



Universidad de Chile  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería Mecánica

Informe Final ME69E

# 'Detección de daño en motores eléctricos por medio de las vibraciones'

Alumno: David Espejo Canales  
Profesor Guía: Rodrigo Pascual J.  
Profesor Co-Guía: Marcelo Elgueta  
Profesor Integrante: Rodrigo Hernández

2002

# Resumen

El interés por el estudio de las máquinas rotatorias y su comportamiento bajo condiciones de operación controlada, crece cada vez más con la necesidad de la industria de mantener una buena condición de producción.

Este trabajo tiene como objetivo crear un método de detección de falla en motores eléctricos trifásicos, que son de amplio uso en muchas industrias de diversos rubros.

Este método se desarrollará con motores escogidos para montar en un sistema de pruebas. Un motor estará en perfecto estado (como viene de fábrica), y otro estará con fallas introducidas con objeto del estudio.

En la parte experimental se tomarán espectros de vibración de los dos motores de prueba, y se espera poder identificar los picos correspondientes a las fallas introducidas. Para esto será necesario filtrar los modos propios de vibración de la bomba hidráulica escogida como carga de estos motores.

El trabajo teórico contempla desarrollar modelos matemáticos para explicar el comportamiento del sistema en los casos en que se encuentre con el motor en buen estado y, con el motor en mal estado. En ambos casos será necesario validar los modelos con los datos experimentales.

El trabajo se enmarca en el proyecto de laboratorio de sólidos de Mecsup I, que es donde se llevarán a cabo las experiencias prácticas.

# Nomenclatura

$M$	Matriz de masa e inercias
$C$	Matriz de Amortiguamiento
$G$	Matriz de efectos giroscópico
$\Omega$	Velocidad de giro del rotor
$x$	Vector de posición
$\dot{x}$	Vector de velocidad
$\ddot{x}$	Vector de aceleraciones
$V$	Energía potencial
$K$	Energía cinética
$L$	Lagrangiano
$\omega_i$	Frecuencia natural ( $i : 1..n$ con $n$ grados de libertad)
$f$	frecuencia (usualmente de muestreo)
$f_L$	frecuencia de línea (50 Hz)
$f_{pr}$	frecuencia de paso de las ranuras (motores)

# Índice

<b>1. Antecedentes generales</b>	<b>1</b>
1.1. Conceptos Básicos . . . . .	1
1.2. Técnicas de muestreo . . . . .	2
1.3. Fuentes de error y problemas en la medición . . . . .	3
1.4. Introducción al motor trifásico . . . . .	5
1.5. Introducción a la bomba centrífuga . . . . .	6

# Índice de figuras

1.1. Efecto aliasing en una señal cualquiera . . . . .	4
1.2. Motor trifásico . . . . .	5
1.3. Espectro del motor trifásico . . . . .	6
1.4. Espectro producido por la cavitación . . . . .	7

# Capítulo 1

## Antecedentes generales

### 1.1. Conceptos Básicos

#### Ecuación de movimiento:

La ecuación de movimiento para sistemas rotores según el Método de Rayleigh-Ritz, toma la forma general de la ecuación 1.1:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \Omega\mathbf{G}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f} \quad (1.1)$$

Para llegar a esta ecuación se debe plantear el lagrangiano (Ec. 1.2) del sistema rotor que se está analizando, distinguiendo los términos de energía potencia ( $V$ ) y cinética ( $K$ ). La ecuación de Lagrange (Ec. 1.3) se separa término a término para preparar la notación matricial del problema, y hacerla más manejable por los algoritmos que utilizan los programas computacionales.

$$L = T - V \quad (1.2)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_{q_i} \quad (1.3)$$

donde  $q_i$  representa al vector de coordenadas generalizadas del sistema, y  $Q_{q_i}$  las componentes de forzaje o fuerzas externas al sistema.

Si se trabaja por el método de elementos finitos, se emplea directamente la ecuación de Lagrange (Ec. 1.3) para resolver el sistema.

**Frecuencia Natural:**

Se define frecuencia natural como la frecuencia de rotación en la cual se producen grandes amplitudes. En la ecuación 1.1 se despejan haciendo tender el vector de coordenadas a infinito, por medio de manejo matricial, y despejando  $\omega_i = \Omega_{critico}$ . Existen también frecuencias naturales asociadas a las rotaciones, que dependen de la velocidad de giro del rotor. En general, existen tantas frecuencias naturales como grados de libertad tiene el sistema.

**Transformada de Fourier:**

La Transformada de Fourier de una señal  $x(t)$  se define como:

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1.4)$$

La Transformada de Fourier nos entrega el espectro complejo de  $x(t)$ .  $X(\nu)$  y  $x(t)$  representan la misma observación física en espacios diferentes. Para  $x(t)$  la señal se desplaza en el espacio amplitud-tiempo, mientras que para  $X(\nu)$  se desplaza en el plano amplitud compleja-frecuencia. Es importante destacar que ambas funciones son complementarias, de manera que una señal localizada en el plano de Fourier, corresponderá a una señal totalmente no-localizada en el plano temporal, y viceversa. Se define también la transformada de Fourier Inversa:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (1.5)$$

Para la existencia de la Transformada de Fourier, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- $x(t)$  sea acotada.
- $\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|dt$  sea finito
- $x(t)$  debe tener un número finito de discontinuidades.

**1.2. Técnicas de muestreo**

A continuación se describen brevemente varias técnicas de análisis de señales. Posiblemente más adelante en la memoria se hará una extensión de la descripción con fin de hacer más claro el procedimiento.

**Análisis frecuencial:**

Es la técnica más comúnmente usada, y consiste en obtener el espectro de frecuencias de una señal para identificar sus picos y regiones de frecuencia con grandes amplitudes.

**Análisis de la función de onda en el tiempo:**

En este análisis es muy difícil hacer conclusiones sobre la naturaleza del sistema analizado. Sirve para identificar impactos, discontinuidades y periodicidad, entre otros fenómenos.

**Análisis de fase de vibraciones:**

Usualmente se usa como referencia para determinar el desfase a la frecuencia  $1x$ . Sirve principalmente para identificar resonancias, pues se produce un cambio de fase en  $180^\circ$ .

**Análisis con promedios sincrónicos en el tiempo:**

Esta técnica consiste en promediar muchas series de datos, tomando como referencia una onda característica de la rotación. De esta manera se elimina cualquier onda periódica asincrónica que pudiera estar ensuciando la señal muestreada. El mayor inconveniente es que pudiera ocultar componentes de algún interés.

**Análisis de orbitas:**

Esta técnica es útil al momento de identificar fallas como desalineamiento, roces o solturas. También permite identificar el tipo de giro que comanda un estado del rotor y asimetrías no detectadas.

**Análisis de vibraciones en partidas y paradas:**

Este análisis tiene como objeto el hacer un seguimiento del sistema cuando, durante la aceleración, pasa por una resonancia.

### **1.3. Fuentes de error y problemas en la medición**

A continuación se listan algunos de los problemas más frecuentes e interesantes de mencionar.

**Aliasing:**

Se conoce al problema de aliasing el confundir una señal de alta frecuencia con otra de baja frecuencia. El problema de aliasing viene dado por una mala elección del paso frecuencial de muestreo  $T$ , que no permitiría diferenciar una frecuencia de otra, tal como se muestra en la figura 1.1.

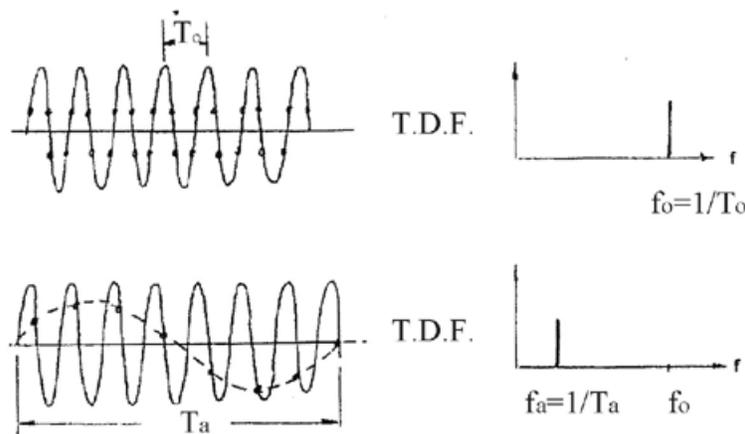


Figura 1.1: Efecto aliasing en una señal cualquiera

Para solucionar este problema hay que tomar dos medidas:

- Aplicar una frecuencia de muestreo que cumpla con la condición:

$$f_{\text{muestreo}} > \lambda f_{\text{max}} \quad (1.6)$$

donde  $\lambda$  es mayor que dos (usualmente  $\lambda = 2,56$ ).

- Aplicar un filtro pasa-bajos, o anti-aliasing, que extraiga las componentes mayores a  $f_{\text{max}}$ .

**Ruido:**

En una toma de señales o muestreo de datos a altas frecuencias siempre existirá ruido. La mejor manera de combatir este problema es identificando tantas fuentes de ruido como se pueda, para luego implementar soluciones para filtrarles. Aun así siempre estará en problema de interferencia entre componentes de una sistema, o modos de vibración asincrónicos con el muestreo.

**Efecto Fuga y ventanas:**

Durante el muestreo de datos, al tener un periodo finito de toma de muestra, se pueden crear discontinuidades en los extremos de las series de datos. Estas discontinuidades son conocidas como efecto fuga. Para solucionar este problema es necesario aplicar una ventana de medición con forma preferentemente sinusoidal, y a una fracción entera de la frecuencia de la señal medida. Estas condiciones son para fines de la transformada de Fourier.

## 1.4. Introducción al motor trifásico

Los componentes típicos para motores eléctricos trifásicos se muestra en la figura 1.2. Se puede observar que el rotor posee ranuras en su cuerpo. Estas ranuras en general generan un flujo y fuerzas variables sobre la estructura magnética. La inclinación en estas ranuras ayuda a reducir las fuerzas generadas.

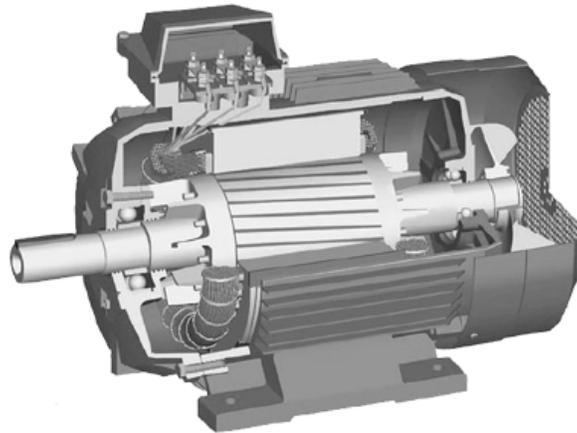


Figura 1.2: Motor trifásico

**Vibraciones típicas:**

Los motores generan una vibración inherentes a ellos a la frecuencia de paso de las ranuras ( $f_{pr}$ , con  $f_{pr} = RPM \times \text{número de ranuras}$ ), con pequeñas bandas laterales a  $2 f_L$  en torno a ella, tal como se muestra en la figura 1.3.

A parte de la figura 1.3, se pueden identificar picos que se relacionan a problemas conocidos en este tipo de motores (excentricidades, solturas, etc.). En este trabajo se introducirán



Figura 1.3: Picos típicos en el espectro de vibración de un motor trifásico

fallas de tipo eléctrico y mecánico a los motores de prueba, y se espera encontrar los picos característicos en el espectro.

## 1.5. Introducción a la bomba centrífuga

Este tipo de maquinaria se encuentra muy frecuentemente en plantas industriales, de ahí en interés por su estudio.

A continuación se destacan los conceptos básicos de interés para el desarrollo de este trabajo.

### Operación eficiente:

La operación de la bomba en su rango de mayor eficiencia sería la ideal para evitar problemas (fuerzas radiales no deseadas) y reducir las mantenciones. Las curvas de eficiencia siempre son dadas por el proveedor. Sin embargo, generalmente la bomba no trabaja en su rango óptimo de operación, y surgen problemas de diversas fuentes.

En este trabajo se regulará el lugar de operación de la bomba con una estrangulación a la salida de ésta, pues es más fácil implementarlo, y es el tipo de freno más usado.

### Fuentes de vibración típicas:

El número de álabes del impulsor de la bomba ( $N$ ), deja ver en el espectro una componente a  $Nx$ .

La recirculación puede ser un problema cuando el freno de la bomba es aplicado sin medida.

La recirculación puede producir componentes extrañas en el espectro.

Por otro lado, el largo de las cañerías puede ocasionar problemas si éste coincide con un múltiplo de la velocidad/frecuencia de operación.

El fenómeno de desbalanceamiento hidráulico es otra fuente de vibración. Éste consiste en

una fuerza rotatoria sincrónica con la velocidad de giro. Generalmente se debe a pequeños errores geométricos y a una no exacta concetricidad de los trayectos hidráulicos con el ojo del impulsor. Puede deberse también a una desigual distribución del fluido de trabajo en el impulsor. Esta fuerza genera una vibración a 1x, similar al desbalanceamiento de masas.

### Cavitación y turbulencia:

La cavitación es la formación de burbujas de vapor en la bomba, y es producida cuando la presión cae a menor valor que la presión de vaporización del fluido de trabajo.

La formación y destrucción de las burbujas producidas por este fenómeno forman un tren de impactos que, en suma, tiene considerable energía.

Estos impactos generan una vibración aleatoria de banda ancha, como se ilustra en la figura 1.4. Esta señal puede ser reducida utilizando promedios sincrónicos en el tiempo. El real problema es que causa mucho daño a la estructura de la bomba. La turbulencia por su

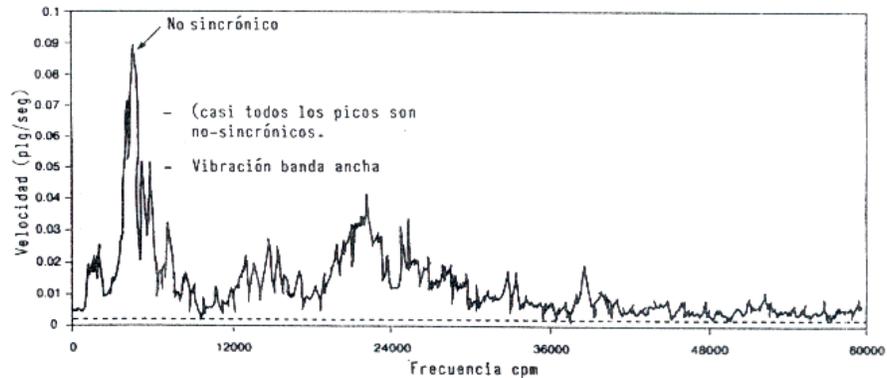


Figura 1.4: Espectro producido por la cavitación

parte produce un espectro similar al de la cavitación, pero de banda angosta y con picos importantes a velocidad inferior a 1x. La turbulencia es producida por un mal diseño en el sistema de cañerías de la bomba, y generalmente no es excitada.