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:

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 Mecesup 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
Ω	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
ω_i	Frecuencia natural ($i : 1..n$ con n grados de libertad)
f	frecuencia (usualmente de muestreo)
f_L	frecuencia de linea (50 Hz)
f_{pr}	frecuencia de paso de las ranuras (motores)

Índice

1. Introducción **1**
1.1. Motivación 1
1.2. Introducción al tema 2

2. Objetivos **4**

3. Antecedentes generales **5**
3.1. Conceptos Básicos 5
3.2. Técnicas de muestreo 6
3.3. Fuentes de error y problemas en la medición 7
3.4. Introducción al motor trifásico 9
3.5. Introducción a la bomba centrífuga 10

4. Montaje experimental **12**
4.1. Diseño 12
4.2. Componentes involucrados en el diseño 13
4.3. Consideraciones generales 13
4.4. Modelo de diseño 15

5. Cadena de medición **17**
5.1. Analizador de datos 17
5.2. Hardware de adquisición de datos 18
5.3. Sensor 18

6. Planificación y metodología **21**
6.1. Planificación 21

6.2. Metodología 22
6.3. Dificultades esperadas 23

7. Recursos **25**
7.1. Recursos no financieros 25
7.2. Recursos financieros 25

Índice de figuras

1.1. Modelo 3D de montaje experimental 3

3.1. Efecto aliasing en una señal cualquiera 8
3.2. Motor trifásico 9
3.3. Espectro del motor trifásico 10
3.4. Espectro producido por la cavitación 11

4.1. Curvas de la bomba hidráulica 14
4.2. Varias vistas del montaje 16

5.1. Ventana del programa VNA 18
5.2. Ficha técnica del hardware Siglab 19
5.3. Ficha técnica del transductor 601A01 20

6.1. Carta Gantt del curso ME69E 22
6.2. Carta Gantt propuesta para el trabajo de título 23

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 civil mecánico.

También existe el interés personal del alumno sobre el tema a desarrollar, por las áreas que éste abarca y por la oportunidad de llevar 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 ésta, 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.

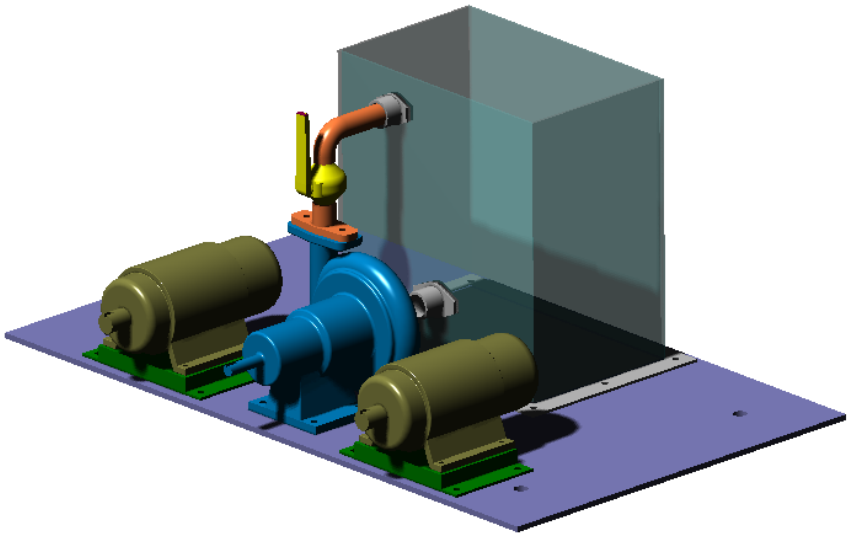


Figura 1.1: Modelo 3D de montaje experimental

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 Mecesup 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:

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

Para llegar a esta ecuación se debe plantear el lagrangiano (Ec. 3.2) del sistema rotor que se está 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.

$$L = T - V \tag{3.2}$$

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

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. 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:

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

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 le plano se Fourier, corresponderá a una señal totalmente no-localizada en el plano temporal, y viceversa. Se define también la transformada de Fourier Inversa:

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

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 en 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 la frecuencia 1x. Sirve principalmente para identificar resonancias, pues se produce un cambio de fase en 180°.

Análisis con promedios sincrónicos en le 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 frecuenten 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.

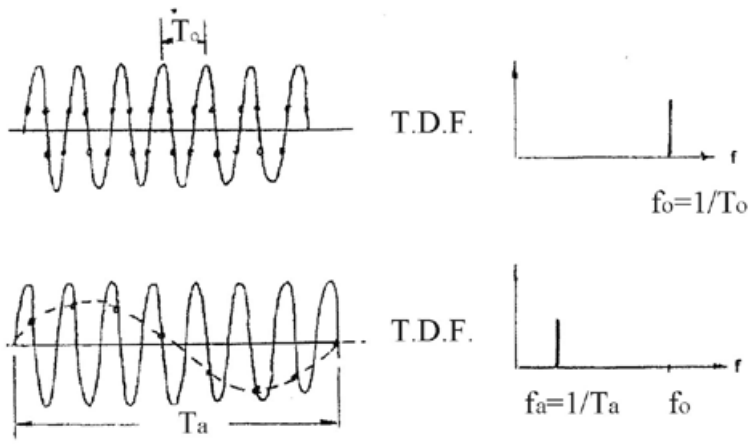


Figura 3.1: Efecto aliasing en una señal cualquiera

Para solucionar este problema hay que tomar dos medidas:

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

$$f_{muestreo} > \lambda f_{max} \tag{3.6}$$

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

- Aplicar un filtro pasa-bajos, o anti-aliasing, que extraiga las componentes mayores a f_{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.

3.4. Introducción al motor trifásico

Los componentes típicos para motores eléctricos trifásicos se muestra en la figura 3.2. Se puede observar que el rotor posee ranuras en su cuerpo. Estas ranuras en generan un flujo y fuerzas variables sobre la estructura magnética. La inclinación en estas ranuras ayuda a reducir las fuerzas generadas.

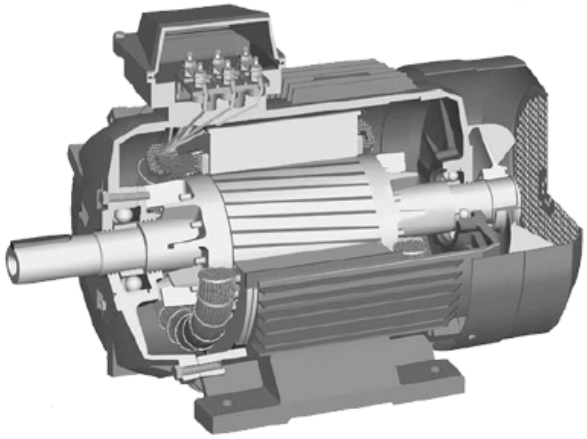


Figura 3.2: Motor trifásico

Vibraciones típicas:

Los motores generan una vibración inherentes a ellos a la frecuencia de paso de las ranuras (f_{pr}, con $f_{pr} = RPM \times número\, de\, ranuras$), con pequeñas bandas laterales a 2 f_L en torno a ella, tal como se muestra en la figura 3.3.

A parte de la figura 3.3, se pueden identificar picos que se relacionan a problemas conocidos en este tipo de motores (excentricidades, solturas, etc.). En este trabajo se introducirán

Figura 3.3: 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.

3.5. 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 mesura.
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 concentricidad 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 el 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 3.4. 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

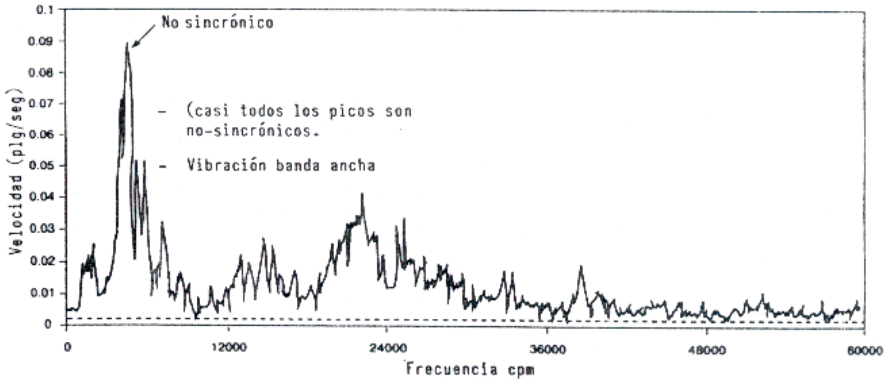


Figura 3.4: Espectro producido por la cavitación

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.

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 éste, 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 m^3/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:

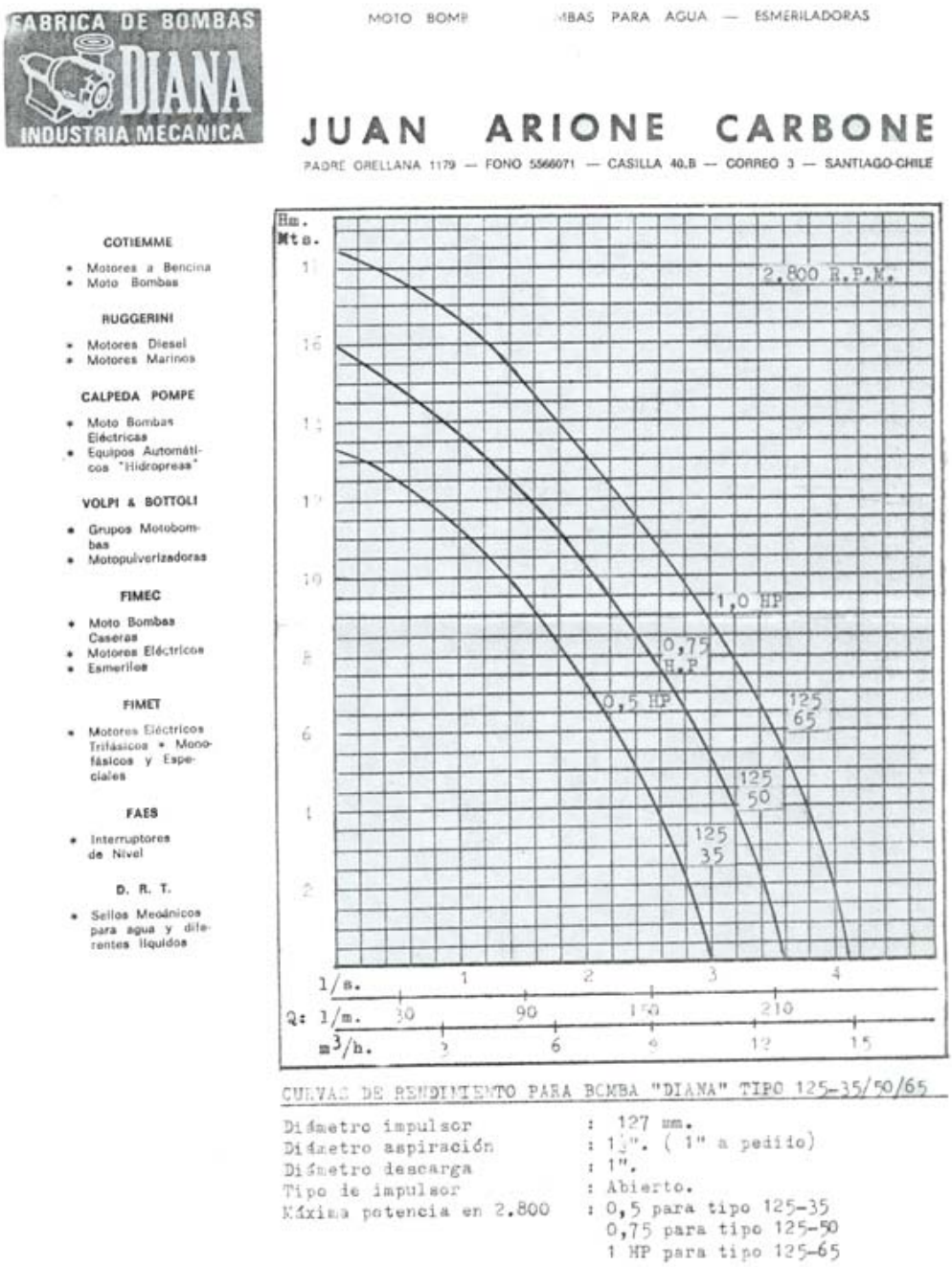


Figura 4.1: Curvas de la bomba hidráulica

- Se cuenta, en el laboratorio, con una mesa de pruebas, consistente en una placa de metal que descansa en un bloque de concreto, y está aislado de vibraciones exteriores al sistema montado sobre la mesa.
- Todo el montaje fue diseñado para ser montado sobre una plancha de acero 1020 que descansa sobre la mesa de pruebas 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.
- La forma de la bomba de agua y del motor eléctrico son de manera referencial. La forma y medidas definitivas las entrega el fabricante.
- 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 está 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. No se incluyen dimensiones, pues no ayudan a comprender el problema, sin embargo, existen planos adecuados para dirigir en montaje (dichos planos no se adjuntan, pues tampoco ayudan a definir el problema). Estas imágenes fueron creadas por el software SolidWorks 2000.

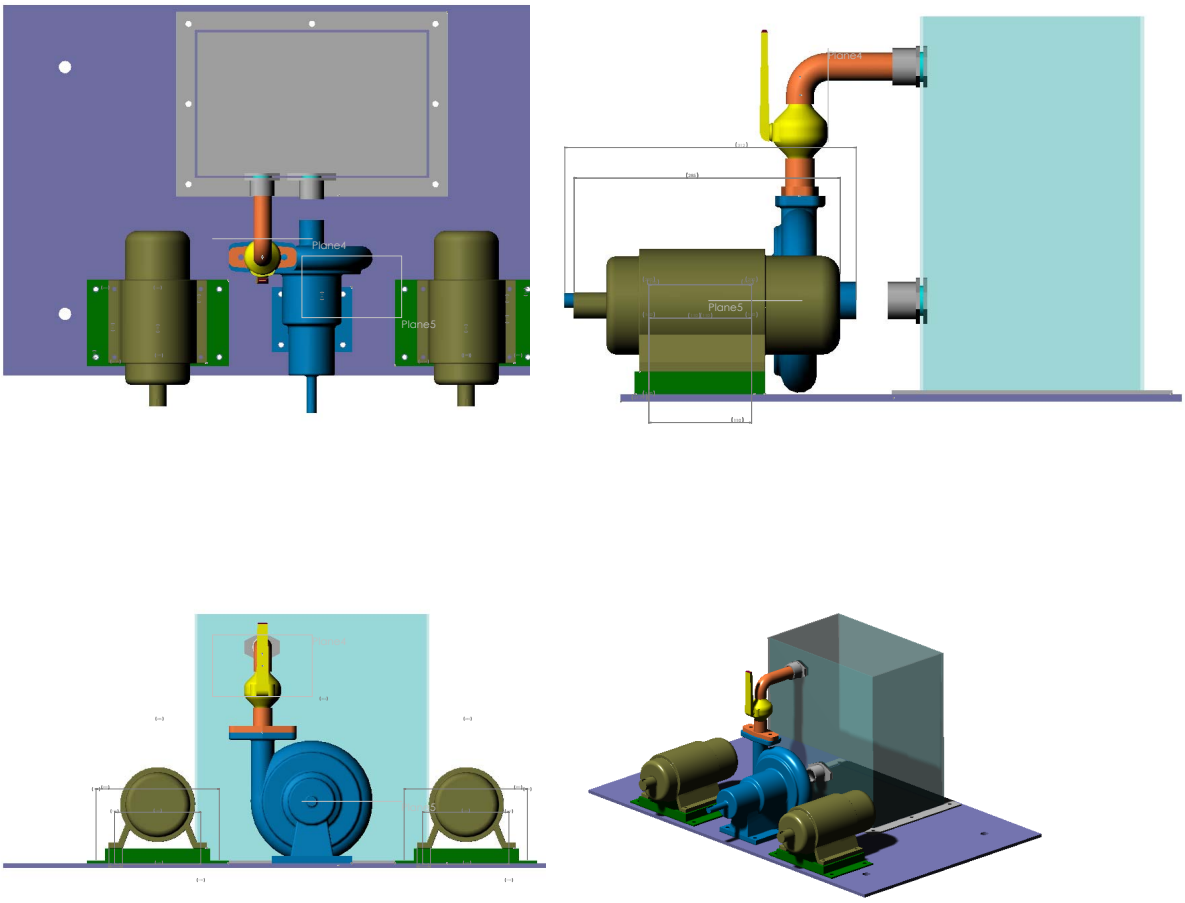


Figura 4.2: Varias vistas del montaje

Capítulo 5

Cadena de medición

Tal como se describe en el capítulo de montaje, se llevarán a cabo una cantidad de series de datos que permita una lectura clara de los picos del espectro medido.

Se usará en la cadena de medición, básicamente, un software analizador de datos, un hardware de adquisición, y un sensor. El software será potenciado por Matlab. El computador con el software se conectará al hardware con una tarjeta de adquisición de datos instalada en ambos sistemas. El sensor será conectado al hardware de adquisición por medio de un cable adecuado para muestreo de señales. El sensor estará puesto magnéticamente al montaje experimental.

A continuación se describe los componentes involucrados en la cadena de medición del procedimiento experimental.

5.1. Analizador de datos

Para el manejo de datos y obtención de gráficos, se usará el programa VNA, que corre bajo Matlab. Desde este software se ajustan todos los parámetro de obtención final de series de datos. Un ejemplo de pantalla se presenta en la figura 5.1. Este programa puede configurarse para captar señales sincrónicas. Además de puede ajustar la densidad de datos en el tiempo.

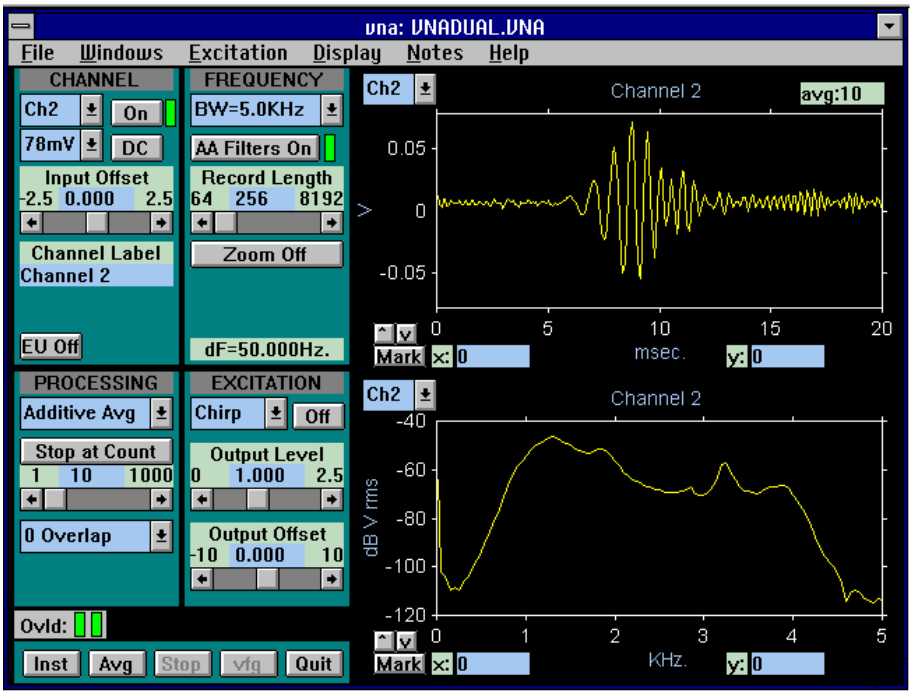


Figura 5.1: Ventana del programa VNA

5.2. Hardware de adquisición de datos

Para la interfase entre el sensor y el computador que analiza los datos, se cuenta con el hardware Siglab. La ficha técnica de éste se muestra en la figura 5.2. Este hardware tiene la bondad de aplicar varios filtros a la señal, para una obtención de datos limpia. Tiene salida digital de datos de alta frecuencia.

5.3. Sensor

Como sensor de vibraciones se utilizará un transductor acelerómetro IMI modelo 601A01. La ficha técnica de este acelerómetro se muestra en la figura 5.3. Un transductor de este tipo es adecuado para los rangos de frecuencia de trabajo del montaje. El laboratorio posee este instrumento.

Hardware Specifications

Front Panel

Rear Panel

Input Characteristics

Number of channels:	2
Type:	Differential, with 500 ohms low side to ground. This may be changed by the user.
Impedance:	1 Meg Ω || < 50 pF
CMRR:	> 60 dB from dc to 4 kHz > 60 - 20 • log(f/4 kHz) dB from 4 to 50 kHz
Noise floor:	< -140 dBVrms/√Hz from 500 Hz to 50 kHz < -140-20 • log(f/500 Hz) dbVrms/√Hz from 1.25 Hz to 500 Hz
Input bias current:	< 4 nA at 25°C
Protection:	30 Vrms (differential)
Voltage ranges:	10 ranges: ±20 mV to ±10 V full scale in 6 dB steps
Coupling:	dc/ac (0.25 Hz ac -3 dB point)
User dc offset:	± 8 V on 10 V and 5 V input ranges, otherwise ±2.5 V
Residual dc offset:	dc coupled: ±1 mV ± .02% of range + offset drift ac coupled: ±2 mV ± .03% of range + offset drift
Offset drift:	± 200 µV/°C on 5 V and 10 V input ranges ± 50 µV/°C on all other ranges (after calibration)
Absolute accuracy:	± 0.0025% of full scale range ± [0.03 + 0.04 • (f/50 kHz)] dB
Data converter:	16-bit sigma delta A/D
Signal conditioning:	Interface for optional circuit board for customization
Bandwidths:	5 Hz to 50 kHz in a 1, 2, 5 sequence
Sampling rate:	2.56 times selected bandwidth
Alias protection:	90 dB on all frequency ranges for f <100 kHz 80 dB on all frequency ranges for f >100 kHz
Digital filters:	Real-time decimating and frequency translating digital filters Frequency translation center frequency resolution < 500 µHz, 50 kHz max center frequency on ±5 Hz to ±2000 Hz bands. 40 kHz max on ± 10 kHz and ± 5kHz bands
Filter efficiency:	The alias filters provide full 90 dB protection over 78% of the Nyquist bandwidth (equivalent filter roll off: >142 dB/octave)
Digital filter ripple:	< ± 0.02 dB (includes internal A/D digital filter)
Analog filter ripple:	< ± [0.01 + 0.04 • (f/50 kHz)] dB
Gain match:	< [0.01 + 0.04 • (f/50 kHz)] dB
Phase match:	Between channels 1 and 2, same gain range: < [0.1 + 0.9 • (f/50 kHz)]° Otherwise: < [0.2 + 3.0 • (f/50 kHz)]°
Dynamic range:	All harmonic, intermodulation, and spurious signals will be: > 90 dB below full scale on 20, and 40 mV ranges > 95 dB below full scale on all other input ranges
Transfer function dynamic range:	> 110dB, dc-20 kHz > 105dB, 20-50 kHz
Overload detectors:	On both low and high side of inputs and at the A/D input
Trigger sources:	Input channels, output channels, external TTL
Trigger threshold:	17 steps from -71% to 71% of full scale (9% steps)
Trigger slope:	Positive or negative
Trigger hysteresis:	Selectable, 9% or 18% of full scale
Transient response:	Overshoot/preshoot < 15% on 50 kHz bandwidth or with digital filters off. Otherwise < 22%
Sampling rate:	128 kHz max per channel (simultaneous sampling)
Frequency accuracy:	± 0.01% with internal timebase

Output Characteristics

Number of channels:	1
Type:	Single ended
Impedance:	51 Ω , ±1%
Noise floor:	< -115 dBVrms/√Hz from 500 Hz to 50 kHz < -115 - 10 • log (f/500Hz) dBVrms/√Hz from 5 Hz to 500 Hz
Drive current:	20 mA rms
Protection:	15 Vrms
Maximum level:	± 10 V (including dc offset), maximum p-p arb output 10 V
Level control:	20 mV to 10 V with better than 1 mV resolution
User dc offset:	± 10 V with < 1 mV resolution
Residual dc offset	± 4 mV + offset drift
Offset drift:	± 200 µV/°C (after calibration)
Amplitude accuracy:	± 2 mVrms ± [0.1 + 0.7 • (f/50 kHz)] dB
Data converter:	16-bit D/A, ninth-order elliptic smoothing filter
Filter ripple:	< [0.1 + 0.7 • (f/50 kHz)] dB
Spectral purity:	Harmonics, subharmonics, intermodulation products and spurious signals are below the selected output level (in Vrms) by the lesser of: -90 dBc for f<=5 kHz or -90+(f-5 kHz/45 kHz) dBc for 5 kHz<f<50 kHz. The table below gives some examples. (For low level outputs, the noise floor must be considered.)

Frequency in kHz:	2	5	10	20	30	40	50
Spectral Purity:	-90	-90	-88	-85	-81	-78	-75

Host interface:	SCSI with selectable active terminator, high density connectors
Power requirements:	12 Vdc (15 max), less than 1.5 Amps
ac adapter:	Input: 95-240 Vac, Output: 12 Vdc
Internal battery:	7.2 V, 1500 mAh
Data memory:	4 MB standard. 8, 16, and 32 MB options
Size:	Aluminum case, 8.5" x 11" x 2" (21.6 cm x 27.9 cm x 5.1 cm)
Weight:	4.5 lbs. (2 kg) including internal battery

dsp Technology Inc.
48500 Kato Road, Fremont, CA 94538-7385 www.dspt.com
Tel: (510) 657-7555 Fax: (510) 657-7576 Email: siglab@dspt.com

©1997 DSP Technology Inc. DSPT SigLab, DSPT, and DSP Technology Inc. are trademarks of DSP Technology Inc. MATLAB is a registered trademark of The MathWorks, Inc. Other products and brand names are trademarks or registered trademarks of their respective holders. Specifications subject to change without notice. Printed in U.S.A. PN: Linoin6975K

Figura 5.2: Ficha técnica del hardware Siglab

Model Number **601A01**	**INDUSTRIAL ICP ® ACCELEROMETER**	Revision: F ECN #: 13236

DYNAMIC PERFORMANCE	**ENGLISH**	**SI**	
Sensitivity (±20%)	100 mV/g	10,2 mV/(m/s^2)	[1]
Measurement Range	±50 g	±490 m/s^2	
Frequency Range (±3 dB)	16 - 600,000 cpm	0,27 Hz – 10 kHz	[2] [3]
Mounted Resonant Frequency	960 kcpm	16 kHz	[4]
Amplitude Linearity	±1%	±1%	[5]
Transverse Sensitivity	≤7%	≤7%	
ENVIRONMENTAL			
Shock Limit	5,000 g pk	49 050 m/s^2 pk	
Temperature Range	-65 to +250 °F	-54 to +121 °C	
Temperature Response	See Graph	See Graph	[4]
Sealing	Welded Hermetic	IP68	
ELECTRICAL			
Settling Time (within 1% of bias)	≤4.0 sec	≤4,0 sec	
Discharge Time Constant	≥0.6 sec	≥0,6 sec	
Excitation Voltage	18 to 28 VDC	18 to 28 VDC	
Constant Current	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Impedance	<150 ohms	<150 ohms	
Output Bias	8 to 12 VDC	8 to 12 VDC	
Broadband Electrical Noise (1-10 kHz)	50 µg	491 µm/s^2	[4]
Spectral Noise: (10 Hz)	3.2 µg/√Hz	31,0 (µm/s^2)/√Hz	[4]
(100 Hz)	1.0 µg/√Hz	9,81 (µm/s^2)/√Hz	[4]
(1 kHz)	0.7 µg/√Hz	6,94 (µm/s^2)/√Hz	[4]
Case Isolation	>10^8 ohms	>10^8 ohms	
MECHANICAL			
Size (hex x height)	7/8 x 1.94 in	22 x 49,3 mm	
Weight	2.8 oz	80 gm	
Mounting Thread	1/4-28 UNF-2B	Not Applicable	[6]
Mounting Torque	2 to 5 ft-lb	2,7 to 6,8 N-m	
Sensing Element/Geometry	Ceramic/Shear	Ceramic/Shear	
Case Material	Stainless Steel	Stainless Steel	
Connector Type (2-pin)/Position	Mil-C-5015/Top	Mil-C-5015/Top	

CE

All specifications are at room temperature unless otherwise specified.

OPTIONAL VERSIONS

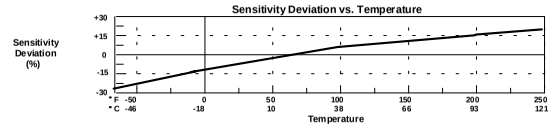
Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.

☐ **M** - Metric
Supplied Accessories
Model M081A61 Mounting Stud replaces Model 081A40

☐ **TO** - Temperature Output		+36 to +250 °F	+2 to +121 °C
Temperature Scale Factor		[(0.18 x mV Reading) +32]/°F	+10 mV/°C
Connector Type (3-Pin):	A	Acceleration Output	Acceleration Output
	B	Ground	Ground
	C	Temperature Output	Temperature Output

NOTES:
[1] Conversion Factor 1g = 9,81 m/s^2.
[2] 1 Hz = 60 cpm (cycles per minute).
[3] The high frequency tolerance is accurate within ±10% of the specified frequency.
[4] Typical value.
[5] Zero-based, least-squares, straight line method.
[6] 1/4-28 has no equivalent in S.I. units.

SUPPLIED ACCESSORIES:
Model 081A40 Mounting Stud (1)
Single Point Calibration at 100 Hz



ICP® is a registered trademark of PCB Piezotronics, Inc.
In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. Form DD030 Rev.E 2/20/98

Drawn:	Engineer:	Sales:	Approved:	Spec Number:
Date:	Date:	Date:	Date:	**5436**

PCB PIEZOTRONICS INC. IMI DIVISION ***3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043 800-959-4464 Fax (716) 684-3823 E-Mail: imisales@pcb.com***

Figura 5.3: Ficha técnica del transductor 601A01

Capítulo 6

Planificación y metodología

6.1. Planificación

Durante el transcurso del curso ME69E se siguió la planificación presentada en la carta Gantt de la figura 6.1.

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 6.2. Sin embargo, esta planificación puede ser modificada en cuanto el trabajo se este llevando a cabo y se presenten los problemas propios de llevar a cabo un proyecto. Se debe notar que los hitos de entrega de informe de avance, han sido elegidos por el alumno, y pueden cambiar de acuerdo a la opinion y exigencias que tengan los profesores involucrados.

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 6.2 pueden cambiar tanto como el orden de las tareas propuestas.

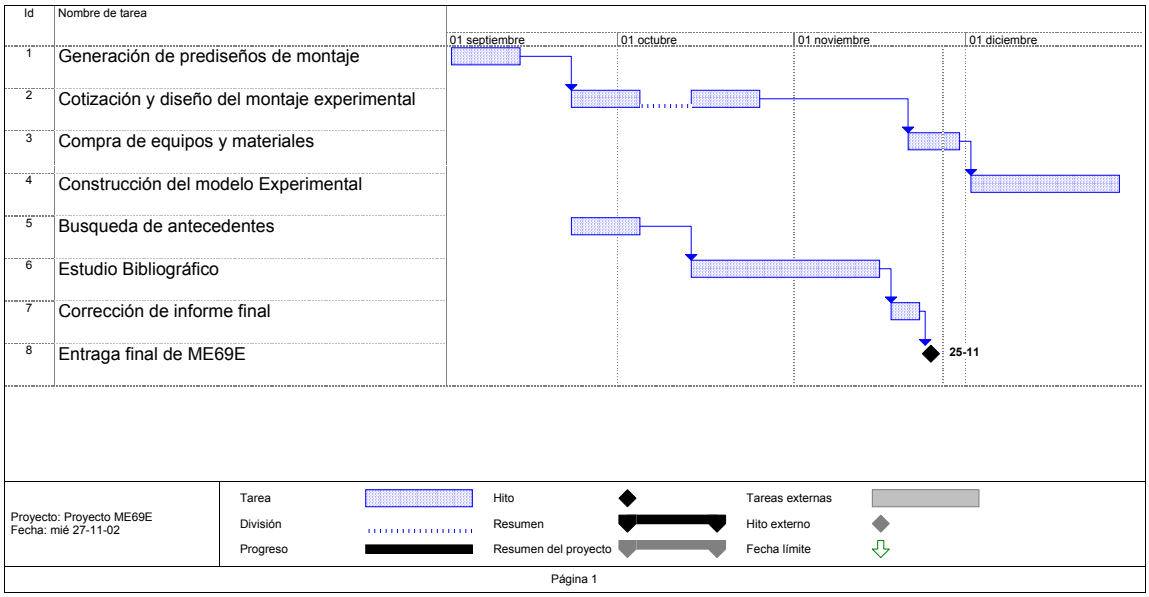


Figura 6.1: Carta Gantt del curso ME69E

6.2. 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 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.

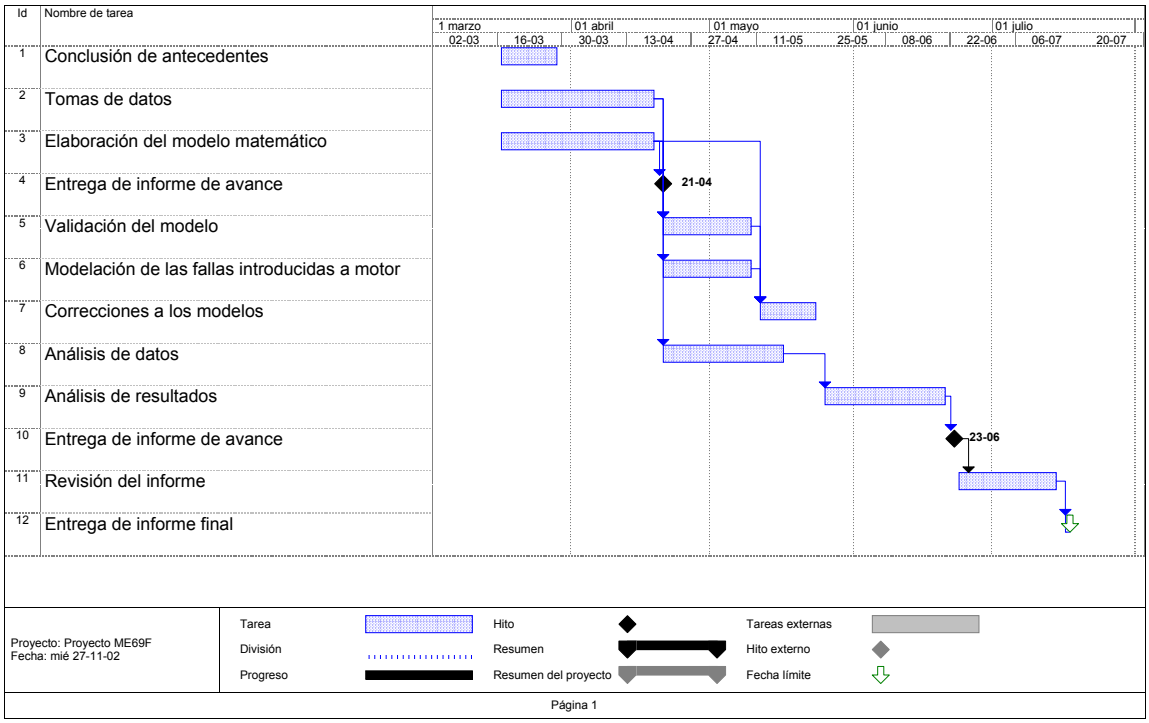


Figura 6.2: Carta Gantt propuesta para el trabajo de título

6.3. Dificultades esperadas

En la figura 6.2 se plantea un calendario de actividades a seguir durante el desarrollo de este trabajo de título. Sin embargo, pueden surgir eventualidades que demoren alguna tarea. A continuación se describen las dificultades que podrían encontrarse.

- El montaje de pruebas se ha programa para ser armado en el mes de diciembre del 2002. Sin embargo, la entrega de los dineros para comprar los componentes puede demorarse por términos de burocracia.
- El ajuste de los parámetro de la cadena de medición puede ser más difícil de lo esperado, y la toma de datos puede demorar más de lo programado, incluso podría necesitar hacerla denuevo.

- La elaboración de modelos puede contener muchos términos no lineales, que impidan una simulación computacional rápida.
- La adimensionalización de los modelos puede no ser útil para el análisis, y puede perderse tiempo haciéndola.

Junto con las posibles dificultades acá descritas, pueden aparecer más a medida que el trabajo avance. De todos modos, se propone un ritmo de trabajo constante, para ajustarse a la planificación propuesta, y si es posible adelantarse.

Capítulo 7

Recursos

7.1. Recursos no financieros

Los equipos y recursos necesarios para la elaboración de este trabajo serán proporcionados por el Laboratorio de Sólidos del proyecto Mecesup 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.

7.2. Recursos financieros

Los recursos financieros serán proporcionados por el Laboratorio de Sólidos del proyecto Mecesup I, el cual se quedará con el montaje experimental después de terminada la memoria. El la table 7.1 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
Total	-	-	**501380**

Tabla 7.1: Resumen de costos

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] Hernández, 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] Saavedra, Pedro: *Análisis de Vibraciones de Máquinas Rotatorias, niveles I, II y III*, Departamento de Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile (1999)

[7] Yamamoto, Toshio: *Linear and Nonlinear Rotordynamics*, Ed.: John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, Estados Unidos de America (2001)