

01129  
41



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM

DISEÑO DEL CONTROL DE UNA MESA VIBRADORA PARA  
USARSE EN EL MODELADO DE TALUDES

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO ELECTRICO - ELECTRONICO  
P R E S E N T A :  
OCHOA SIERRA / MIGUEL ANTONIO

DIRECTOR DE TESIS: ING. ENRIQUE RAMON GOMEZ ROSAS



MEXICO, D. F.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

2003.

A



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impresión el contenido de mi trabajo "\_\_\_\_\_  
NOMBRE: Ochoz Sierra  
Miguel Antonio  
FECHA: 07 - Nov - 2003  
FIRMA: [Signature]

*Pero la luz, será un día para los m as...  
Para todos aquellos que aún lloran la noche...  
Para quienes se les niega el día.*

A mi abuelita, Luz Maria Avilés, que me cuidó en la niñez y aconsejó en la juventud.

A mis padres, Maria Antonieta, que nunca dijo no a cualquiera de mis aspiraciones, y José Armando, que siempre me ayudó y apoyó en mis estudios, a los dos, que me alentaron siempre a alcanzar mis objetivos y metas a base de sacrificios.

A mis hermanos Cintia y Armando, que siempre están conmigo

A mis tíos Herlinda Sierra y Saúl Guerrero, que me ayudaron y aconsejaron a lo largo de mi carrera.

A mi tía Teresa Ochoa por apoyarme directa e indirectamente en mis estudios.

A mi tío, José Antonio Sierra, que me transmite sus experiencias.

A mi tío, José Antonio Sierra, que me transmite sus experiencias.

A mi compañera, Alejandra Márquez, que siempre me apoya y cree en mí.

A mis tíos, Miguel Ochoa Ávila, Miguel A. Sierra, y Saúl Guerrero, que me marcaron la senda.

A los amigos de la prepa y la facultad por compartir el camino.

A todos los profesores que tuve desde mi formación básica hasta la superior, que compartieron sus conocimientos.

A todas aquellas personas que colaboraron en mi formación académica y en mi aprendizaje cotidiano en el transcurso de mi vida.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Agradecimiento :

A Dios por permitirme llegar a donde estoy ahora.

Al Ing. Rodolfo Petters Lammel por haberme sugerido hacer el servicio social en el Instituto de Ingeniería.

Al Ing. Enrique R. Gómez Rosas por su paciencia y atención a mi persona a lo largo de este proyecto.

A los ingenieros Eduardo Botero y Osvaldo Flores por brindarme la información y las herramientas que utilicé a lo largo de este trabajo.

A mis tías Linda Sierra, Guadalupe Sierra, a los señores Inés Arias y José Luis Márquez, y a Ale por proporcionarme el acceso a una computadora.

A todas aquellas personas que por mala memoria omito y que de alguna manera colaboraron en la realización de este trabajo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# ÍNDICE

I.-Introducción.....	1
A.- Planteamiento del Problema.....	1
B.- Objetivo del Proyecto.....	1
C.-Alcance del Proyecto Desarrollado.....	1
D.-Definición y Función de una Mesa Vibradora.....	2
E.- Uso Particular y Descripción de la Mesa Vibradora.....	3
II.- Selección del Actuador.....	5
A.- Conceptos Básicos de Hidráulica y Neumática.....	5
B.- Definición y Clasificación de Actuadores.....	7
C.- Actuadores Hidráulicos.....	8
1.- Cilindros de Doble Efecto.....	9
2.- Cilindro de Doble Efecto de Vástago Simple.....	10
D.- Actuadores Neumáticos.....	11
1.- Cilindros de Doble Efecto.....	12
2.-Características Técnicas Principales de los Cilindros Neumáticos.....	12
E.- Comparación y Selección.....	13
1.- Sistema Hidráulico.....	13
2.- Sistema Neumático.....	14
3.-Requerimientos para el Movimiento de la Plataforma.....	15
4.- Actuador Seleccionado.....	15
III.- Servoválvula.....	18
A.- Función de las Válvulas.....	18
B.- Concepto de Vías y de Posiciones.....	18
C.- Clasificación y Tipos de las Válvulas.....	19
1.- Válvulas 2/2 Vías.....	19
2.- Distribuidores de Tres Vías.....	20
3.- Distribuidores de Cinco Vías.....	20
4.- Distribuidores de Émbolo Deslizante.....	21
D.- Selección de la Válvula.....	22
1.- Características de la Válvula.....	23

2.- Modo de Operación.....	24
IV.- Diseño del Control y Sistema DAQ.....	26
A.- Conceptos Básicos de Control.....	26
B.- Circuito de Control para la Servoválvula.....	29
C.- Sistema de Adquisición de Datos DAQ.....	32
1.- Transductores de la Mesa Vibradora.....	33
1.a.- Definición, Funcionamiento y Descripción del LVDT.....	33
1.b.- Potenciómetro.....	37
1.c.- Acelerómetros.....	37
2.- Adquisición.....	39
V.- Manual de uso del programa.....	42
A.- Calibración.....	42
1.- Calibración Experimental.....	43
2.- Calibración Teórica de Transductores.....	46
2.a.- Algoritmo para Pendiente y Ordenada en Acelerómetros.....	47
3.- Prueba de Transductores.....	48
4.- Salir.....	48
B.- Operación.....	49
1.- Señal con Patrón Senoidal.....	49
2.- Señal con Patrón Arbitrario.....	54
C.- Resultados.....	56
1.- Señal con Patrón Senoidal.....	57
2.- Señal con Patrón Arbitrario.....	59
VI.- Costo y Aplicación de la Mesa Vibradora.....	61
A.- Costo.....	61
B.- Aplicación.....	61
VII.- Conclusiones.....	64
VIII.-Bibliografía.....	66

IX.-Apéndice A.....	67
A.- LVDT 3000 HR.....	66
B.-Adicionador de Señal.....	67
C.-Tarjeta de Adquisición de Datos PCI6024E.....	69
D.-Ejemplos Esquemáticos de los Modelos Mecánicos Probados en la Mesa Vibradora.....	79



# I.- Introducción.

## A.- Planteamiento del Problema

Con la finalidad de comprobar la validez de diferentes modelos matemáticos aplicados a la dinámica de los taludes y a la elaboración de otros estudios al respecto, surge la idea en la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM, de crear una Mesa Vibradora para tal efecto.

Dado el planteamiento del proyecto, la Coordinación de Geotecnia recurrió a la asesoría de la coordinación de Instrumentación del Instituto de Ingeniería, y debido a la experiencia en anteriores proyectos conjuntos se llegó a la conclusión de que el diseño de la Mesa Vibradora se efectuaría completamente en el laboratorio de Mecánica de suelos de Geotecnia.

## B.- Objetivo del Proyecto

Diseñar el control y el sistema de adquisición datos de una Mesa Vibradora para la verificación de modelos matemáticos sobre el comportamiento dinámico de los taludes, basado en una PC y utilizando LabVIEW con el objeto de diseñar un programa gráfico que presente las variables del modelo, tales como desplazamientos y aceleraciones.

## C.- Alcance del Proyecto Desarrollado

Se establecerán el funcionamiento del hardware, también se comentarán las características mecánicas y eléctricas del actuador y de los sensores respectivamente.

Se definirán las características propias del control a elaborar y cómo y en donde se origina el lazo de control, sin llegar a un análisis profundo, ya que la experiencia ha marcado un camino perfectamente bien definido, obteniéndose buenos resultados.

Se explicarán las características de la tarjeta de adquisición de datos PCI6024E de National Instruments. También se explicará el hardware implementado para la servoválvula y el utilizado para acoplar el LVDT y los acelerómetros a la Tarjeta de Adquisición de datos dispuesta en la PC.

A lo largo de este trabajo se dará solución a los diferentes requerimientos de los usuarios del sistema (Mesa Vibradora), tales como una interfaz de software cómoda y fácil de entender, es decir, que la computadora presente paneles frontales de calidad que muestren los datos de forma clara y ordenada así como menús simples que no estén escondidos, además de diseñarlos con colores distinguibles y no agresivos al usuario. Esto se logró en función de los recursos con que se contó para la implementación de las soluciones y de acuerdo a la capacidad y eficiencia del hardware comercial, del software LabVIEW y del hardware elaborado.

## **D.- Definición y Función de una Mesa Vibradora**

Una definición de mesa vibradora es: Plataforma que se excita mediante actuadores servohidráulicos o servoneumáticos que generan de manera artificial señales dinámicas de interés y que mediante instrumentación se pueden obtener datos acerca de la respuesta dinámica de diferentes estructuras o modelos dispuestos sobre esta plataforma.

Las mesas vibradoras no tienen una clasificación como tal, sin embargo, se les puede agrupar según sus grados de libertad, que pueden ser desde uno hasta

seis grados de libertad o bien por el tipo de sistema de excitación que poseen y que puede ser mecánico, eléctrico, hidráulico o neumático.

Las mesas vibratorias sirven para:

- a) Estudiar la respuesta dinámica de suelos, elementos y sistemas estructurales;
- b) Demostrar la validez de un concepto estructural;
- c) Desarrollar y refinar modelos analíticos; y
- d) Evaluar y validar el comportamiento de equipo mecánico, eléctrico, electrónico y de comunicaciones.

### **E.-Uso particular y Descripción de la Mesa Vibradora**

Se planteó la construcción a realizar en la Coordinación de Geotecnia de una pequeña Mesa Vibradora de un solo grado de libertad horizontal, con el fin de comprobar las hipótesis acerca de los efectos cinéticos y de la incidencia de la discretización en los desplazamientos permanentes ocasionados al talud sujeto durante un sismo.

La Mesa consta de una estructura base de 1.5 x 0.8 x 0.6 m. que soporta a una plataforma móvil, un tanque contenedor de aire, un potenciómetro acoplado al actuador neumático y la servoválvula (Figura 1-1).

La plataforma móvil sostendrá al modelo estructural o mecánico (Figura 1-2) que posee tres de los cuatro acelerómetros, estando el cuarto acelerómetro colocado sobre la misma plataforma móvil; además tiene un LVDT que medirá la posición del modelo respecto a la plataforma móvil.

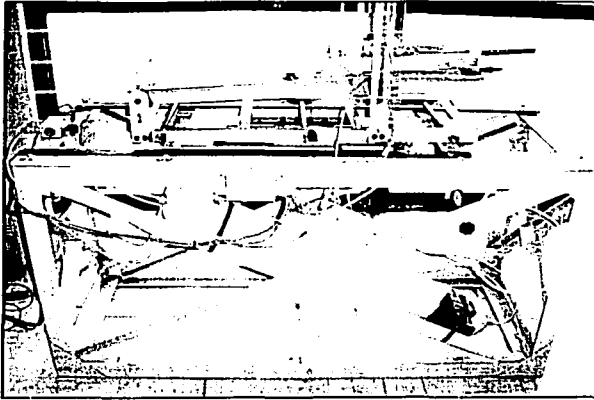


Figura 1-1. Mesa Vibradora

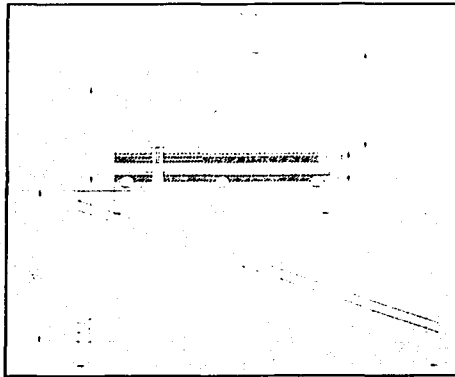


Figura 1-2. Vista lateral de la Mesa Vibradora

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## II.- Selección del Actuador

Al diseñar un sistema como el de la Mesa Vibradora, se deben de plantear primeramente las características del trabajo que efectuará el sistema, para después determinar la técnica de automatización a emplear y poder escoger los elementos de trabajo y de control necesarios como son, los actuadores y las válvulas respectivamente, teniendo como posibilidades las siguientes automatizaciones(2):

- Mecánica
- Hidráulica
- Neumática
- Eléctrica

Para el caso de la Mesa Vibradora se consideraron a la hidráulica y a la neumática como las mejores posibilidades de automatización en conjunción con la electrónica para este sistema. Una vez elegida una de estas técnicas o la combinación de ellas se procede, como ya dije, a elegir los elementos de trabajo del sistema.

A continuación se explican algunos conceptos básicos de hidráulica y neumática para posteriormente discutir los dos tipos de actuadores, hidráulicos y neumáticos.

### A.- Conceptos Básicos de Hidráulica y Neumática

Es conveniente recordar algunos conceptos de la mecánica de fluidos que propicien el entendimiento de las explicaciones posteriores. Las magnitudes que más frecuentemente se utilizan son presión, caudal, potencia y viscosidad(1).

**Presión:** La presión ( $P$ ) ejercida por un fluido sobre una superficie ( $S$ ) –y viceversa- es el cociente entre la fuerza ( $F$ ) y la superficie que recibe su acción es decir:  $P = F/S$  o mejor, si esta fuerza no fuera uniforme, para cada punto la presión sería:  $P = dF/dS$ .

La presión resultante de dividir la fuerza ejercida por la sección sobre la que actúa se llama presión absoluta.

Para comprender la fuerza de avance a que está sometido un émbolo debemos restar del producto  $P_{abs} \cdot S$  el producto  $P_{atm} \cdot S$  que representa la fuerza que le opone la presión atmosférica. A la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica se le conoce como presión relativa.

La unidad de presión en el Sistema Internacional (SI) es el  $N/m^2$  que recibe el nombre de Pascal. Esta unidad es demasiado pequeña para la mayor parte de las aplicaciones por lo que se utiliza como unidad el bar, pues su uso es más práctico.  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$  (Newton sobre metro cuadrado).

Tradicionalmente, se venían empleando como unidades de presión la atmósfera o el  $kP/cm^2$ , de valor muy cercano al bar. Así pues, no hablando con rigor, 1 bar, 1 atm y 1  $kP/cm^2$  se pueden considerar equivalentes. La unidad británica de presión es el p.s.i. (libra por pulgada cuadrada).

**Caudal:** Se define al caudal ( $Q$ ) como la cantidad de fluido que atraviesa una sección dada por unidad de tiempo. Esta cantidad de fluido se puede expresar de dos formas, en masa o en volumen. Evidentemente, el caudal másico y el caudal volumétrico están relacionados a través de la densidad del fluido.

El caudal másico se expresa en kg/s, mientras la unidad SI de caudal es el  $\text{m}^3/\text{s}$  seguido de la referencia "normal" o "actual". En la práctica, se emplea el l/min, o el  $\text{m}^3/\text{hora}$ .

**Potencia:** La potencia (P) instantánea consumida por un receptor es igual al producto de fuerza (F) por velocidad (v), es decir, la fuerza total ejercida por un cilindro es igual al producto de la presión (p) por la sección útil (S) del cilindro. El volumen que se crea por unidad de tiempo, al avanzar el cilindro, es ocupado por el caudal de donde la expresión de potencia es:

$$P=F \cdot v=(p \cdot S) \cdot (Q/S)=p \cdot Q$$

Si expresamos la presión en  $\text{N}/\text{m}^2$  y el caudal en  $\text{m}^3/\text{s}$ , la potencia se expresa en watts.

**Viscosidad:** Se define como la medida de resistencia que opone un líquido a fluir. Infiuye en esta característica la temperatura, siendo más fluidos (menos viscosos) conforme la temperatura aumenta.

Atendiendo a la temperatura, la viscosidad se mide en grados Engler ( $E^\circ$ ), es decir, es el cociente entre el tiempo que tarde en fluir un aceite por un orificio calibrado y el que tarda el agua a una temperatura determinada:  $E^\circ=t/t_1$ .

## B.- Definición y Clasificación de Actuadores

Un actuador es un elemento de trabajo que tiene la finalidad de convertir la energía de presión hidráulica o neumática en un movimiento que es directamente aprovechable para la realización de un trabajo.

Los actuadores pueden ser descritos en términos de sus parámetros de comportamiento como tiempo de respuesta y fuerza máxima, y en términos de sus requerimientos de operación como consumo máximo de energía y demanda total de energía<sup>(1)</sup>.

Tanto en hidráulica como en neumática los actuadores se clasifican en:

- Cilindros ó Motores lineales
- Motores

Dado que el sistema de la Mesa Vibradora evidentemente requería de un movimiento lineal (un solo grado de libertad horizontal), los actuadores que se evaluaron fueron los cilindros o actuadores lineales.

### C.- Actuadores Hidráulicos

Los cilindros hidráulicos se clasifican de la siguiente forma:

De simple efecto:

- Con recuperación por fuerza no definida
- Con recuperación por resortes

De doble efecto:

- De vástago simple
- De vástago doble pasante
- De cilindro de camisa móvil y vástago fijo
- Diferenciales

En estos últimos tipos de cilindros deben precisarse los diferentes sistemas de amortiguadores existentes: regulables o no regulables, montados sobre un lado o sobre los lados<sup>(1 y 9)</sup>.



Cilindros telescópicos:

- De simple efecto
- De doble efecto

Cilindros lineales especiales:

- De cable
- Tandem

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cabe decir, que los actuadores inmediatamente puestos a consideración para emplearse en este sistema, dadas las características del movimiento de la plataforma expuestas más adelante, fueron aquellos cuyo funcionamiento es de doble efecto.

### 1.- Cilindros de Doble Efecto

Llamados así porque el aceite a presión puede entrar por una u otra de las cámaras y provocar en consecuencia el movimiento del pistón hacia uno u otro sentido. El cilindro de doble efecto puede tener un solo vástago o bien dos. La figura 1-1 esquematiza las partes que constituyen a un cilindro hidráulico(9, y 10).

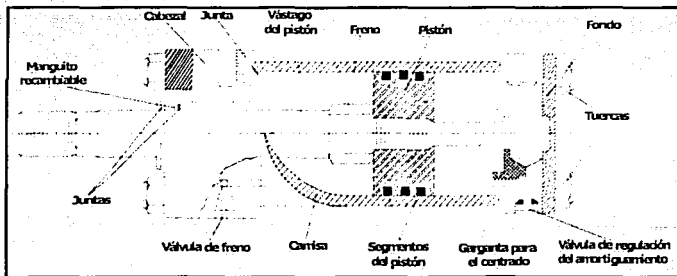


Figura 1-1. Cilindro de doble efecto visto en sección(10)

## 2.- Cilindro de Doble Efecto de Vástago Simple

Dado el diseño de la mesa y las características de funcionamiento que poseería la plataforma móvil, se optó por estudiar la posibilidad de utilizar un cilindro de doble efecto con vástago simple que se instalaría fuera del chasis de la mesa para completar la carrera de la plataforma como se ve en la figura 1-2.

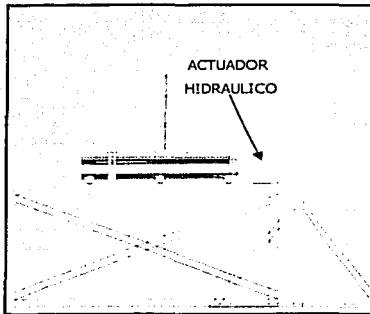
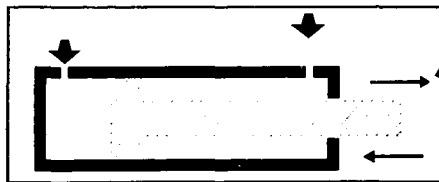


Figura 1-2. Posible ubicación del actuador hidráulico

Como indica el esquema de la figura 1-3 el cilindro de doble efecto de vástago simple es un receptor lineal, cuyo pistón recibe por sus dos caras el caudal que proviene de la bomba (en principio, sobre una cara a la vez: acción de la válvula).



**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

Figura 1-3. Cilindro de doble efecto de vástago simple: dos carreras motrices(1)

Siendo desiguales las dos superficies receptoras del pistón, resulta evidente que para una misma presión, son diferentes las fuerzas desarrolladas para la entrada y para la salida del vástago, además de que para un mismo caudal, la entrada del vástago se realiza a una velocidad mayor que la salida por lo que para efectos de control representaría una agravante, ya que se tendría que ajustar el caudal en la entrada dado que uno de los requerimientos de la mesa es tener velocidades iguales en ambos sentidos.

Otra de las opciones contempladas fue el cilindro de doble efecto con camisa móvil y vástago fijo, que a diferencia del cilindro anterior ocuparía un espacio menor puesto que estaría colocado dentro del chasis de la Mesa Vibradora.

#### D.- Actuadores Neumáticos

Prácticamente lo que he dicho para los actuadores hidráulicos vale para los neumáticos, aunque con algunas diferencias como se verá más adelante.

Su función es la de transformar la energía neumática del aire comprimido en trabajo mecánico. La figura 1-4 esquematiza las principales partes de un cilindro neumático.

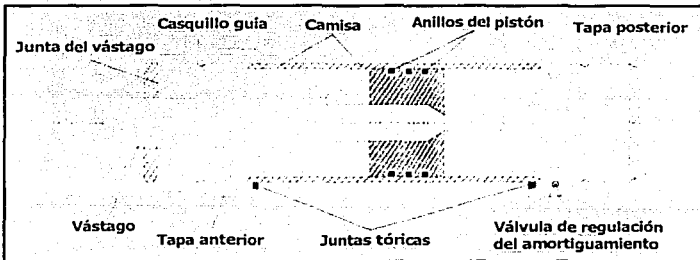


Figura 1-4. Elementos principales de que consta un cilindro neumático(1)

## 1.- Cilindros de Doble Efecto

Como ya expliqué anteriormente, al decir doble efecto quiero significar que tanto el movimiento de salida como el de entrada son debido a que el fluido, que en este caso es aire comprimido, ejerce su acción en las dos cámaras del cilindro para de esta forma realizar el trabajo en los dos sentidos del movimiento.

Al aplicar aire en la cámara posterior y comunicar la cámara anterior con la atmósfera a través de una válvula el cilindro realiza la carrera de avance. La carrera de retroceso se efectúa con el mismo proceso pero de manera inversa(1).

## 2.- Características Técnicas Principales de los Cilindros Neumáticos

Los fabricantes de cilindros adoptan varios criterios sobre las dimensiones de los mismos, ya que, según las implicaciones geográficas o las licencias de fabricación que poseen, adoptan unas u otras normativas.

**Fuerza del cilindro:** La fuerza ejercida por un émbolo es igual al producto de la presión por la superficie.

**Consumo de aire:** Otra característica importante es la cantidad de aire a presión necesario para el funcionamiento del cilindro. Se entiende por consumo teórico de aire de un cilindro, al volumen de aire consumido en cada ciclo de trabajo. Un ciclo de trabajo se refiere al desplazamiento del émbolo desde su posición inicial hasta el final de su carrera de trabajo, más el retorno a su posición inicial.

**Velocidad del émbolo:** La velocidad del émbolo en los cilindros estándar esta comprendida entre 0.1 y 1.5 m/s. Esta velocidad esta en función de la presión de trabajo, de la fuerza antagonista, de las secciones de las tuberías y también del diámetro nominal de la válvula de mando(1).

## E.- Comparación y Selección

Después de estudiar brevemente ambas técnicas, se tuvieron que evaluar las ventajas de un sistema respecto al otro tomado en cuenta los requerimientos de operación de la Mesa Vibradora, para después consultar con los fabricantes y determinar cuál de toda la gama de posibilidades sería la que se aplicaría al sistema.

### 1.- Sistema Hidráulico

Las ventajas se pueden enlistar de la siguiente forma:

- Los sistemas hidráulicos pueden producir un rango de fuerzas tan grandes como se deseen en un rango ya de toneladas, mediante el control de flujo del líquido.
- Los movimientos de estos sistemas pueden ser suaves, rápidos y precisos dado la incompresibilidad del fluido.
- Las velocidades se pueden hacer independientes de los límites impuestos por el caudal de la bomba instalando acumuladores o válvulas.
- La transmisión a distancia de potencias incluso elevadas puede efectuarse mediante tuberías de diámetro moderado.

Las desventajas son:

- Los controles hidráulicos son caros en costo y mantenimiento.
- Una pequeña fuga en el control o en un conector pueden deshabilitar todo el mecanismo. Se debe evitar cualquier fuga al exterior.

- Variaciones de viscosidad del líquido entre los estados de reposo y de régimen lo cual repercute en la hermeticidad de las juntas de los distribuidores.
- La fricción del fluido debido a la viscosidad depende mucho de la temperatura. Las temperaturas normales de funcionamiento para sistemas hidráulicos van de 20 °C a 80 °C (1, 2 y 9).

## 2.- Sistema Neumático

Las ventajas de este tipo de sistema son:

- Son menos caros con respecto a los sistemas hidráulicos.
- El manejo del aire es menos riesgoso que algunos de los fluidos hidráulicos, cuidando las presiones que se manejen para evitar explosiones.
- La sencillez de los propios sistemas de mando
- El aire es abundante, se transforma y almacena fácilmente, además de ser limpio y no contaminar, carece de problemas de combustión con la temperatura.
- Son insensibles a variaciones de la temperatura desempeñándose normalmente entre los 5 °C y los 60 °C. Sin embargo, estos sistemas pueden funcionar de 0 °C a 200 °C.
- Se toleran ciertas pérdidas, pero las fugas internas se deben evitar, porque las diferencias de presión son bajas (1, 2 y 9).

Sus desventajas son:

- Los controles neumáticos no pueden producir las mismas fuerzas que los controles hidráulicos.

- Es más difícil lograr un posicionamiento preciso de objetos empleando actuadores neumáticos, particularmente si el objeto a trasladar aumenta en peso.
- Los elementos neumáticos pueden alcanzar velocidades de trabajo elevadas pero, dada la compresibilidad del aire, su regulación no es constante.
- Su manipulación es ruidosa, además de que el mantenimiento del aire debe ser perfecto para evitar daños en los componentes del circuito neumático.

### 3.- Requerimientos para el Movimiento de la Plataforma

En un principio, las características que se me indicaron que debía poseer el movimiento de la plataforma de la Mesa Vibradora eran las siguientes: que el movimiento fuera senoidal con un rango de frecuencia de 1.5 Hz a 2 Hz, que el actuador soportara una carga de al menos 50 kg con una amplitud máxima de 300 mm pico a pico.

Posteriormente, se me indicó otro requerimiento que fue el de tener la posibilidad de que la plataforma se pudiera mover también mediante un patrón dado como, por ejemplo, algún archivo de amplitudes numérico que el usuario mandaría al sistema en un archivo tipo texto. Lamentablemente esto se pidió después de que el sistema operaba con base a los requerimientos anteriores, lo que originó dificultades al implementar esta última petición dadas las posibilidades del actuador y de la válvula.

### 4.- Actuador Seleccionado

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Una vez que se establecieron las características del movimiento que se requería para la plataforma móvil y se evaluaron las ventajas de un sistema

respecto al otro se determinó prácticamente mediante el factor costo que el sistema a utilizar sería el neumático.

El actuador que se seleccionó fue de la compañía Festo especialista en sistemas neumáticos catalogado como "accionamiento lineal neumático, con guía de cojinete deslizante".

Este modelo de actuador (Figura 1-5) fue seleccionado debido a su forma de funcionamiento que es de doble efecto y a su diseño propiamente, ya que al tener la corredera integrada se aprovecha espacio y le da mayor integridad mecánica a la Mesa Vibradora, además de cumplir con los requerimientos de movimiento de la plataforma. Su costo, que fue de 10,465.00 pesos, estaba dentro del presupuesto asignado al proyecto. Otra de las ventajas que ofrece en su diseño este actuador es que cuenta con acoplamientos para la colocación del potenciómetro detector de posición.

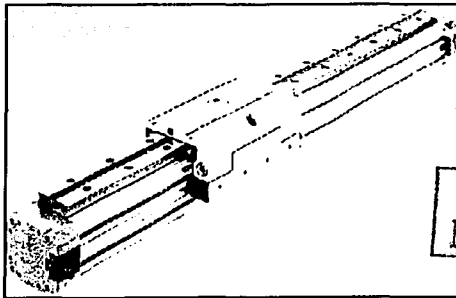


Figura 1-5. Actuador Neumático Seleccionado



Los datos del actuador dadas por el fabricante se ilustran en el siguiente cuadro 1-1.

Cuadro 1-1 Datos del actuador neumático seleccionado

CARACTERÍSTICAS	PROPIEDADES
Forma de funcionamiento	De doble efecto
Forma de émbolo	Redondo
Forma de exploración	Magnético
Forma de amortiguación	Tope neumático regulable
Longitud de amortiguación	30mm
Seguridad antigiro	Guía
Principio de arrastre	Arrastre de forma (ranura)
Principio de guado	Guía deslizante
Tamaño nominal del émbolo	40
Carrera	400mm
Presión de servicio min.	1.5 bar
Presión de trabajo max.	8 bar
Temperatura ambiente min.	-10 °c
Temperatura ambiente max.	60 °c
Tipo de conexión	Rosca interior
Fuerza útil (teórica) a 6 bar	854 N
Consumo de aire para 6 bar/10mm	0.088 l
Fluido de servicio	Aire comprimido filtrado

De esta forma, ya seleccionado el actuador se procedió, a la selección de la servoválvula para el control de movimiento de dicho actuador.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## III.- Servoválvula

En un sistema neumático las válvulas de control de dirección, más conocidas en la práctica como distribuidores o válvulas distribuidoras, son las que gobiernan el arranque, paro y sentido de circulación del aire comprimido.

### A.- Función de las Válvulas

La misión que se encomienda a los distribuidores dentro de un circuito de automatización es la de mantener o cambiar, según unas ordenes o señales recibidas, las conexiones entre los conductos a ellos conectados para obtener unas señales de salida de acuerdo con el programa establecido.

Simultáneamente, los distribuidores actúan como transductores ya que controlan una potencia neumática con otra de diferente naturaleza: eléctrica o mecánica<sup>(1)</sup>.

### B.- Concepto de Vías y de Posiciones

**Vías:** Se entiende por número de vías al número máximo de conductos que pueden interconectarse a través de la válvula.

**Posiciones:** El número de posiciones es el de conexiones diferentes que pueden obtenerse de manera estable entre las vías de la válvula.

Las válvulas de vías se designan en los catálogos de los fabricantes por el número de vías controladas y de las posiciones de maniobra estables. Así que, cuando una válvula es de 3/2 vías, quiere decir que posee tres vías y dos posiciones de maniobra<sup>(1)</sup>.

## C.- Clasificación y Tipos de las Válvulas

De acuerdo con su uso las válvulas se pueden dividir en los siguientes grupos:

- *Válvulas de potencia o principales.* Su función es la de suministrar aire directamente a los actuadores y permitir igualmente el escape. Estas deben de montarse lo más próximo posible a los cilindros.
- *Válvulas de fin de carrera.* Estas abren o cierran pasos al aire cuya función no será la de ir directamente al actuador, sino que se utilizan para el accionamiento de otros mecanismos de control.
- *Válvulas auxiliares.* Complementan a las anteriores.

También se pueden clasificar de acuerdo al concepto de vías y posiciones. A continuación se indican cuales son los principales tipos, sus aplicaciones más conocidas y los símbolos respectivos<sup>(1)</sup>.

### 1.- Válvulas 2/2 Vías

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Evidentemente sólo admiten dos posiciones: vías cerradas o abiertas. En circuitos neumáticos, la aplicación de estas válvulas es el cierre o aislamiento entre zonas del circuito.

Para controlar un cilindro de simple efecto se necesitan dos válvulas de dos vías. Para sacar el cilindro, una de las válvulas conecta la fuente de presión al cilindro mientras la otra cierra la comunicación con la atmósfera. Para que el cilindro regrese a su posición inicial, la válvula que anteriormente alimentaba el cilindro, debe cerrar la alimentación mientras la otra abre el escape a la atmósfera. En la figura 3-1 se muestra el símbolo propio de este tipo de válvula<sup>(1)</sup>.

## 2.- Distribuidores de Tres Vías

Una válvula de este tipo consta de un orificio de entrada, otro de salida y un tercer orificio para la descarga de aire. Por lo general, estos distribuidores son de dos posiciones  $-3/2$  vías- aunque también pueden ser de tres  $-3/3$  vías- quedando en su posición central o de reposo todas las vías cerradas.

Normalmente se emplean para el mando de cilindros de simple efecto y en el accionamiento de válvulas de mayor tamaño. En casos excepcionales, se utilizan para el mando de cilindros de doble efecto; para ello se utilizan dos válvulas. Una de ellas alimenta una de las cámaras del cilindro con aire a presión, simultáneamente la otra comunica la cámara contraria a escape. En la figura 3-1 se indica el símbolo característico de este tipo de válvula(1).

## 3.- Distribuidores de Cinco Vías

La válvula de cinco vías consta de un orificio para la entrada, dos salidas para utilización y los dos escapes correspondientes. Todas las válvulas de cinco vías son de émbolo deslizante; cada desplazamiento de éste, comunica la entrada con una u otra salida, quedando la salida restante conectada al exterior mediante el escape correspondiente. Se utiliza para el control de cilindros de doble efecto con la peculiaridad de que su fuerza de accionamiento es pequeña, incluso a presiones elevadas.

Además de las válvulas de  $5/2$ , existen dos versiones de  $5/3$  vías: una con ambas salidas a escape en posición central, y otra con todas las vías cerradas para dejar el cilindro inmovilizado o bloqueado en posición central(1).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Todos los distribuidores neumáticos que permiten el escape de aire a la atmósfera producen ruidos. Para disminuir el nivel acústico del escape existen unos elementos llamados silenciadores que ayudan a insonorizar el escape de aire. La siguiente figura se muestran los símbolos neumáticos de algunas válvulas.

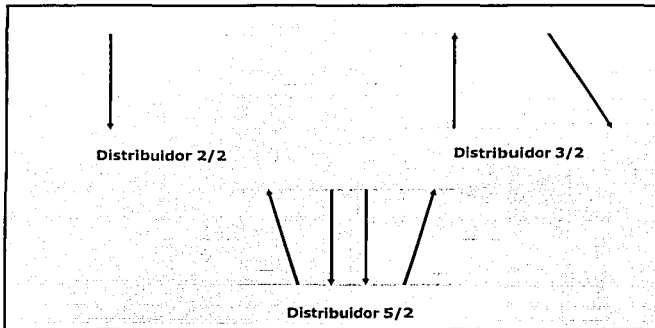


Figura 3-1. Simbología neumática de algunos tipos de válvulas(1)

#### 4.- Distribuidores de Émbolo Deslizante

El elemento móvil, un émbolo, se desliza perpendicularmente al eje del orificio que debe cerrar. Este tipo de cierre se adopta en la mayoría de los distribuidores neumáticos y se les llama también válvulas de corredera.

En dicho tipo de válvulas se hace muy difícil la estanqueidad de la corredera. El procedimiento de cierre empleado para impedir el paso del aire en sentido diferente al deseado puede ser:

- Por juntas en el émbolo o corredera.
- Por juntas en el cuerpo.
- Por contacto metal-metal.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En estas válvulas se puede destacar su versatilidad que les confiere la posibilidad de adaptación a diversos sistemas de accionamiento(1).

#### D.- Selección de la Válvula

Al contar con las características del movimiento de la Mesa Vibradora que se expusieron en el capítulo anterior y con el actuador neumático ya elegido, se simplificó la tarea de elegir la válvula que controlaría a dicho elemento de trabajo.

Atendiendo las recomendaciones del fabricante Festo, con base al actuador solicitado y al presupuesto con el que se contaba, se determinó que la válvula requerida para el objetivo fuera la catalogada como "Válvula electrónica proporcional de vías tipo MPYE".

En la figura 3-2, se muestran los componentes principales según el fabricante FESTO de la válvula elegida para este proyecto.

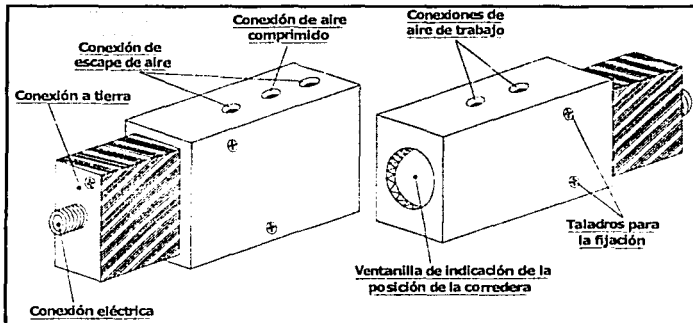


Figura 3-2. Componentes operativos y conexiones

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

En la válvula se regula la carrera de la corredera de modo proporcional a un valor de referencia definido con anterioridad. La señal eléctrica analógica permite una regulación progresiva de estrangulamiento del caudal volumétrico. Dicha válvula es utilizada para regular la velocidad y para posicionar un cilindro. Su símbolo neumático a continuación.

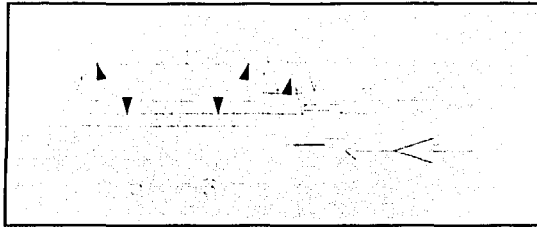


Figura 3-3.- Símbolo neumático de la válvula elegida

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En el esquema que se muestra en la Figura anterior, los números significan según las normas CETOP (Comité Europeo de Transmisiones Oleohidráulicas y Neumáticas) lo siguiente:

- 1 = Alimentación de aire comprimido
- 2 y 4 = Salidas de trabajo
- 3 y 5 = Escape de aire

La sigla Uw se refiere a la señal de control que se le envía a la válvula(1) y, como se aprecia, la válvula cuenta con su propio lazo cerrado, de ahí el término servoválvula.

### 1.- Características de la Válvula

La válvula pertenece a la serie de válvulas proporcionales de accionamiento eléctrico que influye en el caudal, excitándose con una señal eléctrica analógica. La señal de salida neumática se comporta proporcionalmente con respecto a la señal

de entrada estando la válvula cerrada en posición central. El cuadro 3-1 muestra los datos técnicos de la válvula.

Cuadro 3-1. Datos técnicos de la válvula MPYE

CARACTER	PROPIEDADES
Función de conmutación	Válvula de 5/3 vías, centro cerrada
Principio de funcionamiento	Corredera
Elemento funcional	Émbolo
Clase de mando	Directo
Tipo de fijación	Taladro
Diámetro nominal	8 mm
Presión de servicio mín.	0 bar
Presión de trabajo máx.	10 bar
Temperatura ambiente mín.	0 °C
Temperatura ambiente máx.	50 °C
Temperatura de fluido mín.	5 °C
Temperatura de fluido máx.	40 °C
Tensión de servicio nominal (DC)	Tensión mín. (DC)
Tensión mín. (DC)	17 V
Tensión máx. (DC)	30 V
Ondulación residual	5 %
Consumo de potencia máx.	20 W
Valor nominal tensión mín.	0 V
Valor nominal tensión máx.	10 V
Histéresis máx.	0,4 %
Peso	0,53 Kg
Caudal nominal	1400 l/min
Fluido de servicio	Aire comprimido filtrado (5µm), no lubricado

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.- Modo de Operación

Como se observa en el cuadro anterior, los valores nominales de tensión mínima y máxima determinan el rango de voltaje de la señal de control, teniendo entonces la posición de cierre de la válvula en un valor de tensión nominal igual a 5V. Por lo tanto, si se varía la tensión de 5V a 0V, atendiendo el código de números de la Figura 3-3, las condiciones de la válvula quedarían como se indica a continuación: El caudal aumenta en la salida 2 por lo que la alimentación del aire



queda de 1 a 2 y el escape de aire se da de 4 a 5. Ahora, si se varía la tensión de 5V a 10V las condiciones son: El caudal se incrementa en la salida 4 con lo que la alimentación del aire queda definida de 1 a 4 y el escape de aire se establece de 2 a 3.

La correspondencia entre la variación del caudal y la variación de la tensión nominal en la válvula se puede corroborar mediante el desplazamiento que sufre la corredera. El desplazamiento se puede observar por la ventanilla que posee la válvula. De esta forma, si la tensión nominal no varía de los 5V, la corredera estará en posición central sin moverse. Al variar la tensión de 5V a 0V la corredera se moverá en dirección a la ventanilla, y al variar la tensión de 5V a 10V la corredera se desplazará en la dirección opuesta. La figura 3-4 muestra la válvula utilizada.

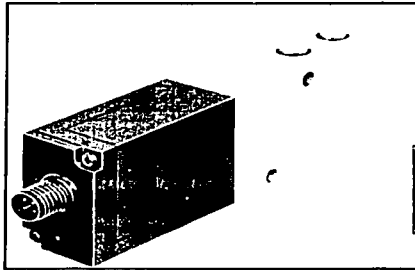


Figura 3-4. Válvula proporcional

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cabe mencionar que la señal de control que se le envía a la válvula, es generada por la tarjeta de adquisición de datos PCI6024E según las propiedades que el usuario desea que tenga el movimiento de la plataforma o del actuador propiamente hablando, recurriendo para ello al programa diseñado para tal efecto. Para un mayor entendimiento en el próximo capítulo trataré sobre el lazo de control de la servoválvula y el sistema de adquisición de datos.

## IV.- Diseño del Control y Sistema DAQ

Para implementar el circuito de control para la Mesa Vibradora, se me indicó basarme en el control proporcional de una cámara triaxial cíclica MTS existente en el laboratorio, para lo cual se me proporcionó el esquema del circuito de control de dicha cámara y así obtener el circuito.

Antes de abordar la explicación del funcionamiento del circuito de control, daré una breve explicación sobre la teoría de control involucrada en esta aplicación.

### A.- Conceptos Básicos de Control

Enseguida daré algunas definiciones que ayuden a comprender los conceptos que se adoptaron para la implementación del control de la Mesa Vibradora.

**Definiciones:** La *variable controlada* es la cantidad o condición que se mide y controla. La *variable manipulada* es la cantidad o condición modificada por el controlador, a fin de afectar la variable controlada. Normalmente la *variable controlada* es la salida del sistema. *Control* significa medir el valor de la variable controlada del sistema, y aplicar al sistema la variable manipulada para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto al valor deseado. En este caso la variable controlada es el desplazamiento de la plataforma móvil y la variable manipulada es la señal proporcional que se le aplica a la servoválvula.

**Control realimentado:** Es una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, realizándolo sobre la base de esta diferencia. Entonces éste tiende a mantener una relación preestablecida entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y utilizando la diferencia como medio de control.

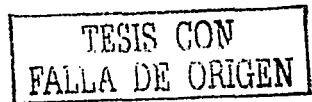
La señal de error actuante, que es la diferencia entre la señal de entrada y la de realimentación, entra al controlador para reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado.

**Servosistema:** Es un sistema de control realimentado o de lazo cerrado en el que la salida es algún elemento mecánico, sea posición, velocidad o aceleración. Nótese que se denomina también de esta forma a los sistemas de control cuya salida debe seguir con exactitud una trayectoria determinada en el espacio. Cabe mencionar que la ventaja de lazo cerrado, es que la respuesta del sistema es relativamente insensible a perturbaciones externas y a variaciones internas de parámetros del sistema, de este modo es posible utilizar componentes relativamente imprecisos y económicos, y lograr la exactitud de control requerida en determinada planta.

**Controlador automático:** Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (valor deseado), determina el error y produce una señal de control que reducirá el error a cero o a un valor muy pequeño. La forma como el controlador automático produce la señal de control se denomina *acción de control*.

Los controladores se pueden clasificar de acuerdo con sus acciones de control de la siguiente forma:

- Encendido-Apagado
- Proporcionales (P)
- Integrales (I)
- Proporcional-Integral (PI)
- Proporcional-Derivativo (PD)
- Proporcional-Integral-Derivativo (PID)



El controlador que se dispuso en la Mesa Vibradora fue el proporcional (P) dadas las características del movimiento y de la servoválvula elegida para el control del actuador y de la plataforma, además de que la realimentación proporcional incrementa la rapidez con que se lleva a cero el error(4). La figura 4-1 ilustra el controlador de la Mesa Vibradora.

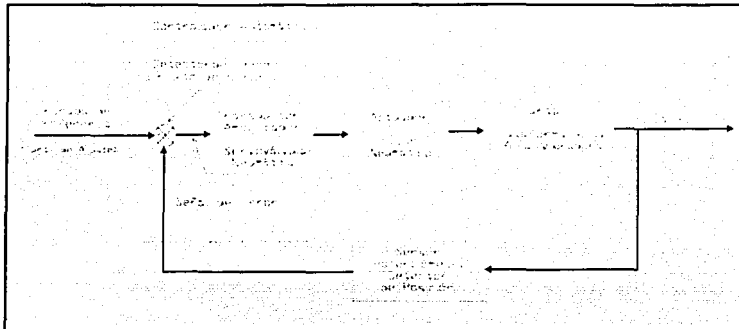


Figura 4-1. Diagrama de bloques del sistema de control de la Mesa Vibradora

**Acción de control proporcional:** Para un controlador proporcional, la relación entre la salida del controlador  $u(t)$  y la señal de error  $e(t)$ , es:

$$u(t) = K_p * e(t)$$

O sea que la señal realimentada se hace linealmente proporcional al error presente en la salida. En transformada de Laplace se expresa como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

donde  $K_p$  es la ganancia proporcional.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Sin importar el mecanismo en sí y la potencia que lo alimenta, el controlador proporcional es esencialmente un amplificador con ganancia ajustable(7).

Enseguida describiré el funcionamiento del circuito electrónico de control o detector de error que implementé para la Válvula proporcional neumática de la Mesa Vibradora.

## **B.- Circuito de Control para la Servoválvula**

La tarjeta grande que se localiza a un lado de la PC contiene todo el servo-circuito, es decir, el control de ganancia de la servo-válvula, además de poseer la conexión a la tarjeta de adquisición de datos de la PC, por lo tanto, es en esta tarjeta donde se dispuso el orden de correspondencia entre los sensores y los canales de la tarjeta de adquisición de datos.

El circuito de control que implementé para la válvula proporcional se muestra en la figura 4-2. El circuito de control proporcional es muy simple como lo muestra su esquema, consta de cuatro amplificadores operacionales, conformando cada uno de ellos una etapa.

En la primera etapa o amp-op (1), éste está configurado como seguidor, proporcionando una ganancia unitaria y acoplado el voltaje de corriente directa del potenciómetro polarizado de +10V a -10V hacia la siguiente etapa del circuito, la cual verá como carga, actuando con una impedancia de entrada alta y una impedancia de salida baja(7). El voltaje de salida de esta primera etapa, a la que llamaré señal de directa, pasa a la segunda etapa por medio de una resistencia de 10k, sumándose a su vez con la señal senoidal generada vía software por LabVIEW a través de una resistencia de 9.53k. La suma de las señales de directa y la generada en software a la que llamaré señal objetivo conforman la entrada diferencial del segundo amp-op (2), teniendo a su vez como entrada no diferencial

la señal de retroalimentación o bien a la que denominaré señal medida y que es obtenida mediante el detector de posición acoplado al actuador neumático.

El amp-op (2) está configurado de tal forma que efectúa una diferencia entre sus señales de entrada, por lo que la salida estará definida por la resta de la señal medida y la señal objetivo, dando lugar esta operación a la llamada señal de error (e).

$$\text{Señal Medida} - \text{Señal Objetivo} = \text{Error} = e$$

El error se realimenta a la señal mediante una resistencia de 10k y se envía a un divisor de tensión constituido por un potenciómetro de 10k y una resistencia de 560  $\Omega$ .

El tercer amp-op (3) está configurado como amplificador no inversor o multiplicador de ganancia constante, donde la resistencia de realimentación es de 930k y una resistencia a tierra de 2.7k. Hasta esta etapa la señal que se obtiene es de un rango de tensión que va de los +10V a los -10V la cual es una señal inapropiada para el control de la servoválvula proporcional debido a que sólo admite señales de 0V a 10V; por lo que la siguiente etapa con el amp-op (4) se diseñó para dividir por un factor de dos a la señal y sumarle 5V, y tener una señal apropiada para la servoválvula. A la salida de esta cuarta y última etapa se encuentra un limitador de tensión compuesto por dos diodos, los cuales anclan el valor de la señal al rango de tensión requerido por la válvula proporcional(s).

Para finalizar con el tema del control una vez descrito el funcionamiento del circuito de control daré las expresiones matemáticas que describen al circuito de control proporcional.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Primeramente definiré al voltaje de salida de la etapa (1) como  $V_1$ , a la señal objetivo como  $V_{obj}$ , a la señal medida como  $V_{med}$  y al error como  $e$ , entonces, siendo estas las definiciones, la ecuación de la etapa (1) y (2) queda:

$$e = (1/2) * (1 + 10k / 4.88k) * V_{med} - (V_1 + (10k / 9.53k) * V_{obj}) \dots\dots\dots(1)$$

Dado que el error va hacia el divisor de tensión, definiré como  $K$  al factor de ganancia propio de la variación a la que se ajuste el potenciómetro de  $10k$ , por lo que la salida del amp-op (3)  $V_{out3}$  queda descrita de la siguiente forma:

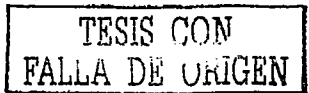
$$V_{out3} = e * K (1 + 930 k / 2.7 k) \dots\dots\dots(2)$$

Como ya lo indiqué, hasta este momento la señal tiene un rango de tensión de  $\pm 10V$ , por lo que el voltaje de salida de la tercera etapa entra a la siguiente etapa, de aquí que la ecuación de salida  $V_{inval}$  de esta última etapa sea:

$$V_{inval} = 5[V] - V_{out3} / 2 \dots\dots\dots(3)$$

Si se reducen algebraicamente las ecuaciones 1 y 2 y se sustituyen en la ecuación 3 obtenemos finalmente la ecuación (4) de salida del circuito de control proporcional que tiene un rango de tensión que acepta la válvula de  $0V$  a  $10V$ .

$$V_{inval} = 5[V] - [263.401 * V_{med} * K - (172.72 * V_1 + 181.186 * V_{obj}) * K] \dots\dots(4)$$



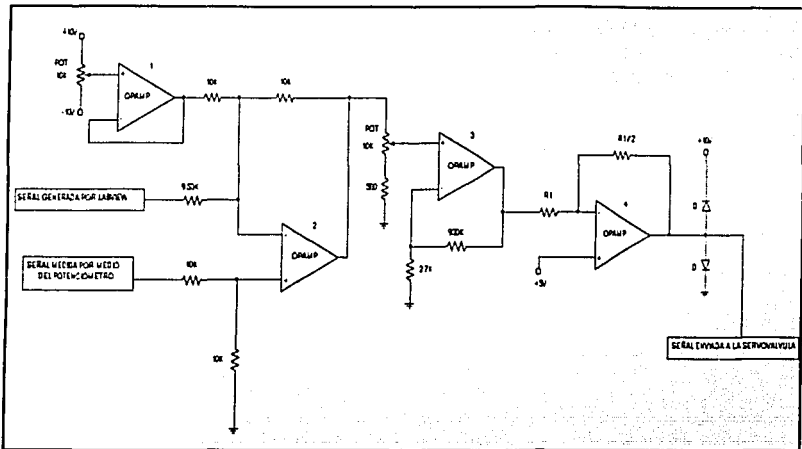


Figura 4-2. Esquema del circuito electrónico de control proporcional para la Mesa Vibradora

- 1) Primera etapa, 2) Segunda etapa, 3) Tercera etapa, 4) Cuarta y última etapa.

### C.- Sistema de Adquisición de Datos DAQ

Una vez definido el control, daré paso a la explicación del sistema de adquisición de datos (DAQ) de la Mesa Vibradora.

El objetivo de la Mesa Vibradora, como su nombre lo indica, es someter un objeto montado en ella a vibración. De dicho objeto se pueden obtener una serie de magnitudes físicas como son desplazamientos y aceleraciones, será necesario convertir dichas señales a otras de naturaleza distinta pero equivalente, en este caso a una diferencia de potencial o voltaje, para que la computadora determine la magnitud de dichas señales físicas. Este proceso de conversión de una variable física a otra lo realizan los dispositivos llamados transductores.



En cualquier sistema de adquisición de datos, se requiere de una etapa previa en la cual, después de que los transductores realizaron su tarea, la señal resultante debe ser acondicionada para que el dispositivo de adquisición de datos la capture con precisión. La figura 4-3 muestra los componentes de un sistema DAQ basado en PC.

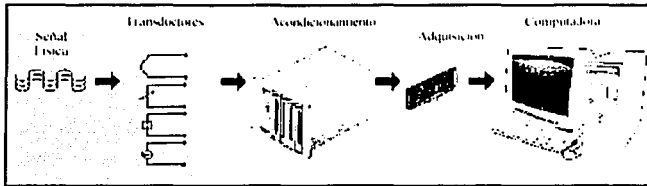


Figura 4-3. Esquema de un sistema DAQ basado en PC

## 1.- Transductores de la Mesa Vibradora

El sistema de la Mesa Vibradora cuenta con dos transductores de desplazamiento (LVDT y potenciómetro) y con cuatro de aceleración (acelerómetros).

### 1.a.- Definición, Funcionamiento y Descripción del LVDT

El Transformador Diferencial Variable Lineal es un dispositivo de sensado de posición que provee un voltaje de CA proporcional al desplazamiento de su núcleo que pasa a través de sus arrollamientos como se ve en la figura 4-4.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

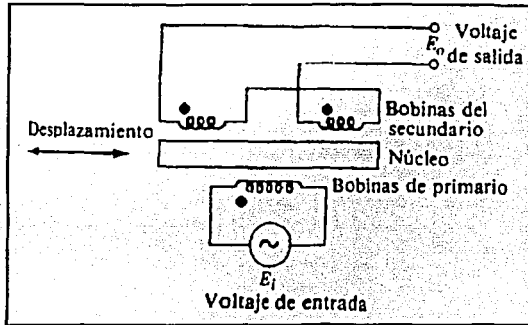


Figura 4-4. Diagrama de un transformador diferencial(6)

Se aplica un voltaje alterno de entrada en la bobina central, y el voltaje de salida de las dos bobinas de los extremos depende del acoplamiento magnético entre el núcleo y las bobinas. La construcción del dispositivo se ilustra en la figura 4-5.

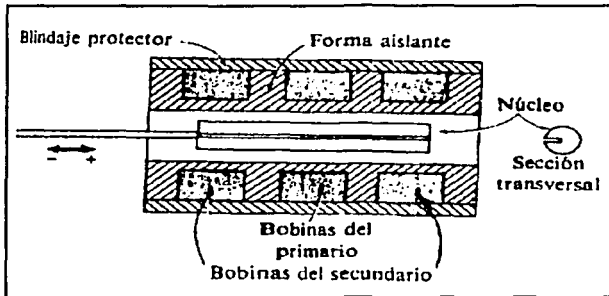


Figura 4-5. Construcción de un transformador lineal variable (LVDT)(6)

Este acoplamiento depende, a su vez, de la posición del núcleo; por lo tanto, el voltaje de salida del dispositivo es una indicación del desplazamiento del núcleo. En tanto el núcleo permanezca cerca del centro, la salida es bastante lineal como se indica en la figura 4-6, que además considera la relación de fases del voltaje de salida en tanto que la gráfica "V" de la figura 4-7 indica la magnitud absoluta de la salida. Hay un corrimiento de fase de  $180^\circ$  de un lado de la posición nula a la otra(6).

En las cercanías de la posición nula se encuentra una condición ligeramente no lineal, como se ilustra en la figura 4-7, sin embargo ésta es una condición prácticamente despreciable, sobre todo si se toma en cuenta que la escala de la gráfica esta alrededor de los  $500(\mu\text{m})$  a escala completa, en el caso del LVDT de la Mesa Vibradora, el desplazamiento total utilizado asciende a  $152.4(\text{mm})$ ,  $76.2(\text{mm})$  en cada dirección después de ubicar la mitad del recorrido como el punto cero.

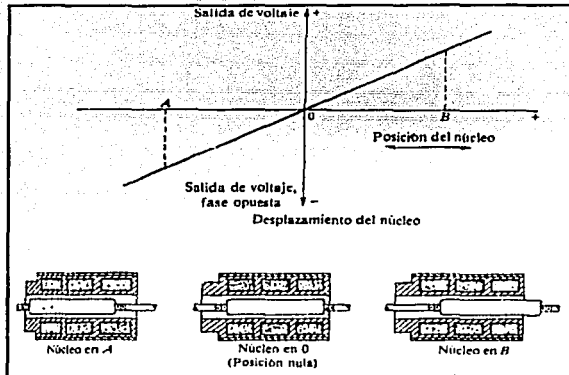


Figura 4-6. Características de salida de un LVDT(6)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

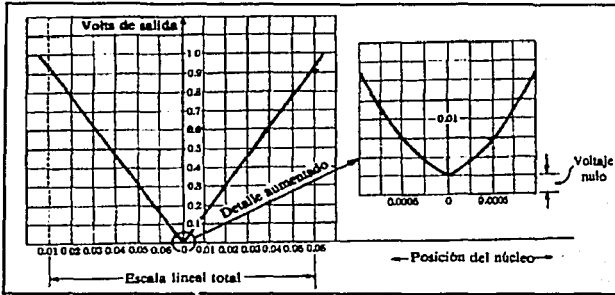


Figura 4-7. Gráfica de voltaje para un LVDT que muestra el comportamiento no lineal en la región nula(6)

La gama lineal de los transformadores diferenciales comerciales se especifica con claridad y los dispositivos rara vez se usan fuera de esta gama, también la ubicación del punto nulo es sumamente estable y constante, parejo sobre una amplia gama de temperatura de funcionamiento(11).

La ausencia de fricción entre el núcleo y el cuerpo durante la operación normal permite que un LVDT responda muy rápido a los cambios de posición del núcleo. La respuesta dinámica de un sensor LVDT está limitada solamente por los efectos inerciales de la masa delgada del núcleo. Más frecuentemente, la respuesta de un sistema de sensado LVDT es determinada por las características del acondicionador de señal(11).

El LVDT que se utilizó en la Mesa Vibradora es de la serie 3000HR de SCHAEVITZ, cuenta con un desplazamiento total del núcleo de  $\pm 7.62\text{cm}$ , y se dispuso de tal forma que el blindaje protector se fijó a la plataforma móvil, mientras que su núcleo se unió a través de un vástago de bronce a la base del modelo mecánico de masas para así determinar el desplazamiento del modelo con respecto a la superficie móvil (Apéndice A).

Como acondicionador de señal para este caso, se utilizó el LDX-3A fabricado por OMEGA Technologies Company, que tiene como función primordial amplificar la señal del LVDT (*Apéndice A*).

### 1.b.- Potenciómetro

El detector de desplazamiento que se utilizó para medir la posición en el tiempo del actuador neumático y por ende la posición de la plataforma, es de la marca FESTO al igual que el actuador y la válvula neumática proporcional (Figura 4-8). Este detector de posición no es más que un potenciómetro lineal proporcional que entrega un voltaje proporcional a la posición de su riel arrastrador que cuenta con una carrera de 300 mm.

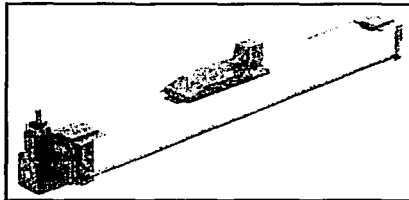


Figura 4-8. Detector de posición MLO-POT-300-TLF de la Mesa Vibradora

### 1.c.- Acelerómetros

El elemento activo de un acelerómetro está constituido por uno o varios discos (o barras) piezoeléctricos sometidos en la parte superior o lateralmente a cargas representadas por una o varias masas sísmicas y mantenido en posición mediante un soporte rígido. La señal eléctrica producida por el elemento piezoeléctrico será proporcional a la aceleración a la que se halle sometido dicho

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

transductor y puede medirse electrónicamente y utilizarse para medir con gran precisión la amplitud de la vibración, la frecuencia y la forma de onda(11).

La sensibilidad de los acelerómetros se expresa en unidades de tensión por unidades de aceleración [mV/G] y no depende solamente del tipo y tamaño del piezoeléctrico, sino también del peso de las masas sísmicas que actúan como carga.

La respuesta en frecuencia de los acelerómetros y la precisión en las mediciones dependen de la calidad del montaje. El mejor de todos es el que se realiza fijando al acelerómetro sobre una superficie plana y lisa mediante un tornillo y tuerca.

Los cuatro acelerómetros que se utilizaron son de la marca Crossbow, de propósito general CXL04LP3 (Figura 4-9), de la serie LP. Tienen un rango de  $\pm 4$  g, teniendo un nivel de tensión de 2.5V para la gravedad cero y determinan aceleraciones en los tres ejes coordenados, además de que se pueden conectar directamente a los dispositivos de adquisición sin necesidad de una etapa de acondicionamiento.



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Figura 4-9. Acelerómetro utilizado

El siguiente cuadro muestra las especificaciones de los acelerómetros según el fabricante.

Cuadro 4-1. Especificaciones de los acelerómetros

Especificaciones	
<b>De Desempeño</b>	
Rango (g)	$\pm 4$
Cero (g)	$\pm 0.2$
Sensibilidad (mV/g)	$500 \pm 25$
Sensibilidad Transversal (%Span)	$\pm 5$
No Linealidad (%FS)	$\pm 0.2$
Error de alineación (deg)	$\pm 2$
Ruido (mg rms)	10
Ancho de Banda (Hz)	Dc-100
<b>Ambientales</b>	
Rango de Temperatura de Operación (°C)	-40 to +85
Choque (g)	2000
<b>Eléctricas</b>	
Voltaje de Alimentación (V)	+5.0
Voltaje de Alimentación R-option (VDC)	+8.0 to 30
Corriente de Alimentación (mA)	5/axis
Salida de Cero g (V)	$\pm 2.5 \pm 0.1$
Amplitud de Salida (V)	$\pm 2.0 \pm 0.1$
Impedancia de Salida	$> 10k\Omega, < 1nF$
<b>Físicas</b>	
Tamaño	1.90cm*4.76cm*2.54cm
Peso	46gr

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## 2.- Adquisición

La adquisición de las señales de medición se realiza a través del bus PCI con una tarjeta de National Instruments denominada PCI6024E cuyo diagrama de bloques se presenta en la figura 4-8.

La Mesa Vibradora hace uso de los 16 canales de entrada analógica que posee la tarjeta para adquirir las señales provenientes de los seis transductores, y de uno de sus 2 canales de salida analógica para mandar al circuito de control





En síntesis, el sistema de la Mesa Vibradora quedó conformado como lo muestra el diagrama de bloques mostrado a continuación.

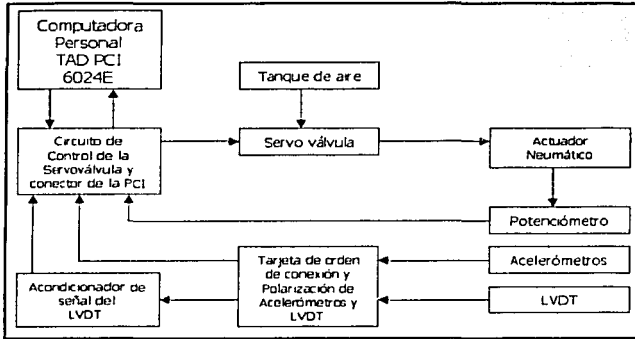


Figura 4-9. Diagrama de bloques que ejemplifica el sistema de la Mesa Vibradora

Para controlar y administrar los recursos de la tarjeta, programé una interfaz en LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), siendo éste un lenguaje de programación gráfica que facilitó la programación misma y redujo el tiempo destinado a esta actividad. En el siguiente capítulo describiré las etapas que conforman dicha interfaz así como su modo de uso.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## V.- Manual de uso del programa

El manual abarca las tres etapas del programa elaborado en LabVIEW para el control de la Mesa Vibradora. Estas etapas son *Calibración*, *Operación y Resultados*, estando estas dos últimas etapas englobadas en un mismo panel de control llamado *Principal1* el cual se encuentra en la librería de nombre operación.

A continuación describiré respectivamente cada una de las etapas en el orden antes mencionado.

### A.- Calibración

La ventana de Calibración contiene varios paneles frontales que están guardados en la librería denominada "Calibración Mesa", cuyo ícono esta integrado al escritorio de la pantalla de la computadora que controla a la mesa vibradora para mayor comodidad.

El primer panel de esta etapa es el comprendido por el menú de calibración el cual se ilustra en la siguiente figura 5-1.

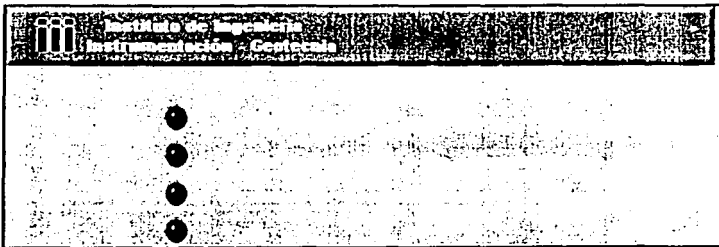


Figura 5-1. Menú de calibración

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Como se puede observar en la figura 5-1, este menú consta de cuatro opciones a las cuales se puede acceder haciendo click con el botón izquierdo del ratón en la casilla de verificación ubicada a la izquierda de la ventana.

Las opciones que se describen en el siguiente inciso son *Calibración experimental*, *Calibración teórica de transductores*, *Pruebas de transductores* y *Salir*.

### 1.- Calibración Experimental

Esta opción denominada *Calibración transductores* tiene como finalidad, calcular tanto la pendiente como la ordenada de calibración de los transductores de desplazamiento (**Potenciómetro** y **LVDT**) mediante un método de coeficientes lineales aplicado a una colección de pares de puntos: Desplazamiento vs. Voltaje.

Tanto la pendiente como la ordenada son datos que se colocarán en una opción posterior del menú de calibración cuando sea requerido, con el propósito de obtener los resultados de las mediciones en unidades del sistema internacional.

Al seleccionar esta opción el usuario ingresará a dos nuevos paneles frontales, siendo el panel de *Selector de límites de conversión* (Figura 5-2) el primero con el que deberá interactuar el usuario.

Figura 5-2. Selector de límites de conversión

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En este panel el usuario selecciona el transductor a calibrar así como los límites de voltaje de conversión de la tarjeta y las unidades en las que se calibrará el transductor seleccionado.

Como se puede apreciar en la figura 5-2 las opciones de *Límites*, *Transductor* y *C.Cal.Patrón* (Constante de Calibración Patrón) pueden ser fijadas utilizando las flechas a la izquierda de cada recuadro o bien escribiendo la opción deseada como en el caso de la constante de calibración.

Cabe señalar que la constante *C.Cal.Patrón* para el caso de ambos transductores de desplazamiento es uno (1.00).

Las unidades se pueden escribir directamente al posicionarse en el recuadro perteneciente a *unidades*.

Una vez fijadas todas las opciones el usuario deberá hacer click en el botón de *TERMINAR* para salir de este panel y pasar a la ventana que se muestra en la figura 5-3.

Este panel se denomina como *Calibración Transductores* y muestra una pantalla en la cual se grafica la línea que se ajuste mejor a la colección de puntos dados por el Desplazamiento vs. Voltaje.

El desplazamiento esta dado en milímetros y se determina manualmente por el usuario, introduciéndolo en la opción con nombre *indicador*, mediante el posicionamiento del cursor en el recuadro y escribiendo la constante de desplazamiento en milímetros. Una vez que el usuario escribió el desplazamiento deberá hacer click en el botón *Tomar lectura*, con lo que automáticamente el programa proporcionará la pendiente y la ordenada del transductor que se esté calibrando y que además deberá corresponder con la leyenda de título que se

encuentra en la parte superior derecha del panel frontal que a manera de ejemplo para el caso mostrado en la figura 5-3, es el transductor a calibrar es el LVDT.

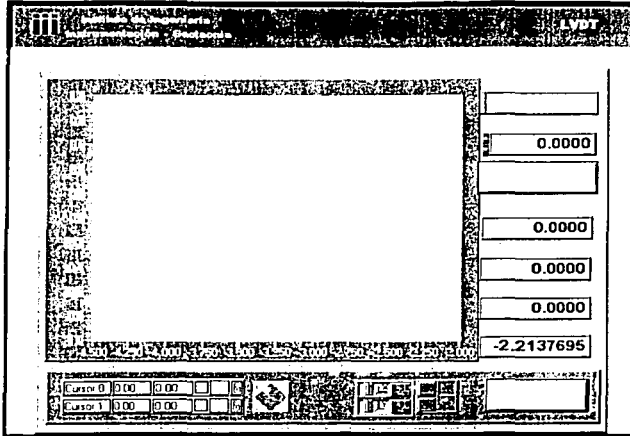


Figura 5-3. Calibración Transductores

En el procedimiento para la captura del desplazamiento se recomienda que se efectué hasta tener por lo menos diez puntos, para así obtener una pendiente precisa.

Mientras el usuario este dentro de este panel, la tarjeta estará adquiriendo el voltaje del transductor en cuestión, de ahí que el usuario puede ver esta variable en el recuadro indicador de nombre *Volts*.

El recuadro indicador llamado *Valor Real* muestra el producto entre el valor de *indicador* y el valor de *C.Cal.Patrón* del panel *Selector de límites de conversión*,

de ahí que los transductores de desplazamiento de la mesa vibradora el *indicador* y el *Valor Real* son iguales.

Los botones que se encuentran debajo de la pantalla conforman las opciones para la graficación de la recta de calibración; mientras que el botón *SALIR* es para regresar al menú. Además, verifica si el usuario desea guardar las constantes de calibración generadas en este panel, las cuales se guardan en la carpeta *C:\CalTrans\Transductores\nombre del transductor calibrado*.

## 2.- Calibración Teórica de Transductores

Esta opción tiene como finalidad la captura de las constantes de calibración, como son la pendiente y la ordenada de cada uno de los transductores de la mesa; siendo el panel frontal el que se muestra en la figura 5-4.

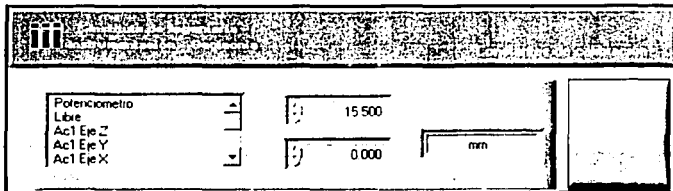


Figura 5-4. Panel de Calibración Teórica

Se puede observar que en este panel aparecen cuatro recuadros, tres de ellos etiquetados (m, b y unidades).

El recuadro sin nombre (primero a la izquierda), posee una barra de desplazamiento vertical que sirve para que el usuario elija el transductor y de esa forma pueda editar posteriormente mediante los demás recuadros las constantes de calibración del transductor seleccionado.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En los recuadros marcados como  $m$ ,  $b$  y *Unidades*, el usuario escribirá los valores de la pendiente y de la ordenada, así como las unidades empleadas respectivamente. Cabe mencionar de que la pendiente y la ordenada de los transductores de desplazamiento son las que se obtuvieron en la opción de calibración anterior, sin embargo, las constantes de los acelerómetros son proporcionadas por el fabricante de estos dispositivos y no se escriben tal cual, sino que se someten a un algoritmo que se dará a conocer más adelante.

Luego de proporcionar las constantes de los transductores el usuario deberá hacer click en el botón *Terminar* para salir de esta opción y regresar al menú, además de que se verificará si se desean guardar las constantes de calibración escritas en este panel.

### 2.a.- Algoritmo para Pendiente y Ordenada en Acelerómetros

El fabricante proporciona las constantes de los acelerómetros (marca Crossbow) dando un Offset (*Ordenada*) y una Sensibilidad (*Pendiente*), las cuales se operan de la siguiente forma para obtener los valores que se requieren para la opción de *Calibración Teórica de Transductores*.

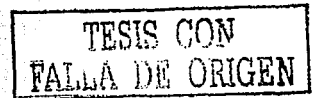
Para obtener la pendiente se aplica la siguiente ecuación:

$$m = 1 / \text{Sensibilidad}$$

Para obtener la ordenada se utiliza la ecuación siguiente:

$$b = \text{Offset} / \text{Sensibilidad}$$

Una vez aplicadas las ecuaciones anteriores, los resultados obtenidos se escribirán en la opción de *Calibración teórica de Transductores* respectivamente en los recuadros de esta opción.



### 3.- Prueba de Transductores

Esta es una opción de prueba para verificar que la tarjeta está adquiriendo las señales proporcionadas por los transductores. Esta etapa se realiza de forma manual por lo que los transductores deberán ser operados directamente por el usuario y comprobar su respuesta mediante esta opción, cuyo panel esta ilustrado en la figura 5-5.

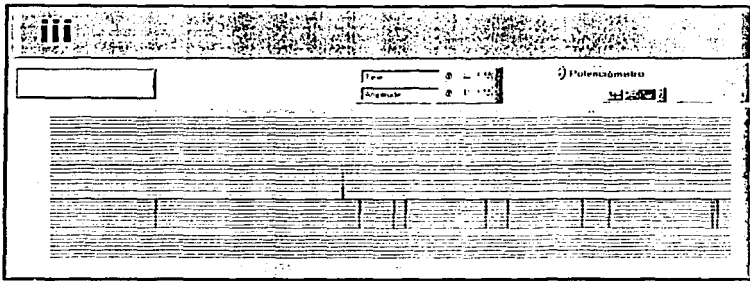


Figura 5-5. Prueba de Transductores

Como se observa en la figura anterior, el panel solamente cuenta con una pantalla que muestra la perturbación del transductor, el cual es seleccionado por el usuario mediante el recuadro denominado *Sensor*.

Si el usuario termina la prueba y determina salir de esta opción, debe hacer click en el botón *Regresar* para retornar al menú de calibración.

### 4.- Salir

Esta opción tiene como finalidad permitir al usuario salir del menú de calibración.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## B.- Operación

La etapa de operación esta guardada en una librería denominada *Operación* y cuyo ícono también esta integrado al escritorio de la computadora.

Esta etapa consta de dos paneles frontales a los que se puede llegar mediante el menú de operación que muestra dos opciones (Figura 5-6), el cual se maneja de la misma manera que el menú de calibración (Figura 5-1).

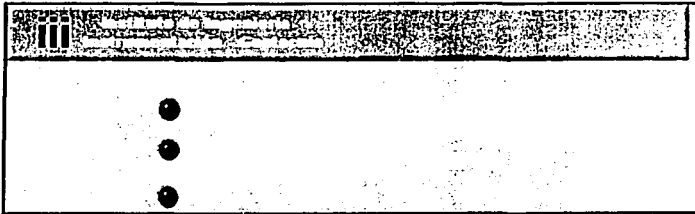


Figura 5-6. Menú de Operación de la mesa vibradora.

### 1.- Señal con Patrón Senoidal

Cabe mencionar que en esta etapa la computadora actúa como generador de funciones de excitación de la mesa vibradora.

Si el usuario desea hacer uso de la primera opción del menú de Operación deberá hacer click en el botón situado a la izquierda de la leyenda, con lo que posteriormente aparecerá el panel que se muestra en la figura 5-7.

Esta opción se caracteriza por la señal de excitación que el sistema le proporciona a la mesa vibradora, la cual es un patrón senoidal, implementado mediante una función propia de LabVIEW.

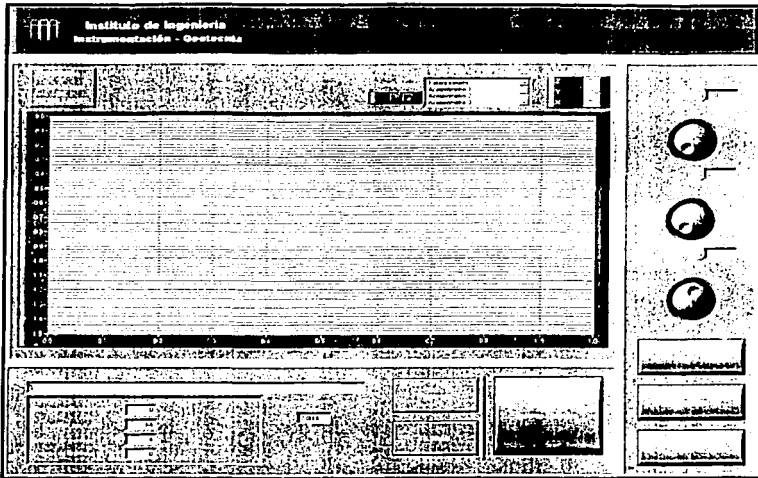


Figura 5-7. Panel de Operación con Patrón Senoidal

El panel tiene como propósito accionar la mesa mediante una señal de excitación, que la tarjeta envía a la servo-válvula; para lo cual el usuario puede determinar la frecuencia, amplitud y la posición del actuador por medio de las perillas o de los recuadros de control dispuestos a la derecha de la pantalla en el *Generador de Funciones* (Figura 5-9), manipulándolas al posicionarse en la perilla que se desee mover, y haciendo click con el mouse mientras se gira la perilla. Al seleccionar la frecuencia y la amplitud, el usuario debe tener en cuenta que a mayor *Amplitud* menor debe ser la *Frecuencia* y viceversa, por lo cual se deben determinar los límites de estas variables según el comportamiento de la mesa en cuanto a la estabilidad del sistema se refiere.

Si el usuario ya eligió la combinación que requiere en las perillas (*Frecuencia*, *Amplitud* y *Posición*), deberá hacer click en el botón *Actualizar datos* que se

encuentra debajo de las perillas antes mencionadas junto a los botones denominados *Detener* y *Salir* que serán explicados más adelante (Figura 5-9).

Poniendo de esta manera en funcionamiento a la mesa vibradora con los parámetros elegidos; y en la ventana principal de este panel aparece la señal de desplazamiento correspondiente al Potenciómetro. De igual forma si el usuario decide observar la señales de los acelerómetros, la de excitación o bien la de desplazamiento adquirida por el LVDT lo puede hacer seleccionando el transductor deseado mediante el recuadro denominado Transductores que esta ubicado en la parte superior del panel (Figura 5-8). Este recuadro contiene distintas opciones para desplegar diferentes señales con características específicas de cada opción que se explican en el cuadro 5-1.

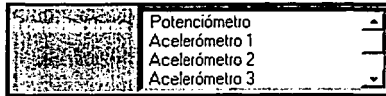


Figura 5-8. Recuadro de Selección

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Debe mencionarse que todas las señales tienen la posibilidad de filtrarse teniendo inicialmente un filtro paso bajas con frecuencia de corte de 2 Hertz. Si el usuario desea ver la señal con un frecuencia de corte diferente basta con escribir el valor deseado en la casilla ubicada en la parte inferior de este panel a un lado de los botones *Regresar* y *FILTRAR*.

Los parámetros de la mesa vibradora se pueden cambiar sin necesidad de detener la operación, para lo cual el usuario procedería de la siguiente manera:

- a) Establecer la nueva posición de las perillas de acuerdo a los valores deseados.
- b) Oprimir el botón *Actualizar datos*.

- c) Esperar unos ciclos para que el sistema se estabilice.
- d) Continuar con la operación.

Cuadro 5-1. Opciones para el despliegue de señales

OPCIÓN	SEÑAL	CANAL EN LA TARJETA	COLOR DE LA SEÑAL EN EL PANEL FRONTAL
Potenciómetro	La señal que se muestra al elegir esta opción es el desplazamiento absoluto del actuador determinado por el potenciómetro.	0	Azul Claro
Acelerómetro 1	Las señales que se obtienen al elegir esta opción corresponden a las aceleraciones registradas.	2 a 4	Eje x - Verde Eje y - Rojo Eje z - Azul Claro
Acelerómetro 2	Las señales que se obtienen al elegir esta opción corresponden a las aceleraciones registradas.	5 a 7	Eje x - Verde Eje y - Rojo Eje z - Azul Claro
Acelerómetro 3	Las señales que se obtienen al elegir esta opción corresponden a las aceleraciones registradas.	8 a 10	Eje x - Verde Eje y - Rojo Eje z - Azul Claro
Acelerómetro 4	Las señales que se obtienen al elegir esta opción corresponden a las aceleraciones registradas.	11 a 13	Eje x - Verde Eje y - Rojo Eje z - Azul Claro
LVDT	Esta señal corresponde al desplazamiento relativo entre el modelo y la base móvil	14	Azul - Claro
Componentes X	Son las aceleraciones registradas en los ejes cartesianos de X en los cuatro acelerómetros.	4	Acelerómetro 1 - Azul Claro
		7	Acelerómetro 2 - Rojo
		10	Acelerómetro 3 - Verde
		13	Acelerómetro 4 - Azul Fuerte

Una vez que el usuario ha fijado los parámetros que desea imprimirle al sistema puede seleccionar la cantidad de mediciones que desea guardar en un archivo. Esto se logra mediante los recuadros de control ubicados en la parte inferior izquierda del panel y cuyos nombres son: *Número de Muestras por evento* y *Número de eventos*.

El *número de muestras por evento* representa el número de puntos que adquirirá la tarjeta en un solo ciclo, mientras que el *Número de eventos* serán los ciclos totales que se adquirirán.

Con base a los parámetros de muestreo que el usuario seleccione para estos recuadros, al momento de pulsar el botón *Actualizar datos* se podrá percatar de que se ha calculado el tiempo en segundos que tardará la adquisición de los datos desplegándose en el recuadro indicador denominado *Tiempo de la prueba*.

Si la operación está en marcha y ya se han fijado las constantes en los recuadros de control antes mencionados el usuario podrá capturar los datos de todos los transductores en el tiempo estimado haciendo click en el botón *Iniciar Captura*. Una vez pulsado el botón de captura, se observará que el botón con la leyenda *CAPTURA Y DESPLIEGUE DE RESULTADOS* comienza a parpadear indicando que ha entrado a la etapa de Resultados.

El botón *Detener* funciona para que el usuario interrumpa la prueba de la mesa y el de *Salir* se utiliza para trasladar al usuario de esta opción y regresarlo al menú de operación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

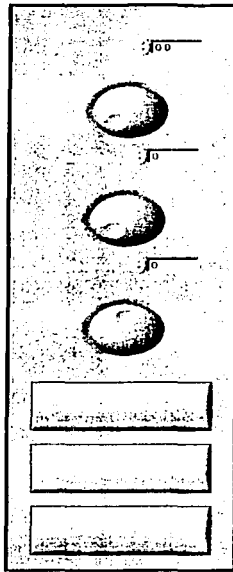


Figura 5-9. Generador de Funciones

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.- Señal con Patrón Arbitrario

Este panel (Figura 5-10) tiene el objetivo de alimentar al actuador con una señal (desplazagrama) de patrón dado por el usuario que proporcionará en forma de un archivo numérico con formato de texto delimitado por tabulaciones. Este archivo deberá contener dos columnas, donde la primera corresponde a la serie de tiempo de los puntos de la señal y la segunda columna corresponde a la amplitud de dicha señal.

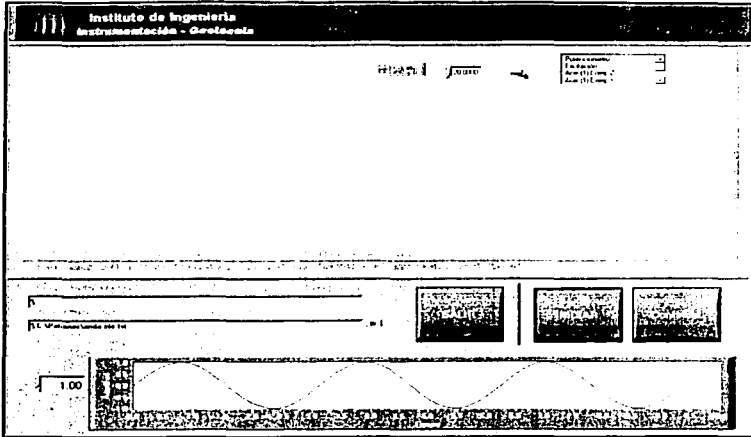


Figura 5-10. Panel de Operación con Patrón Arbitrario.

El usuario deberá guardar el archivo de la señal en la carpeta **C:\Patrones** ya que el programa, cuando es pulsado el ícono de abrir archivo (Figura 5-11), el cual se encuentra en la zona inferior del panel, accederá automáticamente a dicha carpeta.



Figura 5-11. Icono Abrir Archivo.



Es necesario mencionar que una vez elegida esta opción no se podrá salir de ella hasta que se realice al menos una prueba.

Como se observa en la figura 5-10, la pantalla superior de este panel esta deshabilitada, advirtiendo con esto al usuario que debe escribir o localizar la dirección del archivo de señal que desea imprimirle a la mesa.

Una vez que el usuario verificó que la dirección del archivo de señal está escrito en la casilla nombrada como *Archivo de excitación*, éste podrá verificar la forma de esta en la pantalla inferior del panel, además de que se cuenta con la posibilidad de modificar la amplitud de la señal en factores convenientes por medio del multiplicador ubicado a la izquierda de esta pantalla.

Cuando el usuario determina que la señal posee la amplitud adecuada entonces deberá oprimir el botón *Iniciar* con lo que se inicia en este panel la etapa de resultados.

Si el usuario ya terminó una prueba con una señal determinada y desea efectuar otra, deberá hacer click en el botón *Continuar* con lo que la pantalla nuevamente se deshabilitará procediendo a la localización del archivo de señal. Por el contrario si el usuario ya no desea continuar con otra prueba, deberá hacer click en el botón *Salir* mientras la pantalla este habilitada para regresar al menú de operación.

### **C.- Resultados**

Las etapas de resultados para ambas opciones de operación son diferentes en cuanto al uso, y las explico enseguida de forma separada de acuerdo a las opciones de operación mencionadas en los incisos anteriores. Sin embargo, los archivos numéricos resultantes tienen el mismo formato y orden. Las columnas de los archivos representan a los respectivos resultados según el cuadro 5-2 que se presenta a continuación.



Cuadro 5-2. Formato del archivo de resultados

COLUMNA	RESULTADOS DEL TRANSDUCTOR	COLUMNA	RESULTADOS DEL TRANSDUCTOR
0	dt	9	Acel. 3 Eje Z
1	Potenciómetro	10	Acel. 3 Eje Y
2	LIBRE	11	Acel. 3 Eje X
3	Acel. 1 Eje Z	12	Acel. 4 Eje Z
4	Acel. 1 Eje Y	13	Acel. 4 Eje Y
5	Acel. 1 Eje X	14	Acel. 4 Eje X
6	Acel. 2 Eje Z	15	LVDT
7	Acel. 2 Eje Y	16	LIBRE
8	Acel. 2 Eje X		

### 1.- Señal con Patrón Senoidal

Cuando la adquisición de datos ha finalizado, en la pantalla se presenta automáticamente la señal de desplazamiento del potenciómetro que se ha guardado en la carpeta **C:\Datos\nombre seleccionado por usuario** junto con las demás señales de los transductores.

El recuadro denominado *Transductores* (Figura 5-12) con barra de desplazamiento cambio las selecciones, brindándole al usuario nuevas opciones para que en la pantalla se desplieguen los resultados de forma que se puedan ver al mismo tiempo más de una señal, seleccionando las opciones del recuadro manteniendo la tecla shift oprimida para el caso en que se seleccione más de una señal con el objeto de compararlas. El usuario puede comparar señales de los tres ejes cartesianos de cada uno de los acelerómetros.

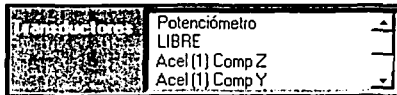


Figura 5-12. Recuadro de Selección

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Como se puede observar en la figura 5-13, al lado izquierdo del botón *Iniciar Captura* se encuentran los botones *Regresar* y *Filtrar*.

El botón *Filtrar* sirve para implementar un filtro paso-bajas a las señales resultantes que están siendo desplegadas en la pantalla en ese momento. La frecuencia de corte del filtro se puede variar mediante el mismo control numérico nombrado como *Frecuencia de corte*. Si el usuario desea nuevamente ver las señales sin filtrar, bastará con que oprima el botón con la etiqueta de *Filtrando*.

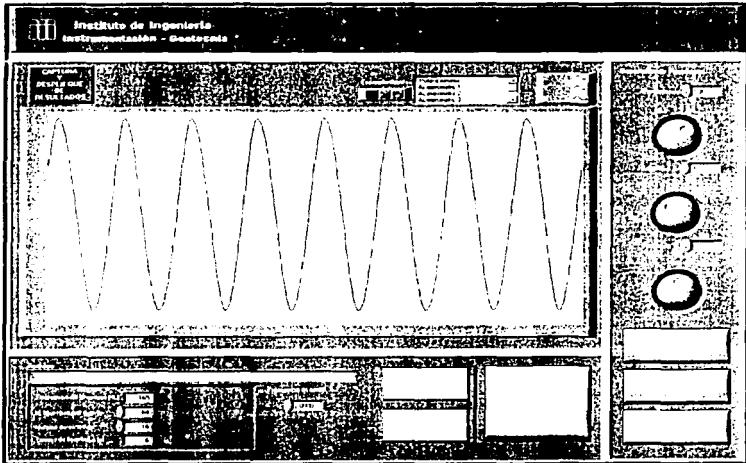


Figura 5-13. Despliegue de Resultados

Luego de que el usuario observe y manipule el filtrado de los resultados deberá oprimir el botón de *Regresar* para volver a la operación de la mesa.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.- Señal con Patrón Arbitrario

El objetivo de este panel es guardar las señales de los seis transductores durante el tiempo que tarde la mesa en reproducir el desplazagrama con que fue alimentado el sistema; así que el usuario puede advertir que una vez oprimido el botón de *Iniciar* la adquisición de datos comienza de igual manera que la etapa de resultados (Señal con Patrón Senoidal).

Los archivos numéricos de resultados serán guardados automáticamente en la carpeta de nombre **Datos**, en la que el usuario solamente deberá proporcionar el nombre del archivo.

Una vez que el proceso de adquisición terminó, la pantalla de esta opción (Figura 5-14) se habilitará mostrando automáticamente la señal que registró el potenciómetro. De la misma manera que en la opción de operación denominada señal con patrón senoidal, el recuadro de selección con barra de desplazamiento denominado *Transductores*, le permite al usuario la oportunidad de elegir tantas señales como requiera desplegar en la pantalla.

En la figura 5-14 se muestra en la pantalla superior las señales del potenciómetro y de la excitación, así como la señal del archivo con la amplitud afectada por el factor multiplicador desplegada en la zona inferior de la pantalla.

De igual forma que en la opción de operación (señal con patrón senoidal), en esta opción también se pueden filtrar los resultados si se desea mediante la palanca de etiqueta *Sin Filtrar* con lo cual aparecerá un control numérico que sirve para la modificación de la frecuencia de corte y la etiqueta de esta palanca cambiará a *Filtrado* (Figura 5-15).



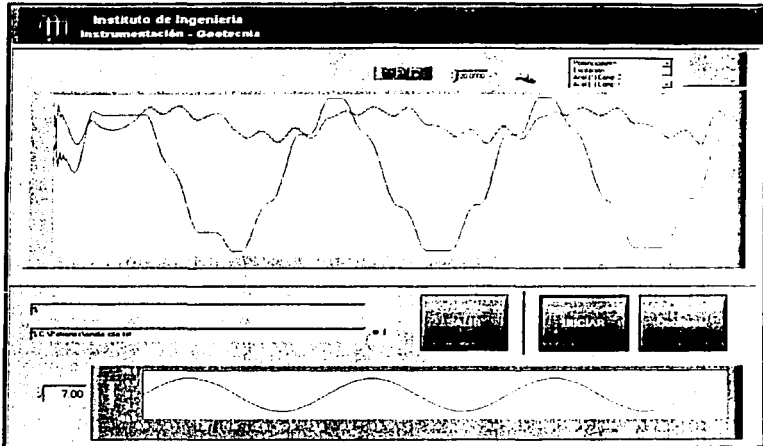


Figura 5-14. Etapa de Resultados con Patrón Arbitrario



Figura 5-15. Palanca Filtrar activado.

Si el usuario desea efectuar una nueva prueba deberá oprimir el botón *Continuar*, y si desea salir del panel entonces oprimirá el botón *Salir* para tal efecto.

## VI.- Costo y Aplicación de la Mesa Vibradora

Para finalizar con este trabajo, a continuación daré el costo total de la Mesa Vibradora así como una breve explicación sobre la aplicación de la misma.

### A.- Costo

El siguiente cuadro muestra el costo del sistema completo de la Mesa Vibradora dado en moneda nacional, según el caso, por componente.

Cuadro 6-1 Costo total de la Mesa Vibradora

COMPONENTE	COSTO
Acelerómetros (4)	\$19,634.80
Acondicionador LDX-3A	\$3,488.20
Actuador	\$10,465.00
Cable (SH6868)	\$856.00
Electrónica *	\$3000.00
Estructura y mano de obra*	\$25,000.00
LVDT	\$2,193.50
Tarjeta PCI6024E	\$7,915.50
Potenciómetro	\$3,000.00
Silenciadores (2)	\$133.40
Válvula	\$7,000.00
<b>Total</b>	<b>\$82,686.40</b>

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

\* Respecto a Electrónica se debe entender la totalidad de los componentes incluyendo las tarjetas de los circuitos impresos y cables. En cuanto a Estructura y Mano de obra se entenderá a la manufactura del cuerpo de la mesa (Figura 1-2).

### B.- Aplicación

Como se mencionó en el título de este trabajo y en la introducción, la principal aplicación de esta Mesa Vibradora es el corroborar métodos matemáticos sobre el comportamiento dinámico de los taludes mediante modelos mecánicos.

El comportamiento dinámico de los taludes ha sido objeto de intensos estudios debido al desarrollo de las obras de infraestructura, al crecimiento de las zonas urbanas y a la adecuación de zonas poco o no aptas para la construcción de obras civiles.

Es importante tener en cuenta los principales factores que influyen en la estabilidad de los taludes. Después de la geología, los movimientos de los taludes son función también de la respuesta del suelo o la roca a los cambios de la geometría, condiciones de frontera, presión de poro, variación de la resistencia en función del tiempo y de la sismicidad de la zona.

A lo largo de la historia se han realizado, modificado y perfeccionado métodos matemáticos que tratan de cubrir algún problema específico, o que se aproxime más a las condiciones del medio por analizar; esta situación no permite que un solo método pueda ser aplicado de manera adecuada, segura y confiable a todo tipo de situaciones. Es en esta parte que la Mesa Vibradora constituye una poderosa herramienta de adquisición de datos para realizar análisis más detallados y apegados al comportamiento natural del problema, además de ser una forma física (diseño de los modelos mecánicos) de comprobación de los resultados obtenidos por medio de los modelos teóricos(3).

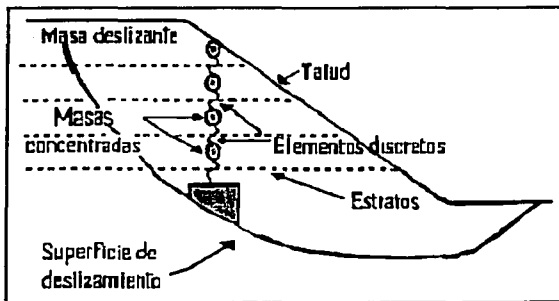


Figura 6-1. Esquema del modelo bidimensional aplicado(3)

El método que se aplica a los modelos físicos que se prueban en la Mesa Vibradora es el llamado de "Elementos discretos" (Figura 6-1). La cuña de deslizamiento está conformada por elementos discretos modelados matemáticamente como un resorte y un amortiguador en paralelo, cada uno con sus características de rigidez y amortiguamiento de acuerdo al material que representan. El efecto de la duración del sismo y del contenido de frecuencias es tenido en cuenta mediante el análisis en el dominio del tiempo. Además la superficie de la falla es definida de acuerdo a la geometría del talud, los materiales que lo conforman y la distribución de estos, pudiendo evaluar cualquier tipo de geometría(3).

Una vez definidos todos los parámetros, se modelan matemáticamente los modelos mecánicos para obtener las ecuaciones de equilibrio y de movimiento de dichos modelos y así elaborar los análisis pertinentes. Los modelos mecánicos que se someten a prueba en la Mesa Vibradora, son pequeñas estructuras metálicas, en las que se ha determinado la masa total del modelo, que está constituida por masas concentradas constituidas por placas o discos y por los elementos discretos representados en estos modelos mediante varillas de diferente material metálico que proporcionan una rigidez distinta y que por lo tanto ofrecen una dinámica distinta.

La Mesa Vibradora ayuda a determinar variables como aceleración, velocidad y desplazamiento para complementar a las ecuaciones del método de elementos discretos y efectuar análisis de interés más detallados.

## VII.- Conclusiones

El proyecto de la Mesa Vibradora se terminó, según las pruebas aplicadas al sistema, cumpliendo con los requerimientos de la coordinación de Geotecnia, además de que toda la implementación se realizó con el mínimo de costo, tomando en cuenta que el Instituto de Ingeniería ya contaba con la propiedad de la licencia del software LabVIEW.

Es necesario señalar que la aplicación que se expuso brevemente en este trabajo de la Mesa Vibradora, solamente es una pequeña muestra de la gran variedad de pruebas, experimentos e investigaciones que realizarán a futuro con ésta los Ingenieros Geofísicos, por ejemplo, a parte del modelado de taludes, se han comenzado a efectuar pruebas relacionadas con la determinación de coeficientes de fricción.

El software de control se realizó de tal forma que sean posibles mejoras posteriores, dadas las características de la Mesa en cuanto al tipo de sensores o inclusive en cuanto al número de estos. Una de las mejoras que se podrían efectuar posteriormente podría ser el cambio del sistema neumático por un sistema hidráulico para de esta forma incrementar la capacidad de carga de la Mesa Vibradora y elevar el desempeño de la etapa de *patrón arbitrario* que se requirió como último objetivo del proyecto.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM cuenta ahora con una tecnología desarrollada completamente dentro del mismo Instituto con la puesta en marcha de esta Mesa Vibradora, aportando así una herramienta bastante poderosa a la investigación de la Mecánica de suelos.



Aparte de que este trabajo me permitió cumplir con un requisito para la carrera de Ingeniería Eléctrica-Electrónica para mi titulación, también gracias a él pude obtener nuevos conocimientos del área y reafirmar que la electrónica es la punta de lanza en el desarrollo tecnológico del mundo, vislumbrando los grandes alcances y aplicaciones que tiene en cualquier campo científico y técnico.

También he de decir que fue muy satisfactorio para mí el participar en un proyecto que tiene unas perspectivas de uso y aplicación tan amplias como las que tiene esta Mesa Vibradora de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

El desarrollo de este tipo de proyectos debería difundirse para alentar y promover una futura introducción y competitividad de mercado, para poco a poco disociarnos de la tecnología extranjera.

## VIII.-Bibliografía

1. Antonio Gullén Salvador. 1993. Introducción A La Neumática. Barcelona, Marcombo, 154p
2. Cembranos Nistal Florencio Jesús. 1999. Automatismos Eléctricos, Neumáticos e Hidráulicos Madrid, Paraninfo, 169 p.
3. E. Botero J, M. P. Romo. 2002. Análisis Bidimensional de Taludes, UNAM, 9 p.
4. Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini. 1991. Control de Sistemas Dinámicos con Retroalimentación. Delaware, E.U.A. Addison-Wesley Iberoamericana, 603 p.
5. J.P. De Groot. 1990. Tecnología De Los Circuitos Hidráulicos. Barcelona, Ceac, 571 p.
6. J.P. Holman. 1994. Métodos Experimentales para Ingenieros. 2da. Edición México, Mc. Graw Hill
7. Katsuhiko Ogata. 1993. Ingeniería de Control Moderna. 2da. Edición, Edo. De México, Prentice Hall Hispanoamericana, 1005 p.
8. Robert L. Boylestad, Louis Nashelsky. 1997. Electrónica Teoría De Circuitos, 6ta. Edición, Edo. De México, Prentice Hall Hispanoamericana, 397 p.
9. Roca Ravell Felip. 1999. Oleohidráulica Básica. México D.F., Alfaomega, 251 p.
10. Speich, Hanno. 1972. Oleodinámica: Principios, Elementos Componentes, Circuitos Con Un Apéndice De Nomogramas Y Tablas. Barcelona, G. Gili, 592 p.
11. Información de un Documento Web basado en información de Transcoil.Com, Solartron.Com, Macrosensor.Com, Flw.Com, Trans-Tek.Com Y Rdpselectro.Com.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## IX.-Apéndice A

Especificaciones del LVDT, del Acondicionador de señal y de la tarjeta de adquisición de datos.

### A.- LVDT 3000 HR

Cuadro A-1. Especificaciones del LVDT

Especificaciones LVDT 3000 HR	
<b>Mecánicas</b>	
Peso Cuerpo	225 (gr)
Peso Núcleo	28 (gr)
Dimensiones Cuerpo	325.4 (mm)
Dimensiones Núcleo	142.2 (mm)
<b>Eléctricas</b>	
Rango lineal Nominal	$\pm 76.2$ (mm)
Linealidad ( $\pm$ % Rango completo)	0.25
Sensibilidad (mV out/ Vin per)	9.1 (mm)
Impedancia del Primario	315 $\Omega$
Impedancia del Secundario	830 $\Omega$

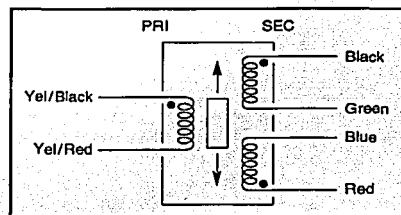


Figura A-1. Código de colores en las bobinas del LVDT

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## B.-Acondicionador de señal

Cuadro A-1. Especificaciones del LDX-3A

Mecánicas	
Peso	400g (14 oz)
Montaje	Dos tiras fijadoras con tornillos
Dimensiones	130 H * 96 W * 35 D (mm)
Eléctricas	
Suministro de Potencia	120/250 V <sub>ac</sub> 50-60 Hz
Transductor	3V <sub>max</sub> at 2.5 or 5 kHz @ 20 mA
Consumo	4 W max.
Fuse Rating	63 mA Slow Blo
Protección del Oscilador	Protección de circuito abierto-cerrado
Rango del Control de Cero	0 a 100% adjustable
Voltaje de Salida	± 5 into 10 kOhms min.
Corriente de Salida	± 20 mA into 100Ω max.
Protección de Salida	Protección de circuito abierto-cerrado
Rizo de Salida	10 mV pk/pk at 10 kHz
Filtro de Salida	2 <sup>nd</sup> orden paso-bajas fc at 250kHz or 110 Hz
Linealidad	0.05%FS
Rango de Temperatura	0 to 60 °C
Coeficiente de Temperatura	Cero: 0.02%FS/°C
	Amplitud: 0.02%FS/°C
Terminales	5-pin DIN conector

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**C.-Tarjeta de Adquisición Datos PCI6024E**

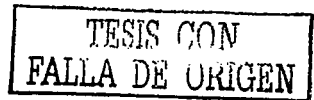
**Analog Input**

**Input Characteristics**

- Number of channels ..... 16 single-ended or 8 differential  
(software-selectable per channel)
- Type of ADC..... Successive approximation
- Resolution ..... 12 bits, 1 in 4,096
- Sampling rate ..... 200 kS/s guaranteed
- Input signal ranges ..... Bipolar only

Board Gain (Software-Selectable)	Range
0.5	±10 V
1	±5 V
10	±500 mV
100	±50 mV

- Input coupling ..... DC
- Max working voltage  
(signal + common mode) ..... Each input should remain  
within ±11 V of ground



Overvoltage protection

Signal	Powered On	Powered Off
ACH<0.15>	±42	±35
AISENSE	±40	±25

FIFO buffer size.....512 S

Data transfers.....DMA, interrupts,  
programmed I/O

DMA modes .....Scatter-gather  
(single transfer, demand transfer)

Configuration memory size .....512 words

Accuracy Information

Nominal Range (V)		Absolute Accuracy							Relative Accuracy		
		% of Reading		Offset (mV)	Noise + Quantization (mV)		Temp Drift (%/°C)	Absolute Accuracy at Full Scale (mV)	Resolution (mV)		
					Single Pt.	Averaged			Single Pt.	Averaged	
Positive FS	Negative FS	24 Hours	1 Year								
10	-10	0.0872	0.0914	6.38	3.91	0.975	0.0010	16.504	5.89	1.28	
5	-5	0.0272	0.0314	3.20	1.95	0.488	0.0005	5.263	2.95	0.642	
0.5	-0.5	0.0872	0.0914	0.340	0.195	0.049	0.0010	0.846	0.295	0.064	
0.05	-0.05	0.0872	0.0914	0.054	0.063	0.006	0.0010	0.106	0.073	0.008	

Note: Accuracies are valid for measurements following an internal I-Series calibration. Averaged numbers assume dithering and averaging of 100 single-channel readings. Measurement accuracies are listed for operational temperatures within ±1 °C of internal calibration temperature and ±10 °C of external or factory-calibration temperature. One-year calibration interval recommended. The Absolute Accuracy at Full Scale calculations were performed for a maximum range input voltage (for example, 10 V for the ±10 V range) after one year, assuming 100 pt averaging of data.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Transfer Characteristics

Relative accuracy .....  $\pm 0.5$  LSB typ dithered,  
 $\pm 1.5$  LSB max undithered

DNL .....  $\pm 0.5$  LSB typ,  $\pm 1.0$  LSB max

No missing codes ..... 12 bits, guaranteed

### Offset error

Pregain error after calibration .....  $\pm 12$   $\mu$ V max  
 Pregain error before calibration .....  $\pm 28$  mV max  
 Postgain error after calibration .....  $\pm 0.5$  mV max  
 Postgain error before calibration .....  $\pm 100$  mV max

### Gain error (relative to calibration reference)

After calibration (gain = 1) .....  $\pm 0.02\%$  of reading max  
 Before calibration .....  $\pm 2.75\%$  of reading max  
 Gain  $\neq 1$  with gain error  
 adjusted to 0 at gain = 1 .....  $\pm 0.05\%$  of reading max

## Amplifier Characteristics

### Input impedance

Normal powered on ..... 100  $\text{G}\Omega$  in parallel with 100 pF  
 Powered off ..... 4  $\text{k}\Omega$  min  
 Overload ..... 4  $\text{k}\Omega$  min

Input bias current .....  $\pm 200$  pA

Input offset current .....  $\pm 100$  pA

### CMRR (DC to 60 Hz)

Gain 0.5, 1.0 ..... 85 dB  
 Gain 10, 100 ..... 90 dB

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

### Dynamic Characteristics

Bandwidth

Signal	Bandwidth
Small (-3 dB)	500 kHz
Large (1% THD)	225 kHz

Settling time for full-scale step.....5  $\mu$ s max to  $\pm 1.0$  LSB accuracy

System noise ( $LSB_{rms}$ , not including quantization)

Gain	Dither Off	Dither On
0.5 to 10	0.1	0.6
100	0.7	0.8

Crosstalk .....-60 dB, DC to 100 kHz

### Stability

Recommended warm-up time..... 15 min.

Offset temperature coefficient

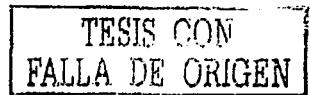
Pregain..... $\pm 15 \mu V/^{\circ}C$

Postgain..... $\pm 240 \mu V/^{\circ}C$

Gain temperature coefficient ..... $\pm 20$  ppm/ $^{\circ}C$

### Analog Output

- 6024E and 6025E only



### Output Characteristics

Number of channels.....2 voltage

Resolution..... 12 bits, 1 in 4,096

Max update rate

DMA..... 10 kHz, system dependent

Interrupts..... 1 kHz, system dependent

Type of DAC .....Double buffered, multiplying



FIFO buffer size ..... None  
 Data transfers ..... DMA, interrupts,  
 programmed I/O  
 DMA modes ..... Scatter-gather  
 (Single transfer, demand transfer)

### Accuracy Information

Nominal Range (V)		Absolute Accuracy					Temp Drift (%/°C)	Absolute Accuracy at Full Scale (mV)
		% of Reading			Offset (mV)			
Positive FS	Negative FS	24 Hours	90 Days	1 Year				
10	-10	0.0177	0.0197	0.0219	5.93	0.0005	8.127	

Note: Temp Drift applies only if ambient is greater than  $\pm 10^\circ\text{C}$  of previous external calibration.

### Transfer Characteristics

#### Relative accuracy (INL)

After calibration .....  $\pm 0.3$  LSB typ,  $\pm 0.5$  LSB max  
 Before calibration .....  $\pm 4$  LSB max

#### DNL

After calibration .....  $\pm 0.3$  LSB typ,  $\pm 1.0$  LSB max  
 Before calibration .....  $\pm 3$  LSB max

Monotonicity ..... 12 bits, guaranteed after  
 calibration

#### Offset error

After calibration .....  $\pm 1.0$  mV max  
 Before calibration .....  $\pm 200$  mV max



#### Gain error (relative to internal reference)

After calibration .....  $\pm 0.01\%$  of output max  
 Before calibration .....  $\pm 0.75\%$  of output max

## Voltage Output

Range .....	$\pm 10 \text{ V}$
Output coupling .....	DC
Output impedance .....	$0.1 \Omega \text{ max}$
Current drive .....	$\pm 5 \text{ mA max}$
Protection .....	Short-circuit to ground
Power-on state (steady state) .....	$\pm 200 \text{ mV}$
Initial power-up glitch	
Magnitude .....	$\pm 1.1 \text{ V}$
Duration .....	$2.0 \text{ ms}$
Power reset glitch	
Magnitude .....	$\pm 2.2 \text{ V}$
Duration .....	$4.2 \mu\text{s}$

## Dynamic Characteristics

Settling time for full-scale step .....	$10 \mu\text{s}$ to $\pm 0.5 \text{ LSB accuracy}$
Slew rate .....	$10 \text{ V}/\mu\text{s}$
Noise .....	$200 \mu\text{V}_{\text{rms}}$ , DC to $1 \text{ MHz}$
Midscale transition glitch	
Magnitude .....	$\pm 45 \text{ mV}$
Duration .....	$2.0 \mu\text{s}$

## Stability

Offset temperature coefficient .....	$\pm 50 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Gain temperature coefficient .....	$\pm 25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

# Digital I/O

Number of channels

6025E ..... 32 input/output

6023E and 6024E ..... 8 input/output

Compatibility ..... TTL/CMOS

## DIO<0..7>

Digital logic levels

Level	Min	Max
Input low voltage	0 V	0.8 V
Input high voltage	2 V	5 V
Input low current ( $V_{in} = 0$ V)	—	-320 $\mu$ A
Input high current ( $V_{in} = 5$ V)	—	10 $\mu$ A
Output low voltage ( $I_{OL} = 24$ mA)	—	0.4 V
Output high voltage ( $I_{OH} = 13$ mA)	4.35 V	—

Power-on state ..... Input (High-Z),  
50 k $\Omega$  pull up to +5 VDC

Data transfers ..... Programmed I/O

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## Timing I/O

Number of channels.....	2 up/down counter/timers, 1 frequency scaler
Resolution	
Counter/timers.....	24 bits
Frequency scalars .....	4 bits
Compatibility .....	TTL/CMOS
Base clocks available	
Counter/timers.....	20 MHz, 100 kHz
Frequency scalars .....	10 MHz, 100 kHz
Base clock accuracy.....	$\pm 0.01\%$
Max source frequency.....	20 MHz
Min source pulse duration .....	10 ns in edge-detect mode
Min gate pulse duration .....	10 ns in edge-detect mode
Data transfers.....	DMA, interrupts, programmed I/O
DMA modes .....	Scatter-gather (single transfer, demand transfer)

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



I/O connector

6023E/6024E .....68-pin male SCSI-II type

### Operating Environment

Ambient temperature .....0 to 55 °C

Relative humidity .....10 to 90% noncondensing

### Storage Environment

Ambient temperature .....-20 to 70 °C

Relative humidity .....5% to 95% noncondensing

ACHP	74	68	ACH3
ACH1	33	67	AIGND
AIGND	36	66	ACH9
ACH10	31	65	ACH2
ACH2	71	64	ACH10
AIGND	23	63	ACH11
ACH11	28	62	AISLNL
AIGND	27	61	ACH12
ACH12	29	60	ACH5
ACH6	20	59	AIGND
AIGND	24	58	ACH14
ACH13	21	57	ACH7
DACOUT	27	56	AIGND
DACOUT1	21	55	ADGND
RESERVE D	20	54	ADGND
DI04	12	53	DI04
DI00	18	52	DI00
DI01	17	51	DI06
DI06	16	50	DI00
DI00	15	49	DI07
+5V	14	48	DI07
DI00	11	47	DI03
DI00	12	46	SCANCLK
PERFTRIG1	11	45	EXTHOBLE
PERFTRIG2	12	44	DI00
DI00	9	43	PERCONVLT
+5V	8	42	PERGCTR SOURCE
DI00	7	41	PT4 (PCTR) GATE
PERLDR4T	6	40	PERCTR GATE
PERV1TRG	5	39	DI00
DI00	2	38	PERSTARTSCAN
PERGCTR GATE	3	37	PERGTRD SOURCE
GPCR3 OUT	1	36	DI00
FAFO OUT	1	35	DI00

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura C-1. Asignación de Pines en el conector PCI

### C.-Ejemplos Esquemáticos de los Modelos Mecánicos Probados en la Mesa Vibradora

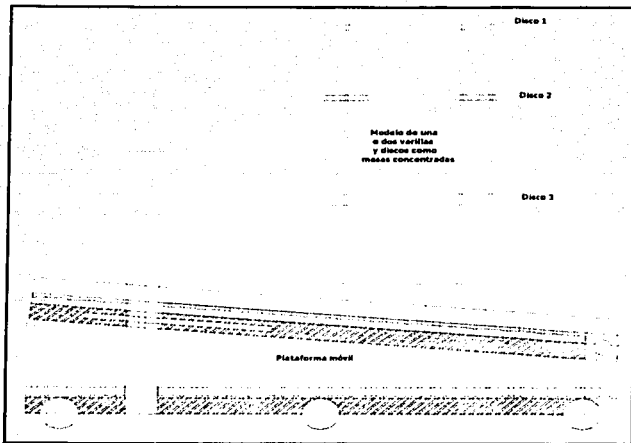


Figura A-1. Modelo mecánico de discos como masas concentradas

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

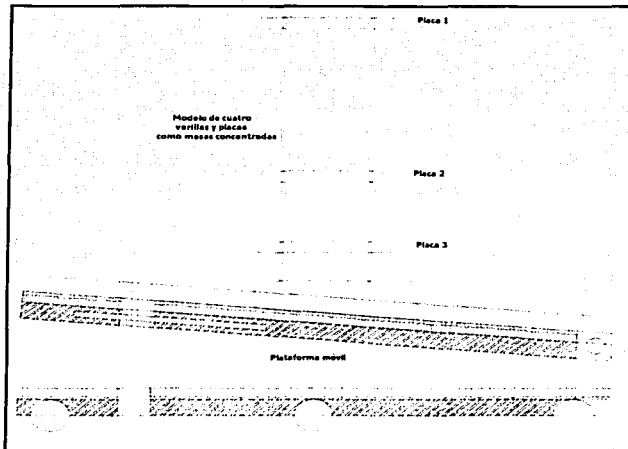


Figura A-2. Modelo mecánico de placas como masas concentradas

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN