1 = 14.65 \text{ g's 0-P}$$

$$A = (14.65) \times (0.7071) = 10.36 \text{ g's rms}$$

$$A = 10.36 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \text{ rms} = 101.6 \text{ m/s}^2 \text{ rms}$$

Con el objeto de convertir aceleración a velocidad o velocidad a desplazamiento, los términos correspondientes deben despejarse de las equivalencias mostradas en la Tabla 1.3. La velocidad puede expresarse en función de la aceleración y la frecuencia como sigue:

$$V = A/2\pi f$$

El desplazamiento puede expresarse en función de la velocidad, aceleración y frecuencia como sigue:

$$D = A/(2\pi f)^2 = V/2\pi f$$

Ejemplo 1.3: Convertir una aceleración de 0.5 g's 0-P a 1,775 cpm a desplazamiento en mils P-P y $\mu\text{m P-P}$

Solución:

$$f = 1,775 \text{ ciclos/min} (1 \text{ min} / 60 \text{ s}) = 29.58 \text{ ciclos/s} = 29.58 \text{ Hz}$$

$$D = \text{Aceleración} / (2\pi f)^2$$

$$D = 0.5 \text{ g's} (386.1 \text{ in/s}^2/\text{g}) / (2\pi \times 29.58)^2$$

$$D = 0.0056 \text{ in 0-P} = 5.6 \text{ mils 0-P}$$

$$D = 11.2 \text{ mils P-P} = 11.2 \times 25.4 \text{ } \mu\text{m P-P} = 284 \text{ } \mu\text{m P-P}$$

Ejemplo 1.4: Convertir una aceleración de 2 g's rms a 60,000 cpm (1,000 Hz) a velocidad en ips 0-P y mm/s 0-P.

Solución:

$$A = 2 (1.4142) \text{ 0-P} = 2.828 \text{ g's 0-P}$$

$$A = 2.828 \times (386.1 \text{ in/s}^2) \text{ 0-P} = 1,091.9 \text{ in/s}^2 \text{ 0-P}$$

$$V = 1,091.9 \text{ in/s}^2 \text{ 0-P} / 2\pi(1,000)$$

$$V = 0.17 \text{ in/s 0-P} = 4.41 \text{ mm/s 0-P}$$

Ejemplo 1.5: Convertir una velocidad de vibración de 0.2 ips rms a 120,000 cpm (120 kcpm o 2,000 Hz) a aceleración en g's 0-P y m/s² 0-P.

Solución:

$$f = 120,000 \text{ cpm} / 60 = 2,000 \text{ Hz}$$

$$V = 0.2 \text{ ips rms} \times (1.414) = 0.282 \text{ ips 0-P}$$

$$A = 2\pi \times (2,000 \text{ Hz}) \times (0.282 \text{ ips 0-P}) / 386.1 \text{ in/s}^2/\text{g}$$

$$A = 9.2 \text{ g's 0-P} = 9.2 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \text{ 0-P} = 90.3 \text{ m/s}^2 \text{ 0-P}$$

La medición de vibraciones

La vibración mecánica se mide con un transductor (también llamado *pick up*, captador o sensor) que convierte el movimiento vibratorio en una señal eléctrica. Las unidades de la señal eléctrica son Volts (V) o más comúnmente milivolts (mV). Hay mil mV por cada V. Para obtener V de mV, mueva el punto decimal 3 veces a la izquierda o divida entre 1000. La señal medida en V se manda a un metro, osciloscopio o analizador. La amplitud se calcula al dividir la magnitud del voltaje por el factor de escala, el cual puede estar expresado en mV/mil, mV/ips, mV/g, mV/grado, o cualquier otra relación de mV a unidades de ingeniería. La figura 1.8 es una representación esquemática de los tipos de los tipos comunes de transductores disponibles para medir la vibración en un sistema rotor – cojinetes.

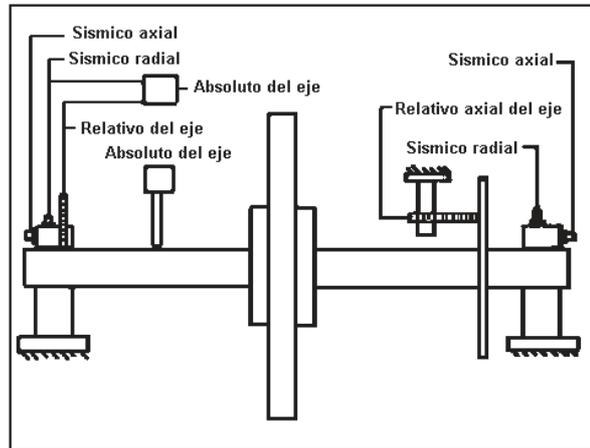


Figura 1.8. Medición de vibraciones básica: posición de los transductores.

Sensores de proximidad (proximity probes) o transductores de desplazamiento del tipo no contacto o de corrientes de eddy (corrientes de remolino)

Estos sensores se sujetan a las cubiertas de los cojinetes y miden la vibración relativa del eje con respecto al sensor. Normalmente dos sensores se montan con una diferencia angular de 90° entre ellos (Figura 1.9) El sensor “horizontal” siempre será el que se encuentre a la derecha del sensor “vertical” cuando la máquina se observe desde el lado del acoplamiento al motor. Notemos que la vibración horizontal está adelantada a la vertical por 90° cuando la rotación del eje es en sentido anti-horario.

Accesorios de contacto directo al eje (shaft rider)

En ocasiones se requiere medir la vibración absoluta del eje y para esto puede emplearse un vástago con una zapata con material antifricción que se coloca sobre el eje. (Figura 1.8)

Los transductores de velocidad

Miden la vibración absoluta de la cubierta de los cojinetes. La velocidad puede ser convertida a desplazamiento al ser integrada electrónicamente o matemáticamente por medio de un analizador de espectros.

Acelerómetros

Estos sensores miden la vibración absoluta en m/s^2 o en $g's$. La señal puede integrarse a velocidad o desplazamiento (dos integraciones), sin embargo, el ruido presente en la señal constituye un problema al tratar de integrar señales de baja frecuencia. La vibración de un eje no puede obtenerse directamente a

partir de una medida absoluta de un sensor colocado en la tapa del cojinete debido al sistema dinámico que forman el eje y el propio cojinete. Un sensor de proximidad o “shaft rider” se requieren para medir la vibración del eje³.

Un ejemplo de un registro vibratorio capturado sobre una bomba de agua vertical se muestra en la Figura 1.10. La forma de onda en mV está tomada directamente del transductor: un transductor de velocidad con una sensibilidad o factor de escala de 1,000 mV/ips. El valor pico medido fue de 934 mV, por lo tanto, la velocidad pico es igual a:

$$\text{Velocidad 0-P} = 934 \text{ mV} / 1000 \text{ mV/ips} = 0.934 \text{ ips 0-P}$$

Pueden emplearse dos transductores para determinar el ángulo de fase entre dos localidades de una máquina, sin embargo, la ubicación de cada transductor debe considerarse al momento de evaluar los datos. Los transductores axiales mostrados en la Figura 1.8 están montados con una diferencia angular de 180° por lo tanto, se deben agregar 180° a la lectura de uno de ellos.

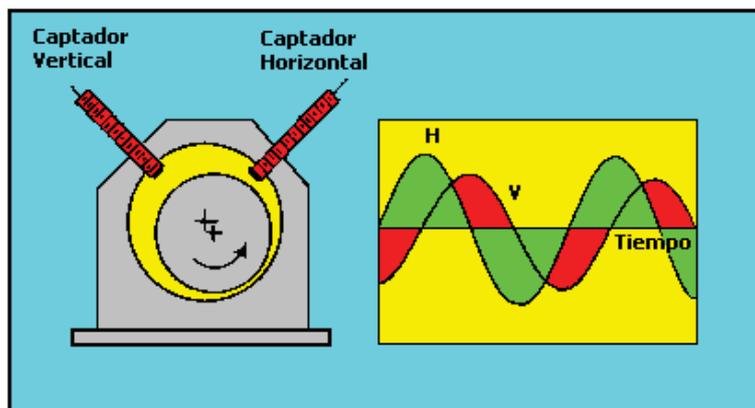


Figura 1.9a. Convención de posiciones para medición con Captadores de No Contacto.

³ Si se emplea un sensor de proximidad relativo, debe medirse el desplazamiento del punto de sujeción. Una resta electrónica de las dos señales dá como resultado el desplazamiento absoluto del eje. Empleando un “shaft rider” o “cola de pescado” sobre el eje, con un transductor de velocidad o aceleración, puede conocerse el desplazamiento absoluto del eje una vez que se ha integrado una o dos veces la señal.

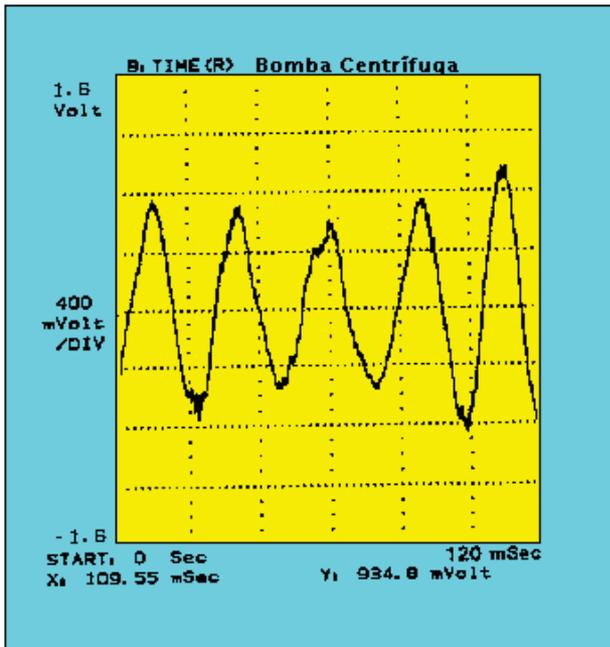


Figura 1.10. Forma de onda de una bomba con rotor desbalanceado.

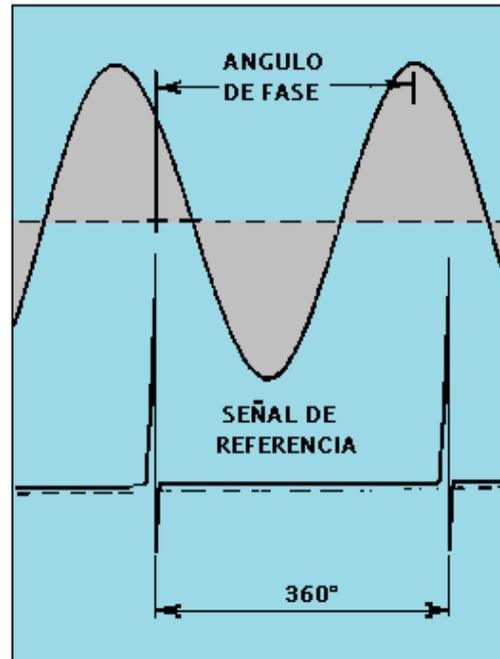


Figura 1.11. Angulo de fase con respecto a una señal de referencia

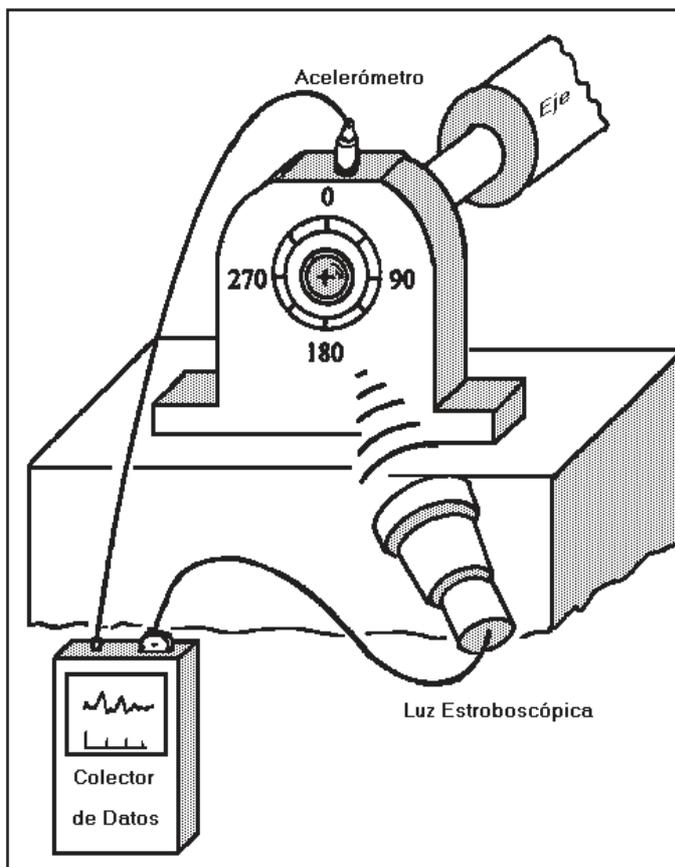


Figura 1.12. Medición del ángulo de fase utilizando una luz estroboscópica.

Medición del ángulo de fase

El ángulo de fase entre dos señales indica su relación en el tiempo. Ambas pueden representar vibración o fuerza y su relación puede indicar una condición tal como desalineamiento, la frecuencia de una velocidad crítica, o la localización del punto pesado en un rotor durante el proceso de balanceo.

El ángulo de fase puede medirse de la forma de onda (amplitud vs. tiempo) empleando un osciloscopio analógico o digital (Figura 1.4), por medio de un analizador de dos canales, medidor de fase o empleando una lámpara estroboscópica. Es esencial medir con precisión la diferencia en tiempo entre las señales para medir el ángulo de fase. En ocasiones se mide a partir de una señal de referencia generada una vez por revolución por un sensor estacionario, por ejemplo, un sensor óptico que observe una cinta reflejante o un sensor de proximidad que detecte el paso del cuñero (Figura 1.11) La señal de referencia se corresponde a una posición angular única en el eje. El ángulo de fase de la señal de vibración puede medirse con respecto a esa posición angular sobre el eje. El ángulo de fase que se relaciona con el tiempo requerido para efectuar una revolución del eje se obtiene al multiplicar 360° por la diferencia en tiempo de los dos eventos (señal de referencia y pico de la vibración) y al dividir entre el período de la vibración. Este ángulo de fase se mide en forma automática por los analizadores empleados para el balanceo.

El ángulo de fase también puede medirse con una lámpara estroboscópica (Figura 1.12) el disparo de la lámpara se efectúa al cruce por 0 de la señal de vibración, es decir, cuando el voltaje cambia de negativo a positivo. Al realizarse el disparo luminoso se visualiza una marca arbitraria colocada en el eje y puede medirse su posición con respecto a una escala graduada colocada en el cojinete o una parte estacionaria del equipo.

El ángulo de fase en diferentes posiciones puede medirse al reubicar el sensor de vibración sobre la máquina.

Análisis de Vibraciones

Un movimiento periódico puede descomponerse en una serie de movimientos armónicos. La vibración periódica mostrada en Figura 1.13 puede representarse como la suma de dos vibraciones armónicas (trazos 1 y 2) $1X$ y $2X$.

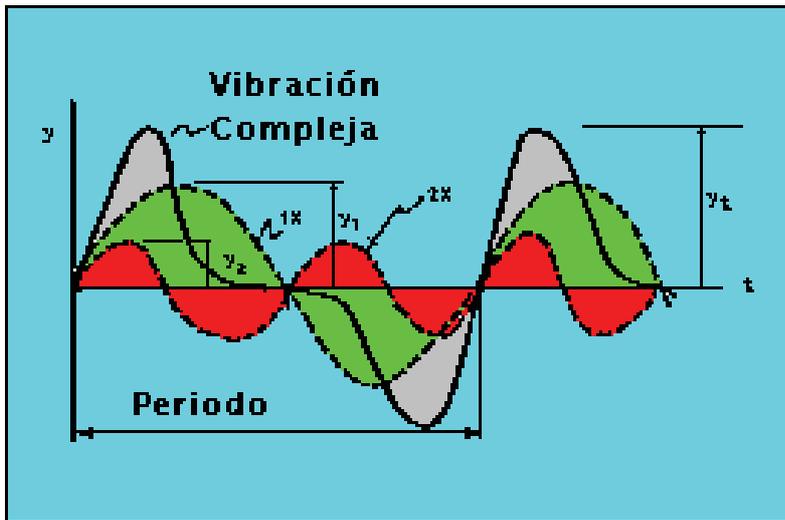


Figura 1.13. Armónicas componentes de un movimiento periódico complejo.

Notemos que la vibración a 2X tiene una frecuencia igual a dos veces la vibración a 1X. La vibración a 2X se denomina “segundo armónico de la vibración a 1X” debido a que su frecuencia es exactamente dos veces la de la vibración a 1X. Cuando la frecuencia a 1X corresponde con la velocidad de giro de la máquina, la vibración a 2X se llama “vibración de 2º orden”

El movimiento periódico tiene una forma específica cuando las dos componentes están en fase como se muestra la Figura 1.13. Si la fase de las dos componentes se cambia, la magnitud del pico de la vibración, esto es, la amplitud, cambiará. En general, la suma de las amplitudes individuales no es igual al valor pico de la forma de onda periódica total. La suma de los picos de las amplitudes 1 y 2, serán iguales al pico total de la vibración sólo cuando la componente fundamental (1X) esté adelantada a la componente de 2º orden (2X) por 45º o 225º. Cualquier otra relación angular resultará en un pico total menor que la suma individual de sus componentes.

La amplitud y la frecuencia de las componentes que constituyen una forma de onda se muestran directamente en el espectro de frecuencias (ver Figura 1.14, trazo superior) En este gráfica se despliega amplitud vs. frecuencia. La descomposición de una forma de onda periódica compleja en sus componentes de frecuencia se muestra en la figura 1.15. El espectro muestra la descomposición de la forma de onda en las componentes armónicas que la constituyen. Las amplitudes de las armónicas mostradas en el espectro se obtuvieron por medio de un “analyzer de espectros”. La forma de onda no puede reconstruirse a partir de este espectro de frecuencia a menos que el ángulo de fase de cada componente armónica se conozca.

Un analizador FFT utiliza un bloque de datos capturados durante un tiempo determinado y relacionado a un rango de frecuencia seleccionado antes del procesamiento de los datos. Una computadora digital que contenga un algoritmo (un procedimiento matemático definido) lleva a cabo la transformada rápida de Fourier (FFT) El analizador FFT despliega las componentes de la vibración

en celdas (bins) o líneas (típicamente 400 y múltiplos de este valor), igualmente espaciadas en un rango de frecuencias. Las celdas pueden ser consideradas como una serie de filtros.

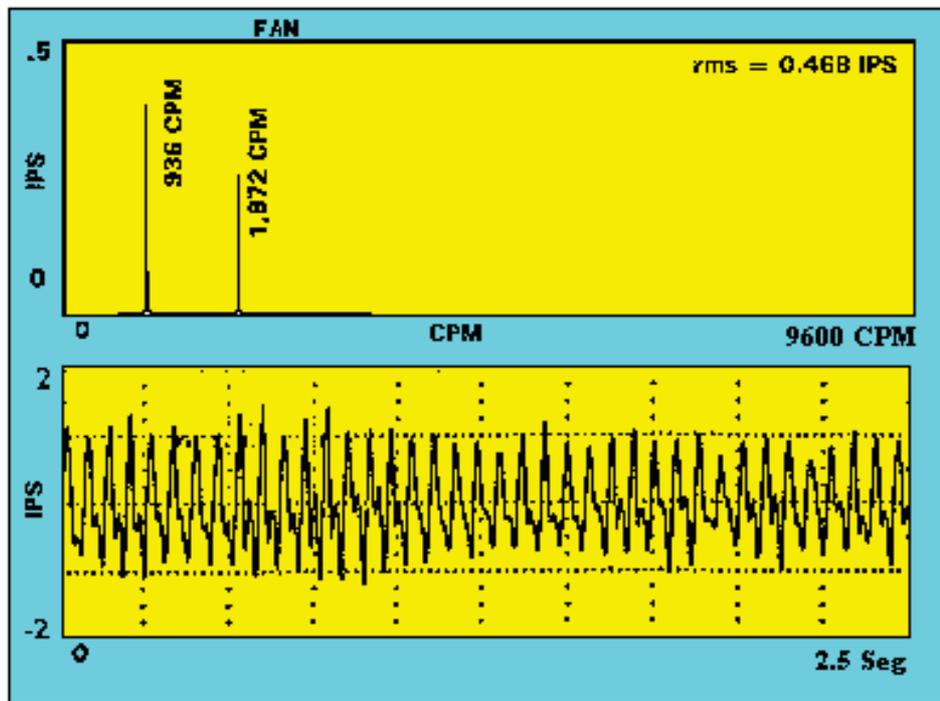


Figura 1.14. El espectro de frecuencias y su relación con la forma de la onda compleja.

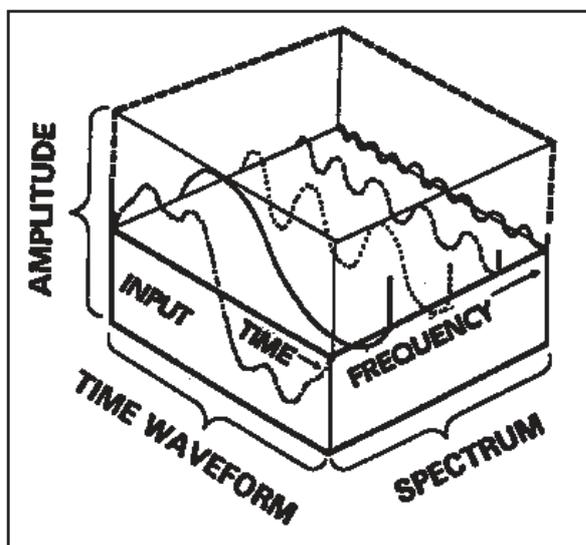


Figura 1.15. Análisis de la forma de onda.

Excitación

El propósito del análisis de vibraciones es identificar defectos y evaluar la condición de operación de las máquinas. Las frecuencias se usan para relacionar las fallas de las máquinas con las fuerzas que causan la vibración. Es por lo tanto importante identificar las frecuencias de las componentes de la máquina y sus sistemas antes de realizar el análisis de vibraciones. Las fuerzas generalmente son el resultado de defectos o desgaste de las componentes de la máquina o son debidas al diseño del equipo o a problemas de instalación tales como el desalineamiento, pata coja o floja, solturas o

flojedad, etcétera. La tabla 1.4 muestra una lista de algunas frecuencias de excitación comúnmente asociadas con máquinas; Es importante identificar la velocidad de operación del equipo antes de proceder con el análisis de las vibraciones, debido a que las fuentes de vibración se relacionan con su velocidad de operación.

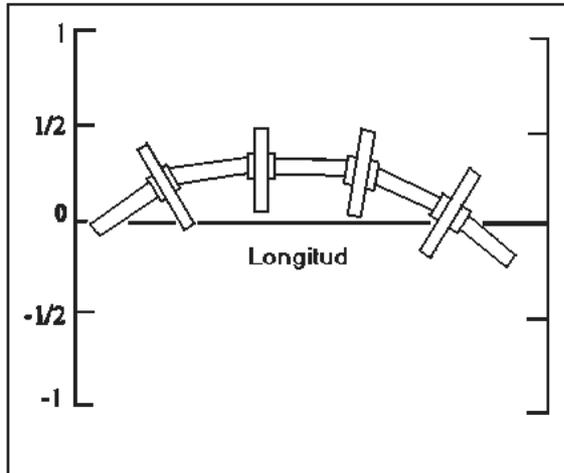


Figura 1.16.
Forma modal de un rotor flexible.

Frecuencias Naturales, Formas Modales y Velocidades Críticas

Las frecuencias naturales se determinan por el diseño de una máquina o de un componente. Son propiedades del sistema y dependen de la distribución de la masa y de la rigidez (ver figura 1.2). Cada sistema tiene un número de frecuencias naturales, las que no son, sin embargo, múltiplos de la primer frecuencia natural (excepto casos raros de componentes simples) Las Frecuencias Naturales no son importantes en el diagnóstico de falla de una máquina a menos que una frecuencia excitadora se

ubique cerca de una frecuencia natural o que ocurran impactos en la máquina. Si una frecuencia excitadora es cercana a una frecuencia natural, se presenta una resonancia y los niveles de vibración son elevados debido a que la máquina absorbe energía con facilidad a sus frecuencias naturales. Si la frecuencia de excitación es un orden de la velocidad de operación de la máquina, se conoce como velocidad crítica. Solamente las frecuencias naturales que están dentro del rango de frecuencias excitación son de interés para el análisis de las vibraciones de las máquinas.

Tabla 1. 4 Algunas frecuencias de excitación asociadas a máquinas

| <u>Fuente</u> | Frecuencias (múltiplos de la velocidad de giro) |
|---|---|
| <i>Inducidas por fallas</i> | |
| Desbalance de masa | 1X |
| Desalineamiento | 1X, 2X |
| Eje flexionado | 1X |
| Soltura o flojedad mecánica | Armónicas impares de 1X |
| Distorsión de carcasa, cimentación o base | 1X |
| Rodamientos antifricción | Frecuencias características, no son armónicas de la velocidad de giro |
| Impactos y mecanismos de impacto | Múltiples frecuencias, dependen de la forma de onda |
| <i>Inducidas por diseño</i> | |
| Juntas universales | 2X |
| Ejes asimétricos | 2X |
| Engrane (n dientes) | nX |
| Coples (m mordazas) | mX |
| Remolino de aceite | 0.43X a 0.47X |
| Álabes y aspas (m) | mX |
| Máquinas reciprocantes | 1/2 y múltiples armónicas de la velocidad de giro, depende del diseño |

Las formas modales de un sistema se asocian con sus frecuencias naturales. La forma que asume un sistema al vibrar a una frecuencia natural se llama “forma modal”. Una forma modal no proporciona información sobre el movimiento absoluto del sistema, sino que consiste en deflexiones en puntos seleccionados. Las deflexiones se determinan con relación a un punto fijo en el sistema, normalmente ubicado en uno de los extremos del eje. El movimiento absoluto puede determinarse únicamente cuando las fuerzas de vibración y amortiguamiento se conocen. Un ejemplo de forma modal de un rotor flexible se muestra en la figura 1.16. Los modos de rotores rígidos se determinan por la flexibilidad de los cojinetes. Los rotores flexibles pueden vibrar en modos con movimiento lateral, torsional y axial. La forma modal en donde el movimiento es nulo se conoce como un “nodo”. Obviamente los transductores no deben montarse cerca o en un nodo.

RESUMEN DE LA TEORÍA BÁSICA DE VIBRACIONES

Las tres características importantes de la vibración son: frecuencia, amplitud y fase.

La frecuencia es el número de ciclos por unidad de tiempo.

El período es el tiempo requerido por un ciclo de vibración y es el recíproco de la frecuencia.

La amplitud es el máximo valor de vibración en una localidad dada de una máquina. Para el desplazamiento se expresa en μm o mils; para velocidad en mm/s o ips (inches per second); para la aceleración en m/s^2 o g's.

La amplitud de vibración se expresa en unidades de cero a pico (0-P), pico a pico (P-P), o rms (root mean square, valor cuadrático medio)

El valor cero a pico y rms se emplean con velocidad y aceleración. El valor de desplazamiento se expresa en amplitud pico a pico.

Las medidas de vibración -desplazamiento (esfuerzo), velocidad (fatiga), aceleración (fuerza)- pueden convertirse una a otra si la vibración es de una sola frecuencia (armónicos)

El ángulo de fase es la relación en tiempo entre vibraciones y/o fuerzas de la misma frecuencia.

Una fuerza o frecuencia de excitación causa vibración. La vibración siempre está retrasada con respecto a la fuerza que la genera.

Las fuerzas vibratorias se generan por variables de procesos, diseño inadecuado, mala instalación y defectos en la fabricación o desgaste.

Las vibraciones se analizan por medio de formas de onda y en el espectro de frecuencias.

Las frecuencias naturales son una propiedad del sistema mecánico y dependen de la masa y de la rigidez.

La resonancia ocurre cuando la frecuencia de una fuerza de excitación es igual o cercana a una frecuencia natural.

Una velocidad crítica es una resonancia especial en una máquina rotatoria.

La vibración se amplifica en la resonancia.