

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

Informe de Avance ME69E

“Detección de daño en motores eléctricos por  
medio de las vibraciones”

Alumno: David Espejo Canales  
Profesor Guía: Rodrigo Pascual J.

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 Mecesus 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)

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Introducción al tema . . . . .	2
<b>2. Objetivos</b>	<b>4</b>
<b>3. Antecedentes generales</b>	<b>5</b>
3.1. Conceptos Básicos . . . . .	5
3.2. Técnicas de muestreo . . . . .	6
3.3. Fuentes de error y problemas en la medición . . . . .	7
<b>4. Montaje experimental</b>	<b>10</b>
4.1. Diseño . . . . .	10
4.2. Componentes involucrados en el diseño . . . . .	11
4.3. Consideraciones generales . . . . .	11
4.4. Modelo de diseño . . . . .	13
<b>5. Planificación y metodología</b>	<b>15</b>
5.1. Planificación . . . . .	15
5.2. Metodología . . . . .	15
<b>6. Recursos</b>	<b>18</b>
6.1. Recursos no financieros . . . . .	18
6.2. Recursos financieros . . . . .	19
<b>7. Comentarios</b>	<b>20</b>

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

La motivación primera de iniciar un trabajo de investigación y desarrollo como el planteado en este informe, es el de optar al título de ingeniero mecánico.

También existe el interés personal del alumno sobre el tema a desarrollar, por las áreas que este abarca y por la oportunidad de llevara a cabo el diseño y montaje de una parte experimental para corroborar resultados.

Las áreas de mantención predictiva por medio de análisis de vibraciones y los métodos de análisis de señales y vibraciones son de gran potencial dentro del campo trabajo del ingeniero mecánico, y muy bien cotizados dentro de empresas que desean maximizar sus utilidades aumentando la confiabilidad de sus líneas productivas.

En este trabajo se desarrolla el estudio de falla de un motor eléctrico acoplado a una bomba hidráulica. Estos equipos (y sus similares) son de amplio uso en todo tipo de industrias. De ahí la elección de estos equipos como objeto de estudio.

El trabajo presentado a continuación pretende ser desarrollado durante el periodo que dura el curso ME69F.

## 1.2. Introducción al tema

El interés acerca del estudio de las máquinas rotatorias parte por lo catastrófico de las consecuencias de las fallas en estos sistemas, desde el punto de vista de continuidad de producción y, de la seguridad de las personas que operan la maquinaria.

La particularidad de las máquinas rotatorias radica en la condición de que siempre están sometidas a un desbalance, ya sea por falta de ajustes o por el balance residual después del balanceo. Esto hace que un monitoreo periódico o continuo, según corresponda, siempre sea justificable si el total de costos de mantención resulta conveniente.

El motivo es que las amplitudes de vibración por desbalance pueden provoca fuerzas que lleven al sistema progresivamente a una condición de falla inminente, a través de daño acumulativo.

Además, cuando un equipo rotatorio presenta una falla, aparecen modos propios asociados a esa falla, que debieran ser identificables bajo condiciones de conocimiento de la máquina.

En este trabajo se presentará la comparación de dos motores eléctricos de inducción trifásicos, de jaula de ardilla, uno de los cuales estará en perfecto estado (como viene de fábrica), y el otro estará sometido a fallas conocidas, introducidas antes de las experiencias.

Con lo anterior se pretende aislar los modos propios asociadas a las fallas, y establecer una relación clara de falla y espectro observado.

Las fallas introducidas al motor con falla serán de tipo mecánico y eléctrico.

La carga elegida para el motor es una bomba de agua centrífuga. Como esta bomba es también una máquina rotatoria, será necesario investigar y desarrollar un modelo matemático para determinar los modos propio de esta, para que no exista confusión con el espectro de los motores.

La figura 1.1 muestra el diseño del montaje que será armado durante el mes de diciembre. Este será descrito en detalle más adelante.

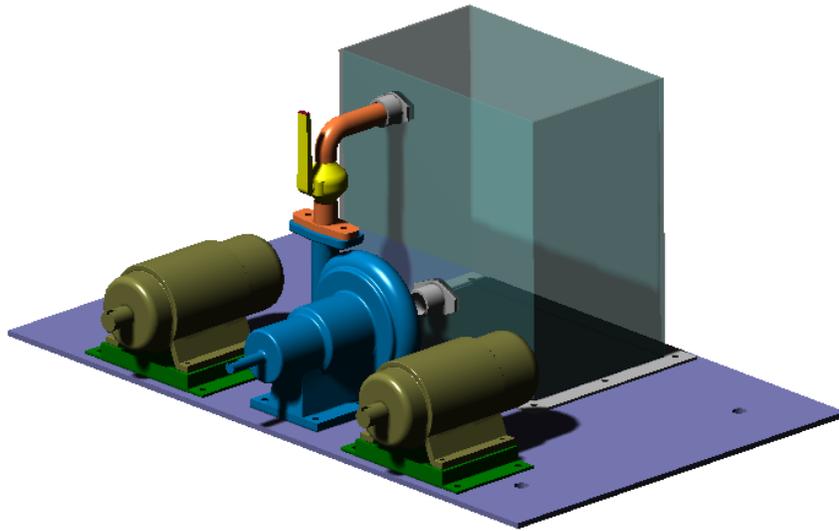


Figura 1.1: Modelo 3D de montaje experimental

Para la elaboración de los modelos matemáticos se elegirá, entre las técnicas descritas más adelante, la adecuada para cada subsistema, considerando complejidad y error medio con los datos experimentales.

Para la toma de datos se utilizará el equipo disponible en el Laboratorio de Sólidos de Mecesus I, que consta del hardware Siglab, y de los softwares Matlab 5.3 y Smodal.

# Capítulo 2

## Objetivos

Los objetivos iniciales planteados para el desarrollo del trabajo de título son presentados a continuación:

- Comparar el comportamiento mecánico de los motores eléctricos en buen estado y en mal estado.
- Validar los modelos elaborados con datos experimentales.
- Obtener una herramienta que permita identificar el tipo de falla en motores eléctricos, por medio del análisis de su función de respuesta en frecuencia.
- Modelar la falla introducida al motor.
- Discutir los resultados obtenidos en el laboratorio.

# Capítulo 3

## Antecedentes generales

### 3.1. 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 3.1:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + \Omega G\dot{x} + Kx = f \quad (3.1)$$

Para llegar a esta ecuación se debe plantear el lagrangiano (Ec. 3.2) del sistema rotor que se esta analizando, distinguiendo los términos de energía potencia ( $V$ ) y cinética ( $K$ ). La ecuación de Lagrange (Ec. 3.3) se separa término a término para preparar la notación matricial del problema, y hacerla más manejable por los algoritmos que utilizan los programas computacionales.

$$L = T - V \quad (3.2)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_{q_i} \quad (3.3)$$

donde  $q_i$  representa al vector de coordenadas generalizadas del sistema.

Si se trabaja por el método de elementos finitos, se emplea directamente la ecuación de Lagrange (Ec. 3.3) 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 3.1 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:

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.4)$$

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:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (3.5)$$

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.

**3.2. 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.

### **3.3. 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 3.1.

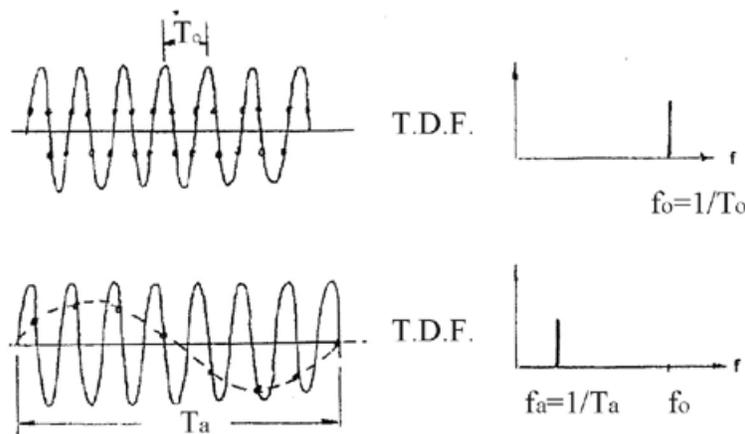


Figura 3.1: Efecto aliasing en una señal cualquiera

Para solucionar este problema hay que tomar dos medidas:

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

$$f_{\text{muestreo}} > \lambda f_{\text{max}} \quad (3.6)$$

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.

# Capítulo 4

## Montaje experimental

### 4.1. Diseño

Para la elaboración del diseño presentado, se investigó en busca de modelos y formas de las partes involucradas, para poder hacer algo que estuviera dentro de los rangos adecuados.

Principalmente la información viene de catálogos obtenidos en internet, y de conversaciones con los ingenieros a cargo de ventas en los establecimientos consultados para cotizar y elegir los componentes.

Como objeto de diseño se concibió un motor de potencia adecuada para ser manejable en un laboratorio, y una carga que fuera común para este tipo de motores.

Con esta definición se eligió un motor de 1.5 HP, de altas revoluciones para que sean más excitables los modos propios, trifásico. Junto con este, fue seleccionada una bomba hidráulica centrífuga adecuada.

Es necesario para este sistema, definir un sistema de recirculación de agua, compuesto por un estanque y los respectivos sellos.

## 4.2. Componentes involucrados en el diseño

A continuación se lista los principales componentes involucrados en el montaje, junto con sus características técnicas más relevantes:

- Motores eléctricos:
  - Marca: SIEMENS.
  - Características técnicas:
    - Potencia: 1.5 HP, 1.1 KW.
    - Dimensiones: Código 80, según catálogo, disponible en internet.
    - Polos: 2
    - RPM: 2800
- Bomba centrífuga hidráulica: Características Técnicas
  - Marca: Diana.
  - Origen: Nacional.
  - Potencia nominal: 1.1 HP.
  - RPM nominal: 2800.
  - Presión: 8 metros columna de agua.
  - Caudal:  $50 \text{ m}^3/\text{hr}$

En la figura 4.1 se presentan las curvas de la bomba, proporcionada por el fabricante.

- Sistema de poleas
- Estanque para recirculación del agua de trabajo
- Plancha de acero 1020 para descanso del montaje.

## 4.3. Consideraciones generales

Al momento de construir el montaje, se deberán tomar consideraciones como las que son listadas a continuación:

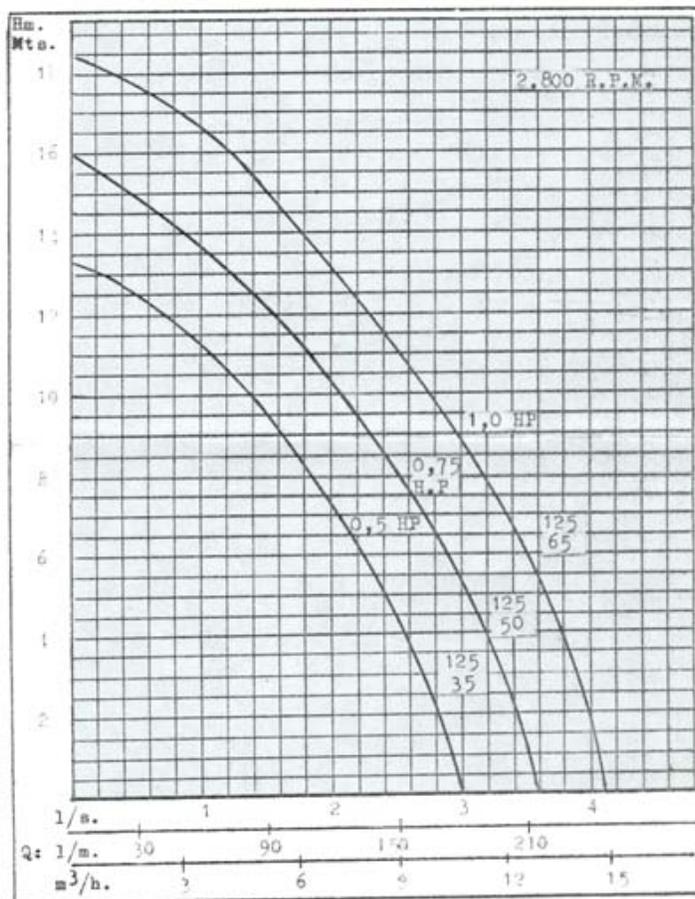


MOTO BOMBAS PARA AGUA — ESMERILADORAS

# JUAN ARIONE CARBONE

PADRE ORELLANA 1179 — FON0 5566071 — CASILLA 40.B — CORRE0 3 — SANTIAGO-CHILE

- COTIEMME**
- Motores a Bencina
  - Moto Bombas
- RUGGERINI**
- Motores Diesel
  - Motores Marinos
- CALPEDA POMPE**
- Moto Bombas Eléctricas
  - Equipos Automáticos "Hidropreas"
- VOLPI & BOTTOLI**
- Grupos Motobombas
  - Motopulverizadoras
- FIMEC**
- Moto Bombas Caseras
  - Motores Eléctricos
  - Esmeriles
- FIMET**
- Motores Eléctricos Trifásicos \* Mono-fásicos y Especiales
- FAES**
- Interruptores de Nivel
- D. R. T.**
- Sellos Mecánicos para agua y diferentes líquidos



CURVAS DE RENDIMIENTO PARA BOMBA "DIANA" TIPO 125-35/50/65

Diámetro impulsor : 127 mm.  
 Diámetro aspiración : 1 1/2" (1" a pedido)  
 Diámetro descarga : 1".  
 Tipo de impulsor : Abierto.  
 Máxima potencia en 2.800 : 0,5 para tipo 125-35  
 0,75 para tipo 125-50  
 1 HP para tipo 125-65

Figura 4.1: Curvas de la bomba hidráulica

- Todo el montaje de diseño para ser montado sobre una plancha de acero 1020 que descansa sobre la placa de pruebas aislada del laboratorio. El objetivo de esto es hacer un poco más independiente este montaje de la placa de pruebas.
- Los juegos de poleas para transmisión no han sido incluidos en la elaboración del modelo, pues estos vienen hechos a medida.
- Los soportes del motor son cajas soldadas terminadas a mano.
- Los planos del motor son solo de medidas referenciales, ya que fue muy complicado dibujar la total complejidad de un motor eléctrico.
- Las medidas de la bomba de agua son también de manera referencial, ya que la estructura de la bomba viene de la fundición. Sin embargo, las medidas de los anclajes y las bocas están muy cercana a la realidad.
- El estanque de agua puede sufrir cambios aun. El material contemplado inicialmente para su elaboración es el acrílico transparente.
- La plancha para montar todo debiera ser agujereada al final del montaje, para lograr una precisión adecuada. En estos elementos grandes es complicado mantener la precisión en buen nivel.
- El piping requerido para la unión de la bomba con el estanque no esta definido, por no contarse con medidas definitivas de las bocas de la bomba. Al momento de contar con los componentes necesarios, los sellos y válvulas serán definidas por profesores del taller de Molina.

#### 4.4. Modelo de diseño

Se muestra en la figura 4.2 imágenes del modelo preliminar del montaje. Estas imágenes fueron creadas por el software SolidWorks 2000.

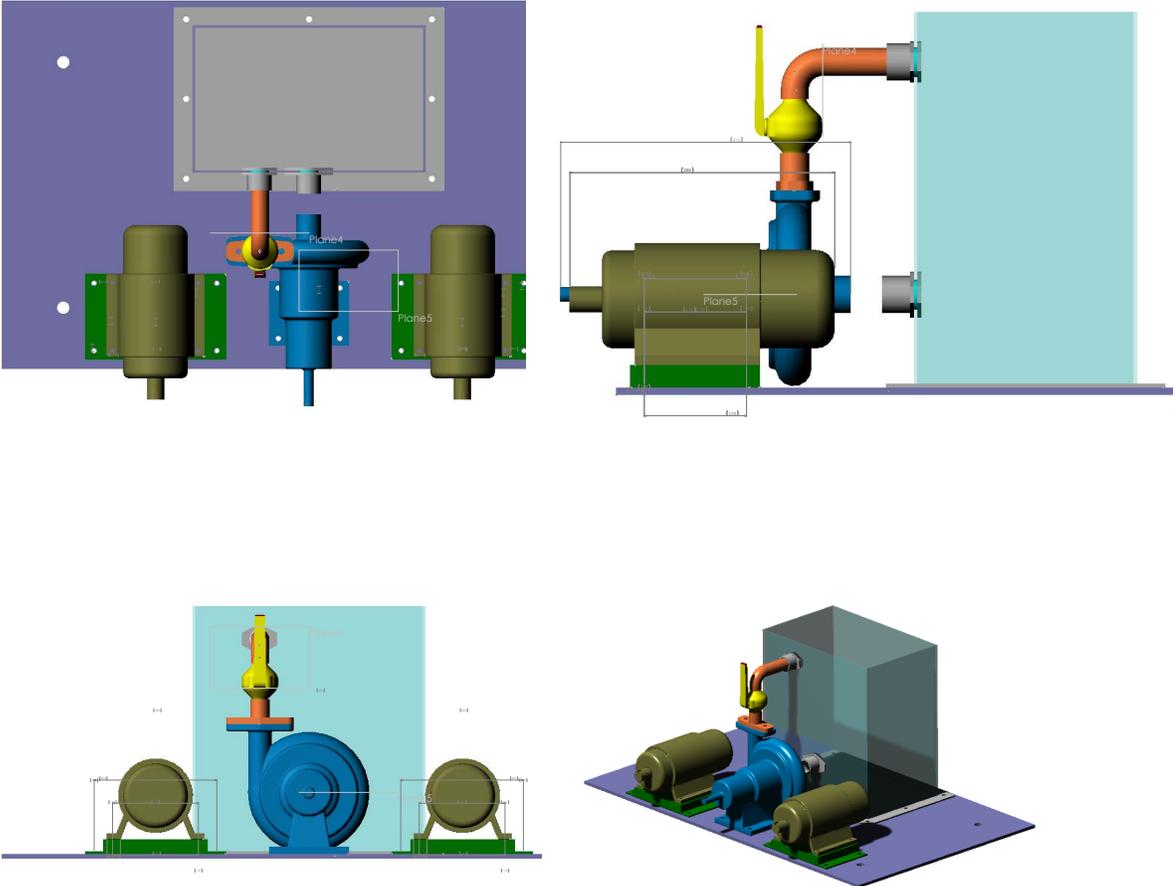


Figura 4.2: Varias vistas del montaje

# Capítulo 5

## Planificación y metodología

### 5.1. Planificación

Durante el transcurso del curso ME69E se siguió la planificación presentada en la carta Gantt de la figura 5.1.

Esta planificación se trata de seguir con el propósito de llevar un trabajo ordenado de preparación del trabajo de título.

Para el curso ME69F se propone la carta gantt de la figura 5.2. Sin embargo, esta planificación puede ser modificada en cuanto se defina mejor el trabajo y se presenten los problemas propios de llevar a cabo un proyecto.

Se entiende que el alumno no se ha visto enfrentado aun a desarrollar modelos de este tipo ni a toma de datos para validar modelos, por lo que los tiempos de la figura 5.2 pueden cambiar tanto como el orden de las tareas propuestas.

### 5.2. Metodología

Con el fin de cumplir con los objetivos del tema, se propone cumplir con las siguiente etapas:

- Tomar suficientes datos para eliminar errores de interferencia, señales asincrónicas

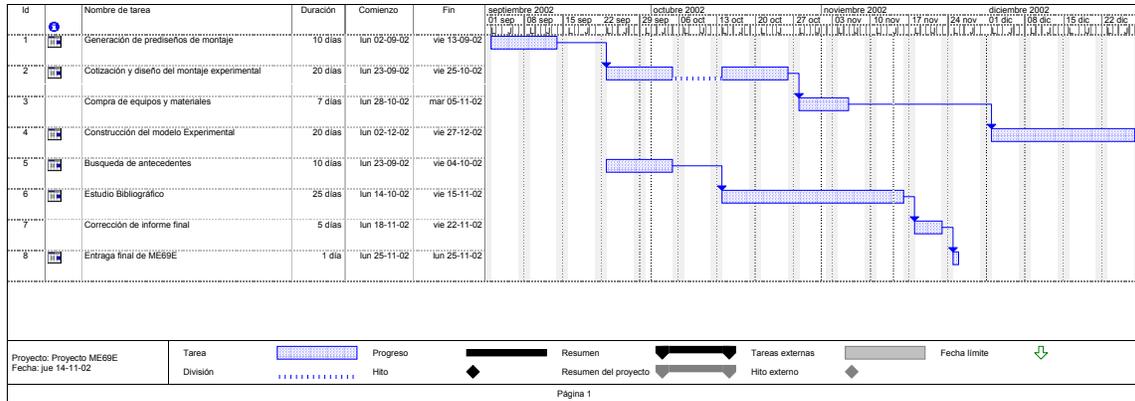


Figura 5.1: Carta Gantt del curso ME69E

provenientes del fluido de trabajo, errores de medición, etc.

- Definir el método de manejo de datos
- Establecer criterios de validación de modelos con datos experimentales.
- Comparar y discutir los resultados obtenidos con los resultados esperados.

En la medida que se vayan proponiendo objetivos de corto plazo dentro del trabajo, se estipularán planes y metodologías adecuadas.

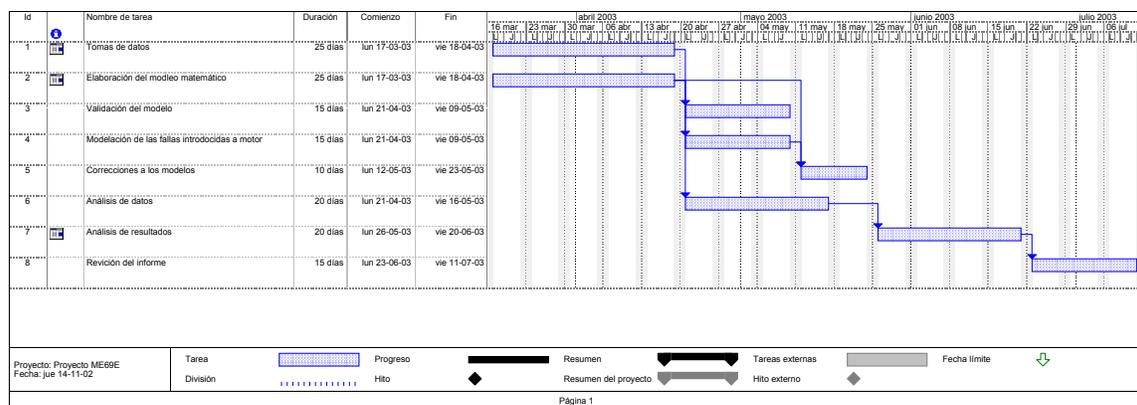


Figura 5.2: Carta Gantt propuesta para el trabajo de título

# Capítulo 6

## Recursos

hablar con pascual  
equipamiento de laboratorio.  
financiamiento del montaje experimental

### 6.1. Recursos no financieros

Los equipos y recursos necesarios para la elaboración de este trabajo serán proporcionados por el Laboratorio de Sólidos del proyecto Mecsup I y, por el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile. Estos recursos abarcan lo siguiente:

- Computador para trabajo de informes.
- Computador de laboratorio para toma de datos y procesamiento in-situ.
- Mesa de pruebas.
- Equipo de muestreo Siglab.
- Softwares Matlab y Smodal.
- Sensor transductor para toma de muestras.

## 6.2. Recursos financieros

Los recursos financieros serán proporcionados por el Laboratorio de Sólidos del proyecto Mecesusup I, el cual se quedará con el montaje experimental después de terminada la memoria. El la table 6.1 se presenta un resumen tentativo de los costos del montaje.

Componente	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Motor Siemens	2	74800	149600
Bomba Diana	1	101200	101200
Sistema de poleas	1	80000	80000
Estanque para recirculación de agua	1	100000	100000
Otros materiales para montar	-	25000	25000
Subtotal			455800
10 % + para imprevistos y fungibles	-	-	45580
<b>Total</b>	-	-	<b>501380</b>

Tabla 6.1: Resumen de costos

# Capítulo 7

## Comentarios

Se ha cumplido el objetivo de este informe, el cual es dejar claro de que trata la memoria y, definir en primera instancia la metodología a seguir.

También se ha presentado un plan de trabajo con el cual guiar el curso de la investigación.

Se ha descrito el montaje experimental que será usado como base para todo el desarrollo del trabajo.

En la segunda entrega de este informe se ampliarán los antecedentes, incorporando teoría de vibraciones de motores trifásicos y bombas centrífugas, que son los equipos más importantes involucrados en el tema.

Además se espera poder profundizar en las herramientas que se piensa serán usadas para en desarrollo de la memoria.

Por otra parte se seguirá avanzando en la investigación bibliográfica.

Se considera satisfactoria esta primera entrega.

# Bibliografía

- [1] Pascual, Rodrigo: *Modelamiento de Sistemas Rotores*, Departamento de Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Chile, Santiago, Chile (2002)
- [2] Pascual, Rodrigo: *Análisis de Vibraciones Mecánicas*, Departamento de Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Chile, Santiago, Chile (2002)
- [3] Hernandez, Rodrigo: *Fundamentos de Control de Sistemas*, Departamento de Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Chile, Santiago, Chile (2002)
- [4] Saavedra, Pedro: *Fundamentos de Análisis de Vibraciones*, Departamento de Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile (1991)
- [5] Estupiñan, Edgar: *Técnicas de Análisis de Vibraciones*, Departamento de Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile (1999)
- [6] Saavefra, Pedro: *Análisis de Vibraciones de Máquinas Rotatorias, niveles I, II y III*, Departamento de Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile (1999)