

178

zejam



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**INSTRUMENTACION DE UNA CAMARA
TRIAxIAL CICLICA PARA ESTUDIOS DE
MECANICA DE SUELOS**

FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N :
JOSE LUIS SORIANO AVILA
JOSE HIGINIO ZARAGOZA GONZALEZ



DIRECTOR DE TESIS:

ING. MIGUEL ANGEL BAÑUELOS SAUCEDO

MEXICO, D. F.,

JULIO, 1995



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.

AGRADECIMIENTOS

A mi Madre

“ Que dedicaste toda tu vida a mi y no
pudiste recibir nada a cambio “

A mi Padre

“ Que con tu ejemplo se que nada es imposible “

A Ludy

“ Almost my wife “

A Ciri

“ Por tu ayuda incondicional “

A Belo

“ Por darme el ejemplo de lo que es ser aferrado “

A los primos Vick y Dany

A todas las personas que un dia conoci y me
ayudaron a llegar a ser lo que ahora soy.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

“ Por la educacion que recibí “

y por último y no por ser el último al

Ing. Luis López Flores

por haberme soprotado con tanta paciencia
durante un año

Jose Luis Soriano Avila

Agradezco,

A mi padre

Procopio Zaragoza Rojas

Por haberme enseñado a enfrentar la vida,

A mi madre

Remedios González Ortega

A quién debo algo más que la vida,

A mis hermanos

**Laura, Norma, Evelia, Patricia, Emilio
Edgar, Ivan, Belinda**

Por su apoyo y comprensión,

A la vida por la oportunidad recibida,

**A los profesores y toda aquella persona
que de alguna manera ha contribuido en
mi formación,**

**A la Universidad Nacional Autónoma de México
por todo lo que me ha dado,**

**Al Laboratorio de Dinámica de Suelos de la DEPMI
por haberme permitido trabajar en él,**

**Y de forma especial al Ing. Luis López Flores por
su invaluable contribución en el desarrollo de
éste trabajo**

José Higinio Zaragoza González

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 Antecedentes	1
I.2 Objetivo	2
I.3 Alcances	2
I.4 Descripción del equipo	3
I.4.1 Partes del equipo	3
I.4.2 Funcionamiento del equipo	6

CAPÍTULO II

DISEÑO DE LOS ACONDICIONADORES DE SEÑAL

II.1 Sensor de fuerza	9
II.2 Sensor de nivel	18
II.3 Sensor de presión	21
II.4 Sensor de desplazamiento lineal	23

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL GENERADOR DE FUNCIÓN SENOIDAL

III.1 Características del generador original	30
III.2 Análisis y desarrollo del generador senoidal controlado digitalmente	
III.2.1 características	31
III.2.2 bloques constitutivos del generador	32
III.2.2.1 señal senoidal	32
III.2.2.1.1 generación de la señal triangular	33
III.2.2.1.2 aproximación de una señal triangular a senoidal	34
III.2.2.1.3 control de la magnitud de la señal senoidal	35
III.2.2.2 realización de la señal de voltaje de CD que varía entre 0 y 0.8 V	36
III.3 Control de la frecuencia, amplitud de la señal senoidal y voltaje de CD	38

CAPÍTULO IV

DISEÑO DEL PROCESO DE LA CAPTURA AUTOMATIZADA DE DATOS

IV.1 Características del software de adquisición de datos	40
IV.2 Tarjeta de adquisición de datos	43
IV.3 Acoplamiento de los acondicionadores y el generador senoidal a la tarjeta	44
V.4 Programación, procedimiento de automatización y control de ensaye	49
IV.4.1 Etapa de saturación	50
IV.4.2 Etapa de consolidación	59
IV.4.3 Etapa dinámica	68
IV.5 Almacenamiento de la información	73

CAPÍTULO V

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Resultados, conclusiones y recomendaciones	77
---	-----------

APÉNDICE A

Mascarillas de los circuitos impresos y diagramas eléctricos

APÉNDICE B

Calibración de acondicionadores de señal

BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 Antecedentes

La medición de magnitudes físicas constituye un proceso inherente a los métodos experimentales utilizados en Ingeniería.

En la determinación de propiedades dinámicas del suelo en un laboratorio de ingeniería civil, se utilizan varios equipos que generan vibración en pequeñas probetas cilíndricas de suelo, entre los que se encuentra la Cámara Triaxial Cíclica "TXC" (equipo al cual se orientó el desarrollo de este trabajo); en ella, las magnitudes físicas de interés como la deformación, la presión y la fuerza, son notoriamente función del tiempo. Considerando: a) los tamaños relativamente pequeños de las probetas de ensaye en la TXC (diámetros de 3.9 ó 7.8 cm y el doble de altura), b) las frecuencias de la señal excitadora (0.1 a 5 Hz) y, c) las amplitudes de las deformaciones provocadas por las excitaciones dinámicas aplicadas (en el orden de las decenas de micras), la exactitud y rapidez de los sistemas de medición de esas magnitudes constituye un requisito, por lo que los sistemas de medición basados en instrumentación electrónica constituyen una herramienta adecuada para satisfacerlo eficientemente.

Un sistema de instrumentación electrónica se compone de las partes siguientes: la del transductor, la del acondicionamiento de señal y la del despliegue y/o registro de datos; mediante la calibración de los instrumentos, se establece y evalúa a la conversión entre la variable física "entrada" y la señal

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 Antecedentes

La medición de magnitudes físicas constituye un proceso inherente a los métodos experimentales utilizados en Ingeniería.

En la determinación de propiedades dinámicas del suelo en un laboratorio de ingeniería civil, se utilizan varios equipos que generan vibración en pequeñas probetas cilíndricas de suelo, entre los que se encuentra la Cámara Triaxial Cíclica "TXC" (equipo al cual se orientó el desarrollo de este trabajo); en ella, las magnitudes físicas de interés como la deformación, la presión y la fuerza, son notoriamente función del tiempo. Considerando: a) los tamaños relativamente pequeños de las probetas de ensaye en la TXC (diámetros de 3.9 ó 7.8 cm y el doble de altura), b) las frecuencias de la señal excitadora (0.1 a 5 Hz) y, c) las amplitudes de las deformaciones provocadas por las excitaciones dinámicas aplicadas (en el orden de las decenas de micras), la exactitud y rapidez de los sistemas de medición de esas magnitudes constituye un requisito, por lo que los sistemas de medición basados en instrumentación electrónica constituyen una herramienta adecuada para satisfacerlo eficientemente.

Un sistema de instrumentación electrónica se compone de las partes siguientes: la del transductor, la del acondicionamiento de señal y la del despliegue y/o registro de datos; mediante la calibración de los instrumentos, se establece y evalúa a la conversión entre la variable física "entrada" y la señal

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.1 Antecedentes

La medición de magnitudes físicas constituye un proceso inherente a los métodos experimentales utilizados en Ingeniería.

En la determinación de propiedades dinámicas del suelo en un laboratorio de ingeniería civil, se utilizan varios equipos que generan vibración en pequeñas probetas cilíndricas de suelo, entre los que se encuentra la Cámara Triaxial Cíclica "TXC" (equipo al cual se orientó el desarrollo de este trabajo); en ella, las magnitudes físicas de interés como la deformación, la presión y la fuerza, son notoriamente función del tiempo. Considerando: a) los tamaños relativamente pequeños de las probetas de ensaye en la TXC (diámetros de 3.9 ó 7.8 cm y el doble de altura), b) las frecuencias de la señal excitadora (0.1 a 5 Hz) y, c) las amplitudes de las deformaciones provocadas por las excitaciones dinámicas aplicadas (en el orden de las decenas de micras), la exactitud y rapidez de los sistemas de medición de esas magnitudes constituye un requisito, por lo que los sistemas de medición basados en instrumentación electrónica constituyen una herramienta adecuada para satisfacerlo eficientemente.

Un sistema de instrumentación electrónica se compone de las partes siguientes: la del transductor, la del acondicionamiento de señal y la del despliegue y/o registro de datos; mediante la calibración de los instrumentos, se establece y evalúa a la conversión entre la variable física "entrada" y la señal

eléctrica resultante "salida". Finalmente, el procesamiento de datos y presentación de resultados se puede efectuar posteriormente con programas específicos.

I.2 Objetivo

Desarrollar un sistema de captura automatizada de datos de una Cámara Triaxial Cíclica

I.3 Alcances

Se desarrollaron los acondicionadores de señal para los transductores de la TXC, dirigidos a acoplarse a una tarjeta de adquisición de datos integrada a una computadora personal.

Se calibraron los acondicionadores de señal para trabajar en el rango nominal del equipo.

Se desarrolló una versión de un generador de función senoidal, controlado digitalmente, para acoplarse a la PC y controlar al pistón de carga del equipo desde la computadora.

Se desarrollaron los programas específicos para configurar las características de los ensayos tanto en la etapa de saturación (utilizando el método de contrapresión aplicada por incrementos), como en las etapas de consolidación y excitación dinámica (utilizando esfuerzo controlado) y la captura automatizada de datos (utilizando gráficas en "tiempo real" de las variables físicas del ensayo). Una vez concluido un ensayo, el usuario puede transferir la

información monitoreada a disco flexible, para el posterior procesamiento mediante programas de graficación de curvas esfuerzo - deformación del suelo para la obtención de las propiedades dinámicas de interés. La captura de datos y los programas específicos de control del sistema se realizaron utilizando el paquete **LabView** versión 3.0 por ofrecer amplia versatilidad en la captura y graficación de información en sistemas de instrumentación electrónica, comparada con los recursos necesarios para desarrollar un programa específico de captura y control utilizando un lenguaje convencional de programación.

Finalmente, se elaboró el manual del usuario del sistema para el ensaye de probetas de 3.9 cm de diámetro en la modalidad de esfuerzo controlado. En él, se plantean las posibilidades de desarrollo de funciones alternativas del equipo, como son los ensayes a deformación controlada, fallas post-cíclicas, ... etc.

1.4 Descripción del equipo

El equipo de Cámara Triaxial Cíclica se observa en la fotografía 1. En general un ensaye de una probeta de suelo en la Cámara Triaxial Cíclica consta de 3 etapas : a) saturación, b) consolidación, y c) excitación dinámica.

En los subincisos siguientes, se describen las partes y funcionamiento general del equipo.

I.4.1 Partes del equipo

La Cámara Triaxial Cíclica consta de un marco de carga en el que se apoya una cámara de confinamiento, un tablero de saturación y consolidación, y una consola electroneumática para configurar la carga que aplica el pistón del equipo. En la figura 1 se muestra un diagrama de la cámara de confinamiento y del tablero, para la descripción subsecuente de la TXC, únicamente se hará referencia a esta figura.

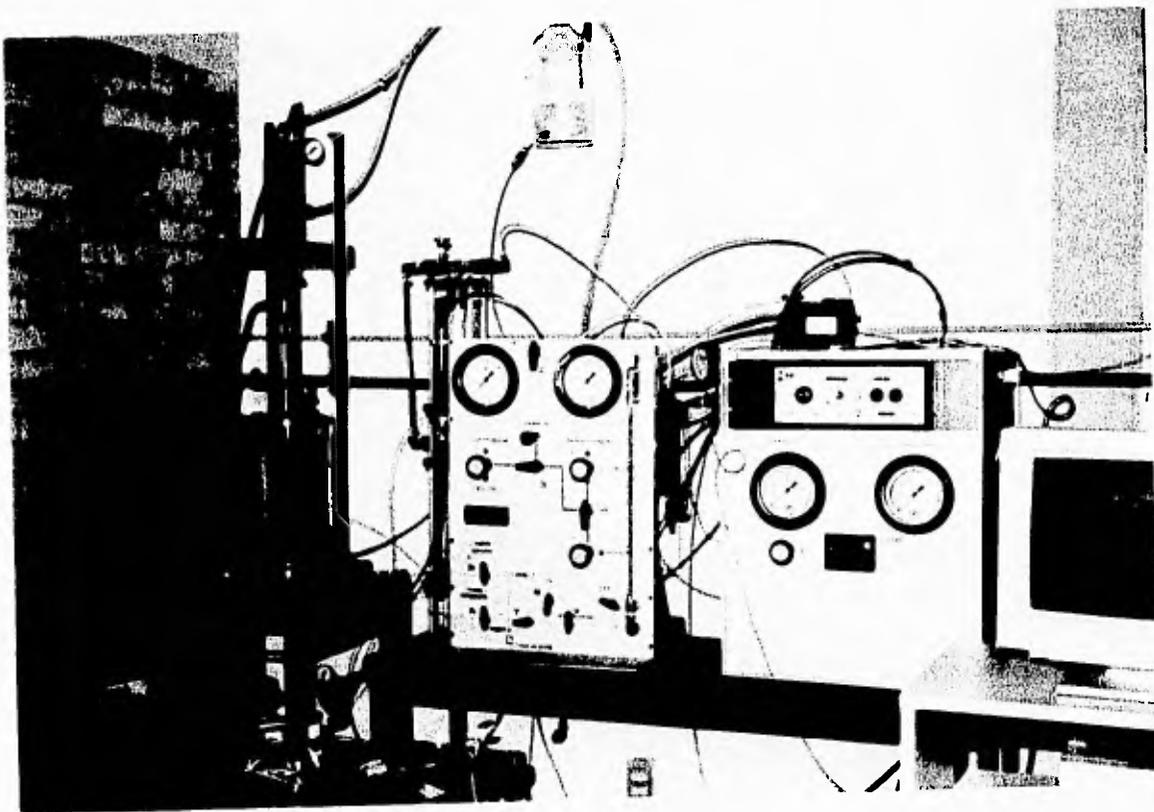


Foto 1 Cámara Triaxial Cíclica (TXC)
(Laboratorio de Dinámica de suelos, DEPMI - UNAM)

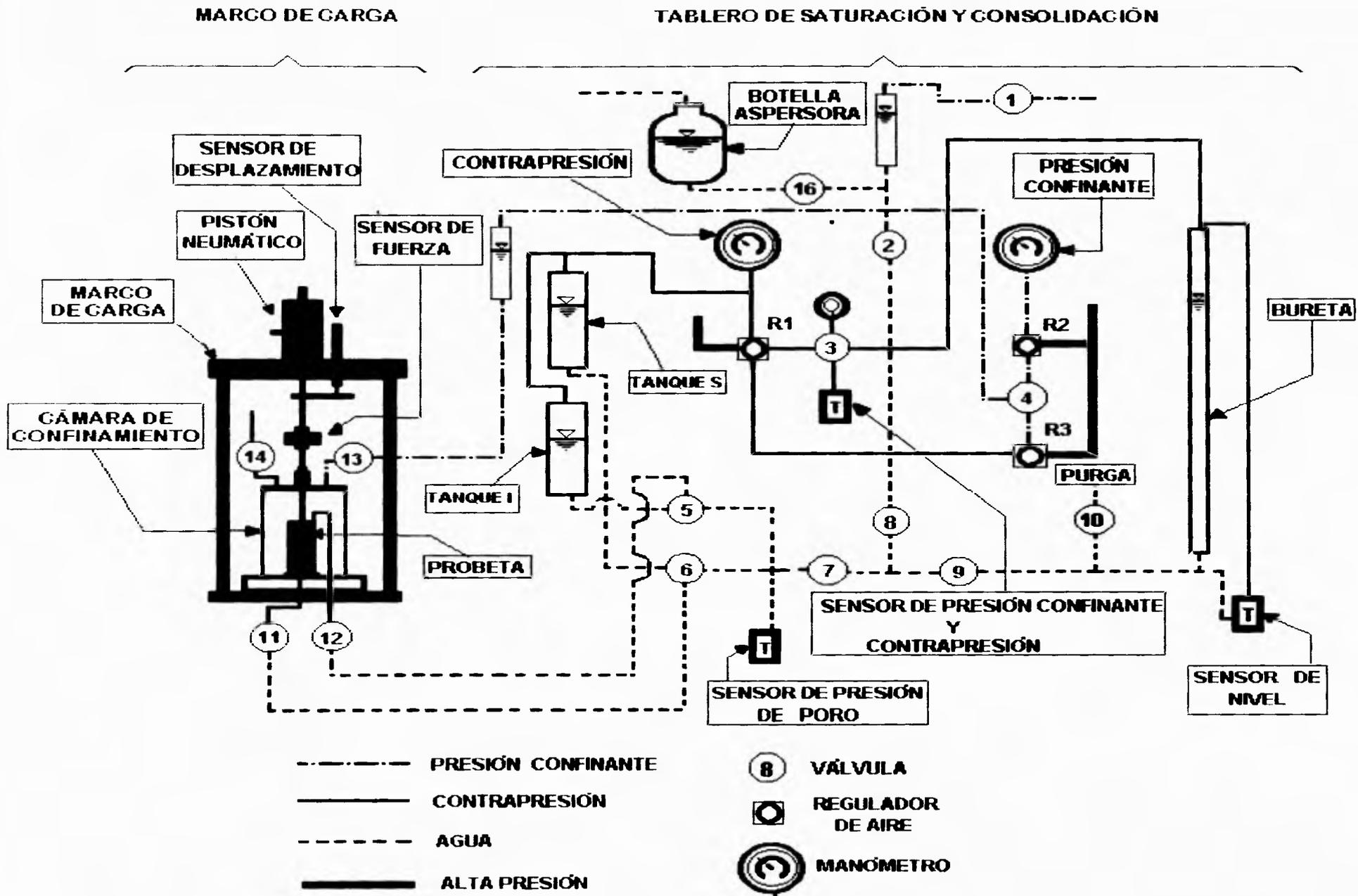


Figura 1 Diagrama del equipo

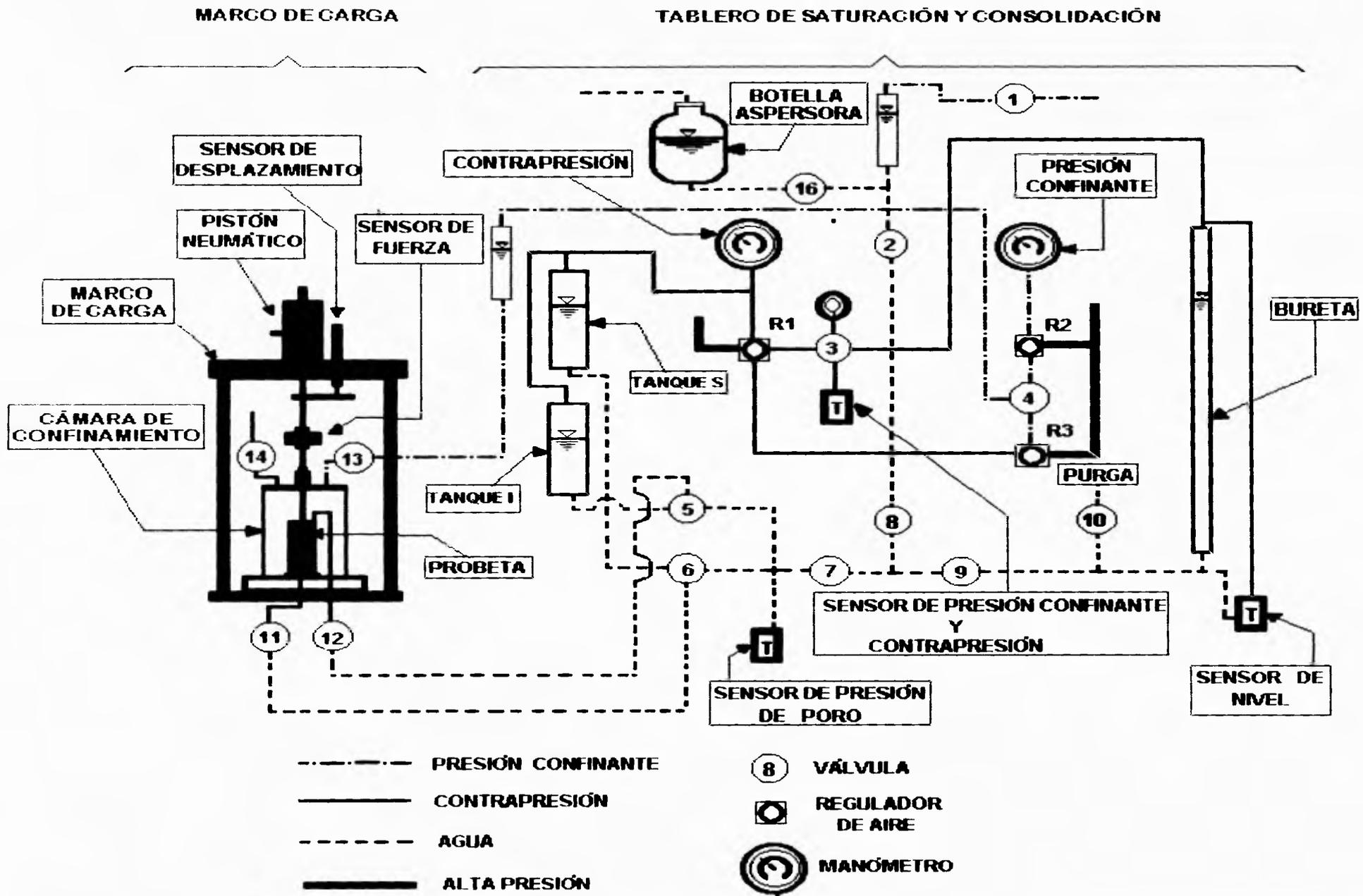


Figura 1 Diagrama del equipo

En el marco del equipo se encuentra instalado un pistón neumático que ejerce fuerza, de tensión ó compresión, a la probeta de suelo mediante un vástago. La probeta se confina en la cámara utilizando agua a la que se le transmite presión.

En el vástago se encuentra acoplado un transductor de fuerza así como una pequeña ménsula en contacto con el núcleo de un transductor de desplazamiento lineal (que en lo subsecuente se denominará como DC-DC) fijado a la placa de reacción y referencia del marco.

En el tablero de saturación y consolidación se encuentran instalados un sistema de líneas que conducen agua o aire presurizado controladas por válvulas, así como 3 reguladores neumáticos de precisión para ajustar la magnitud de las presiones en las líneas del tablero, las cuales se miden en 2 manómetros de carátula. También existe una bureta graduada en milímetros conectada en su extremo inferior a una línea de agua a presión proveniente del interior de la probeta de suelo, mientras que en el extremo superior a una línea de aire presurizado (contrapresión), así como dos tanques denominados de saturación los cuales se comunican a la probeta durante la etapa de saturación; en las etapas posteriores, esta conexión se cancela por medio de las válvulas 5 y 6. Según sea la posición de la válvula 3 del tablero, el transductor de presión puede medir la presión confinante, o bien, la contrapresión.

La consola electroneumática consta de un generador de funciones al que se acopla un transductor electroneumático. Existen también, un regulador de presión y dos manómetros de carátula; el regulador controla la presión del aire en una cámara del pistón (indicada por uno de los manómetros) para aplicar por su vástago fuerza constante, mientras que el otro manómetro indica la presión del

aire en la 2ª cámara del pistón, la cual proviene del amplificador neumático instalado a la salida del transductor; esta presión varía de acuerdo con la función elegida por el usuario (senoidal, cuadrada o triangular, siendo la senoidal la función en la cual está basada la teoría de funcionamiento del equipo) y determina la intensidad de la fuerza cíclica resultante que se aplica al vástago del pistón, y con ello el esfuerzo axial de compresión sobre la probeta de suelo. En la consola se encuentra un contador de ciclos de carga, cuya lectura es útil para controlar la duración de la vibración aplicada a la probeta.

1.4.2 Funcionamiento del equipo

A continuación se describen las tres etapas de un ensaye típico.

a) Etapa de saturación :

En esta etapa se trata de disminuir substancialmente la presencia de aire en los poros del suelo, lo cual se consigue con métodos específicos considerando el tipo de suelo; sin embargo, únicamente se describirá el procedimiento de contrapresión que se ha utilizado en el equipo para saturar las probetas de suelo (arcilla de la ciudad del México).

El procedimiento consiste en aplicar alternadamente incrementos de presión confinante y contrapresión (presión transmitida al agua dentro de la probeta, también conocida como presión de poro) y evaluar el coeficiente β , el cual vale 1 para un suelo teóricamente saturado. El coeficiente se calcula como el cociente del incremento resultante en la presión de poro al incremento de presión confinante aplicado al suelo; por tal motivo, es útil monitorear periódicamente el

valor creciente de la presión de poro para evaluar a β . Este procedimiento se realiza configurando apropiadamente la posición de las válvulas y los volantes de los reguladores de presión en el tablero. En esta etapa del ensaye se impide el drenaje de la probeta hacia la bureta; además, la presión confinante acumulada excede a la contrapresión acumulada. En particular, esta etapa se considera concluida una vez que $\beta \geq 0.96$.

Así, las variables físicas de interés en esta etapa son: a) la presión confinante, b) la contrapresión, y c) la presión de poro.

b) Etapa de consolidación :

Esta etapa inicia después de concluida la etapa de saturación para tener un control apropiado del ensaye desde el punto de vista de ingeniería civil. La configuración de válvulas en el tablero antes de iniciar la consolidación cancela en todo lo sucesivo la comunicación de los tanques de saturación con la probeta. El aire comprimido que presuriza la bureta tiene una presión equivalente a la contrapresión que se desea esté actuando en la probeta durante el proceso de consolidación. En este proceso, es necesario que la presión confinante exceda a la contrapresión y que haya válvulas abiertas de la probeta hacia la bureta, para que exista un gradiente hidráulico que propicie el drenaje del agua de la probeta, y el volumen desalojado sea detectado por el incremento de nivel de la bureta. En esta etapa es de interés monitorear periódicamente el volumen de agua captada por la bureta, la presión de poro, el desplazamiento del cabezal superior de la probeta y la fuerza que transmite el vástago, trátese de una consolidación isotrópica o una anisotrópica (el término " isotrópica " indica que la fuerza con la que el vástago tiende a ser expulsado de la cámara a causa de la presión confinante que actúa en la cámara, está completamente compensada por la

fuerza con la cual el pistón trate de "aplastar" a la probeta de suelo; mientras que el término "anisotrópica" indica que entre ambas fuerzas hay diferencia en magnitud).

Genéricamente, en la etapa de consolidación es de interés monitorear las variables del proceso para una o varias presiones de confinamiento aplicadas a la probeta.

c) Etapa de excitación dinámica

Es apropiado para fines de ingeniería civil, que esta etapa inicie después de transcurrido cierto tiempo de consolidación manteniendo abiertas las válvulas de drenaje de la probeta, habiendo ajustado previamente los controles de la consola electroneumática para dar la amplitud de la fuerza axial senoidal del vástago (previamente sujeto), así como la frecuencia y el número de ciclos de vibración. En esta etapa es de interés monitorear periódicamente la presión de poro, el desplazamiento del cabezal superior de la probeta y la fuerza que transmite el vástago.

A partir del conocimiento de las condiciones físicas de ensaye (dadas por las variables monitoreadas durante cada etapa), se realizan análisis e interpretaciones para determinar las propiedades asociadas al comportamiento mecánico del material, particularmente las propiedades dinámicas.

CAPÍTULO II

DISEÑO DE LOS ACONDICIONADORES DE SEÑAL

Fue necesario diseñar acondicionadores de señal para los diferentes transductores que se encuentran instalados en la TXC, debido a que los originales no podían ser acoplados directamente a la tarjeta de adquisición de datos; además, se instalaron transductores de presión que no estaban previstos en la versión original del equipo, pero que son necesarios para que la captura de los datos de interés sea totalmente automatizada.

En este capítulo se presentan las principales características de los transductores así como el diseño de sus respectivos acondicionadores. En el Apéndice A se muestran los diagramas esquemáticos de cada acondicionador, y en el Apéndice B la forma de calibrar cada acondicionador.

II.1 Sensor de fuerza

Para la medición de la fuerza axial que se aplica a la probeta de suelo, se utiliza una celda de carga del tipo strain gauges de la marca **INTERFACE** serie 1400, la cual forma parte de la Cámara Triaxial Cíclica original. La celda tiene una capacidad de 100 Lb (45.4 kg). Con base en el acondicionador original se pudo determinar que su alimentación es de 5 V así como la identificación de las terminales, ya que no se disponía de las especificaciones del fabricante.

La figura 2 muestra un esquema de la celda de carga utilizada por el equipo, en la cual se describe el código de colores de los cables.

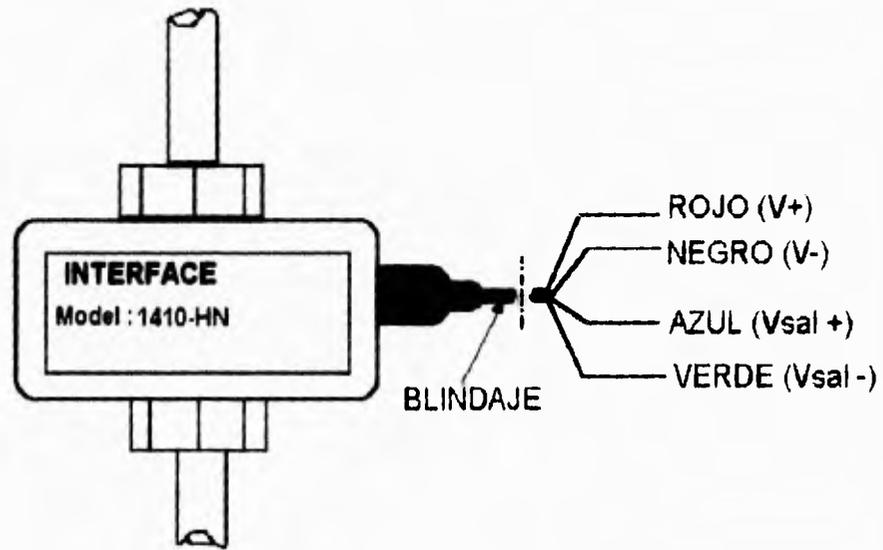


Figura 2 Celda de carga del equipo

A partir de las características del sensor y de los requisitos de diseño del sistema de captura automatizada de datos, se desarrolló el acondicionador de señal, el cual se indica en la figura 3 por medio del diagrama a bloques.

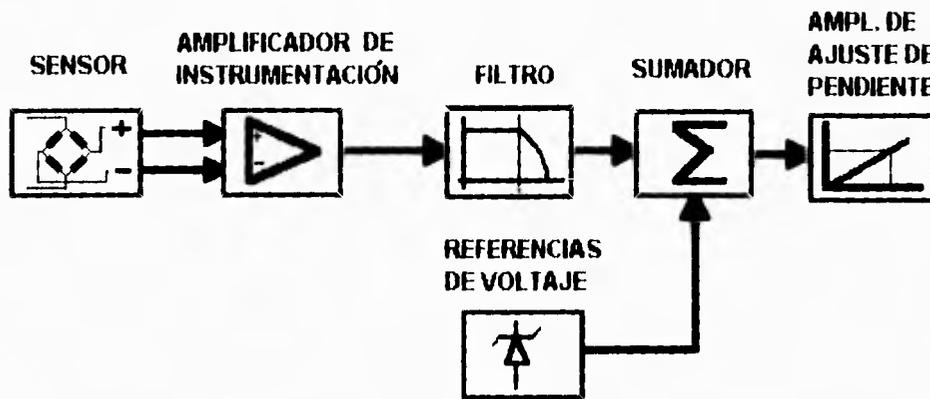


Figura 3 Etapas del acondicionador de señal para la celda de carga

5

A continuación, se describen las etapas de las que consta el acondicionador:

a) amplificador de instrumentación :

En esta etapa se utiliza el amplificador de instrumentación INA101HP de la compañía **Burr-Brown**, para aprovechar las ventajas que este tipo de amplificadores ofrecen, como son: entrada diferencial, alta impedancia de entrada, excelente rechazo al ruido, bajo "drift" y fácil ajuste de ganancia.

b) filtro :

Se diseñó un filtro paso-bajas del tipo Butterwoth de segundo orden con una frecuencia de corte a 10 Hz, ya que el rango de trabajo del equipo en la etapa dinámica del ensaye es de 0.1 a 5 Hz, y de esta manera se puede eliminar el ruido tanto de la línea de 60 Hz como el de alta frecuencia.

c) sumador :

En esta etapa se utilizó un amplificador operacional armado con una configuración de sumador; esto tiene dos razones : primero, porque sirve para el ajuste de cero por medio de las referencias de voltaje, y segundo, para eliminar los "offsets" que se generan de los amplificadores operacionales.

d) referencias de voltaje :

Esta etapa se diseñó con referencias de voltaje de precisión LM336 a 2.5 V, tanto para suministrar un voltaje de referencia negativo como positivo, con un rango de -2.5 a 2.5 V.

e) amplificador de ajuste de pendiente :

Esta etapa se diseñó para tener un amplificador con pendiente ajustable para que la señal, una vez amplificada y filtrada, esté en el intervalo de voltaje en el que opera la tarjeta de adquisición de datos.

Cálculo de componentes para el acondicionador de la celda de carga :

1.- requerimientos de operación de la celda de carga:

- Medición de fuerza entre 0 y 20 kg
- Medir fuerza tanto a tensión como a compresión
- Resolución de 100 g

2.- características de la celda de carga :

- Capacidad de ± 100 Lb (45.4 kg)
- Alimentación de 5 V
- La sensibilidad fue determinada empíricamente como se indica a continuación :

Se colocó la celda en un marco fijo de carga y se le aplicó un peso conocido, registrándose el voltaje de salida; se repitió varias veces este procedimiento, obteniéndose los resultados que se observan en la tabla 1:

Peso (kg)	Vsal de la celda (mV)
0	0.0
5	1.3
9	2.2
18	4.4
19	4.6

Tabla 1

De los datos de la tabla 1 se deduce que la sensibilidad es aproximadamente de:

$$0.25 \frac{mV}{kg}$$

Dado que la tarjeta de adquisición de datos recibe voltajes de -10 a 10 V, se tiene que para cubrir el rango de ± 20 kg se requiere que por cada kilogramo salga del acondicionador 0.5 V; por lo tanto :

$$Ganancia = \frac{V_{salacond}}{V_{salcelda}} = \frac{0.5V}{0.00025V} = 2000$$

Así, la ganancia del acondicionador está definida por la ganancia del amplificador de instrumentación y la de la etapa de ajuste de pendiente.

Para el amplificador de instrumentación la ganancia se determina por :

$$G.instr = 1 + \left(\frac{40k\Omega}{Rg} \right)$$

donde Rg es una resistencia externa al amplificador de instrumentación, como se observa en la figura 4.

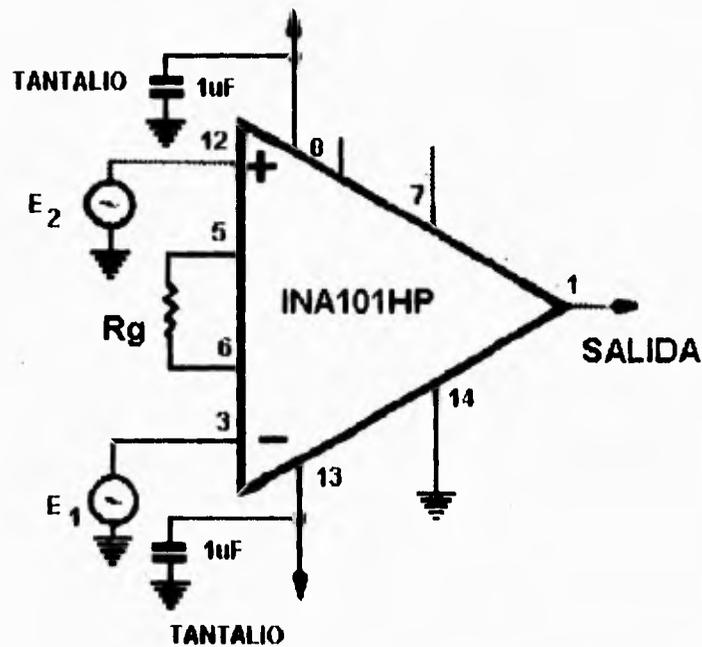


Figura 4 Amplificador de instrumentación

Esta etapa se diseñó para que su ganancia sea de aproximadamente 100, por lo que despejando Rg se tiene que :

$$Rg = \frac{40k\Omega}{(G.instr.-1)} = \frac{40k\Omega}{99} = 404.04\Omega$$

sin embargo, se colocó una resistencia de 470Ω , por lo que se obtuvo :

$$G_{instr} = 86.1$$

mientras que para la etapa de ajuste de pendiente, se requirió una ganancia de :

$$G_{pen} = \frac{G_{total}}{G_{instr.}} = \frac{2000}{86.1} = 23$$

Con esta ganancia, la etapa de ajuste de pendiente se realizó con un amplificador operacional configurado como amplificador inversor, para el cual su ganancia se calcula como :

$$G_{pen} = -\frac{R_f}{R_i}$$

Donde : R_f es la resistencia de retroalimentación

R_i es la resistencia de entrada.

Fijando la resistencia de retroalimentación en $36.5 \text{ k}\Omega$ y despejando R_i tenemos que :

$$R_i = \frac{R_f}{G_{pen}} = \frac{36.5 \text{ k}\Omega}{23} = 1586.95 \Omega$$

Para ajustar el valor de la resistencia, se colocó en su lugar un potenciómetro multivuelta de $5 \text{ k}\Omega$. En la etapa de filtrado se utilizó la configuración que se muestra en la figura 5.

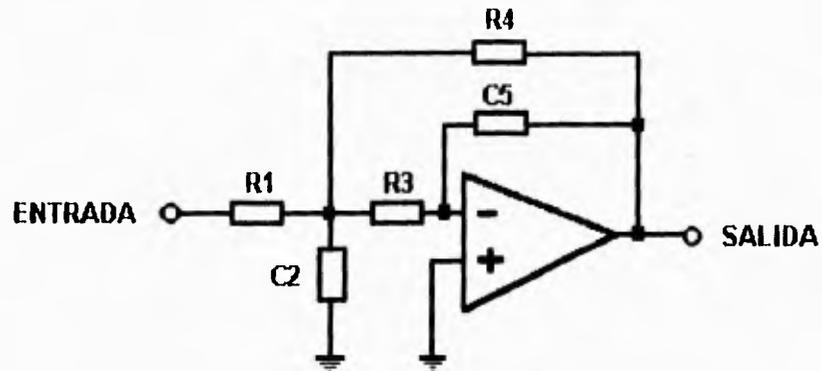


Figura 5 Configuración del filtro

Se eligió un filtro Butterworth, ya que este tipo de filtros ofrecen una respuesta máximamente plana en su banda de paso; los cálculos se indican a continuación

Dado que se requiere un filtro paso-bajas con ganancia $A_v = R4/R1=1$, $a=\sqrt{2}$, y frecuencia de corte =10 Hz :

Se escoge $R3=R4= 26.1 \text{ k } \Omega$

Calculando R1 :

$$R1 = \frac{R4}{A_v} = \frac{26.1 \text{ k} \Omega}{1} = 26.1 \text{ k} \Omega$$

Calculando la relación $\frac{C2}{C5}$:

$$\frac{C2}{C5} = \left(\frac{1}{a^2}\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{R3}{R4}} + \sqrt{\frac{R4}{R3}} + \frac{\sqrt{R3 * R4}}{R1} \right)^2$$

$$\frac{C2}{C5} = 4.5$$

como la frecuencia de corte está dada por :

$$f_c = \frac{1}{6.28 * \sqrt{R3 * R4 * C2 * C5}}$$

Despejando C5 y sustituyendo la relación C2/C5, tenemos :

$$C5 = \frac{1}{6.28 * f_c * R3 * \sqrt{C2 / C5}} = 0.1438 \mu F \approx 0.15 \mu F$$

Para calcular C2 :

$$C2 = 4.5 * C5 = 0.6471 \mu F \approx 0.68 \mu F.$$

Las referencias de voltaje fueron diseñadas para facilitarle al usuario el ajuste a cero. El ajuste a cero se realiza con un potenciómetro multivuelta colocado en la parte frontal del acondicionador. El rango de ajuste varia de ± 3.5 kg, con lo que se garantiza que el usuario tendrá un margen bastante amplio para hacer el ajuste.

II.2 Sensor de nivel

Este sensor mide la cantidad de agua, en cm^3 , que se expulsa de la probeta. La forma original de hacerlo es detectando la variación del nivel de agua en una bureta de vidrio graduada en milímetros; puesto que el área de la bureta es conocido, sólo basta multiplicar la altura del líquido por el área para obtener así el volumen de agua desplazada; sin embargo, para obtener una señal eléctrica directamente proporcional al volumen de agua evacuada por la probeta de suelo, se planteó la necesidad de utilizar un sensor capaz de medir la altura del agua en la bureta para multiplicarla posteriormente por el área de la misma y obtener así el volumen desplazado,

Los métodos para medir niveles de líquidos son numerosos, sin embargo, debido a las condiciones de operación de la bureta (presurización y vaciado circunstancial) se presentaron dos opciones factibles :

La primera era construir un capacitor con dos tubos concéntricos y pasar el líquido en medio de ellos, lo que hará que la capacitancia varíe proporcionalmente a la altura del líquido, ya que el dieléctrico (inicialmente aire) sería reemplazado por el líquido; este método se desechó debido a que el agua está confinada con una presión; además, el adaptar los tubos y sacar las conexiones se dificultaba demasiado.

La segunda opción consistía en sensar la presión en la base de la columna de agua que está contenida en la bureta; esta presión es proporcional a la altura que tenga aquélla, pero como ya se dijo, el agua está confinada por aire a una presión mucho mayor que la que ejercería el nivel de agua, por lo que poner un sensor en la base de la bureta que soportara la presión de

confinamiento reduciría drásticamente la resolución que se necesita para poder detectar incrementos de altura de un milímetro; este problema fue resuelto poniendo un sensor de presión diferencial, conectado por un lado a la base de la bureta y por el otro a la parte superior de ésta, como se muestra en la figura 6.

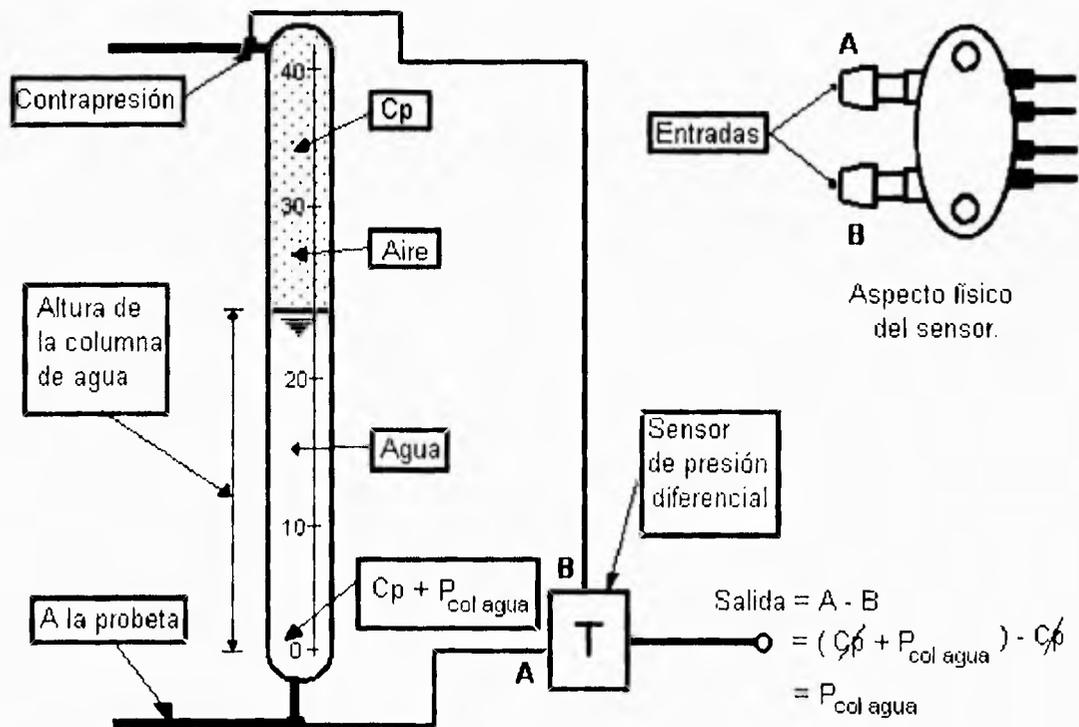


Figura 6 Conexión del sensor de presión diferencial a la bureta

Dado que el sensor entrega un voltaje proporcional a la diferencia de presiones entre sus dos entradas, entonces dará exactamente la presión ejercida por la columna de agua que está en la bureta sin importar la presión de confinamiento del aire (máximo 7 kg/cm²). Esto es importante ya que las presiones de operación de la bureta varían según el tipo de suelo a ensayar. Otra de las ventajas ofrecidas es que las modificaciones para colocar el sensor son mínimas, ya que sólo se tienen que sacar dos derivaciones en forma de T de los

tubos, lo que no implica mayores complicaciones; además, el sensor no modifica la apariencia del tablero de saturación y consolidación. Finalmente, se puede utilizar la misma bureta para la calibración del acondicionador del sensor de presión diferencial, por lo que se decidió utilizar este método.

Partiendo de las necesidades (basados en la utilización de una bureta delgada) :

Resolución de : 1 mm de columna de agua
Rango : 40 cm de columna de agua

Como 1 mm de columna de agua equivale a 0.01 kPa y 40 cm de columna de agua equivale a 4 kPa, se seleccionó un sensor de presión diferencial de la marca **Motorola** modelo **MPX10DP**, el cual tiene las siguientes características :

Sensibilidad : 3.5 mV/ kPa
Rango : 0 - 10 kPa
Offset : 35 mV

Asimismo, la ganancia necesaria para amplificar 40 cm de columna de agua es:

$$G_{total} = \frac{V_{salacond}}{V_{salpresión}} = \frac{4V}{.014V} = 285.71$$

El diseño del acondicionador es igual que el descrito anteriormente en el acondicionador del sensor de fuerza, por lo que sólo se describirán las diferencias que existen entre ambos. Como se necesita una ganancia de 285.71, se le asignó una ganancia de 5 para el amplificador de instrumentación; la ganancia es pequeña debido a que el sensor de presión diferencial tiene un offset de 35 mV, por lo que una ganancia mayor sería más difícil de anular con las referencias de voltaje; además, podrían saturarse los amplificadores. La ganancia para el ajuste de pendiente quedó en aproximadamente 57 para completar la ganancia necesaria.

Para filtrar la señal se utilizó el mismo tipo de filtro que se diseñó para el acondicionador del sensor de fuerza.

En el caso de las referencias de voltaje sólo se utilizó la referencia negativa, ya que en este caso el sensor no registraría una presión vacuométrica, y la referencia sólo se utiliza para anular el offset que tiene el sensor con presión cero y así ajustar el acondicionador para que indique cero cuando la presión diferencial sea nula.

II.3 Sensor de presión

Para sensar la presión de confinamiento, la contrapresión y la presión de poro se utilizó un sensor de **Motorola** modelo **MPX700GP**; se eligió este sensor ya que cumplió con los requerimientos de operación de la Cámara Triaxial, como son :

Rango : 0 - 700 kPa ($100 \text{ PSI} \approx 7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$)

Resolución : 1 kPa ó 0.01 kg/cm²

siendo las principales características del sensor de presión utilizado, las siguientes :

Rango : 0 - 700 kPa
Sensibilidad : 86 uV/kPa
Offset : 35 mV

El acondicionador para este sensor fue construido de la misma manera que los anteriores; esto es, consta de las mismas etapas, sólo que varía la ganancia de los amplificadores como se explica a continuación.

Tomando en cuenta la sensibilidad del sensor, se necesita tener una amplificación, para 700 kPa, de :

$$G_{acon} = \frac{V_{salacond}}{V_{saltrans.}} = \frac{7V}{0.0602V} = 116.28$$

En este caso, también se asignó una ganancia de 5 para la etapa del amplificador diferencial; por lo tanto, para la etapa de ajuste de ganancia tenemos que es de aproximadamente 23, así mismo, se utilizó una referencia de voltaje y la calibración se realizó en la misma Cámara Triaxial, ya que ésta cuenta con derivaciones para conectar en un mismo punto un manómetro de precisión y el sensor de presión, de esta manera se pueden comparar las mediciones de ambos, además, cuenta con reguladores de aire para ajustar la presión al valor requerido.

II.4 Sensor de desplazamiento lineal

a) transductor de desplazamiento (DC - DC) :

El transductor de desplazamiento "DC-DC" (hecho por **TRANS-TEK**), es un dispositivo que se polariza con un voltaje de CD y entrega como respuesta una diferencia de potencial de CD proporcional a la posición de su vástago.

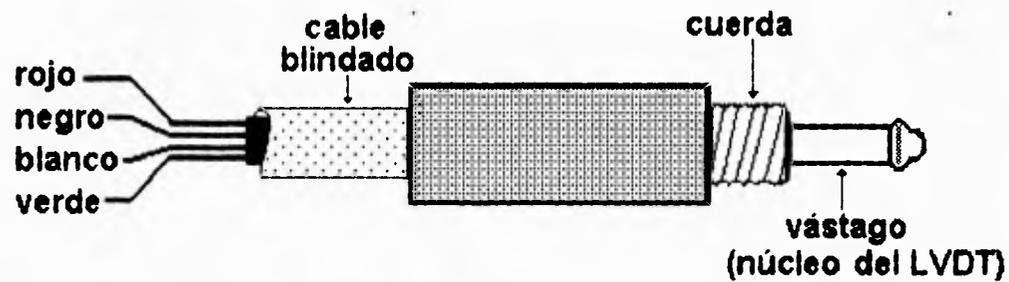


Figura 7 Transductor de desplazamiento "DC-DC"

El DC-DC está constituido por los siguientes dispositivos:

- 1) un LVDT (transformador diferencial de variación lineal)
- 2) un vástago, es el núcleo del LVDT
- 3) un oscilador
- 4) un demodulador sensitivo a la fase

En la figura 8 se muestra la disposición de los componentes del DC-DC.

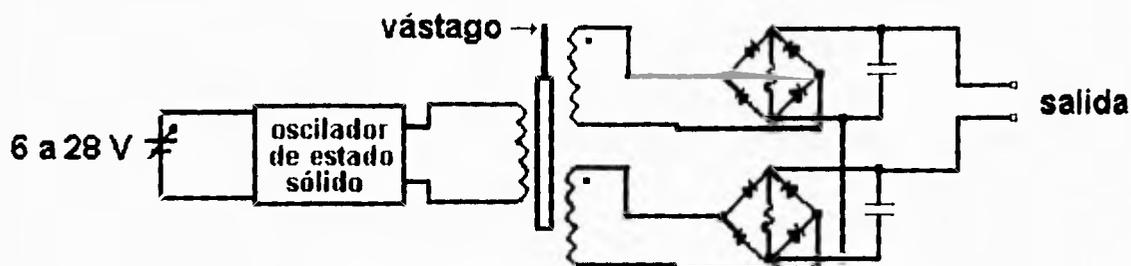


Figura 8 Diagrama eléctrico del DC-DC

El principio de operación del DC-DC es el siguiente: el oscilador convierte la señal de CD de entrada en una señal de CA, la cual excita al devanado primario del LVDT; una señal de voltaje, que depende de la posición del vástago, es inducida en los devanados secundarios. Cada uno de los devanados secundarios del LVDT tiene conectado un rectificador de onda completa y un filtro RC a su salida.

El rectificador de onda completa y el circuito RC acoplados a los devanados secundarios del LVDT están conectados, como se puede observar en la figura 8, en oposición serie. La diferencia de potencial de salida es proporcional al desplazamiento del vástago con respecto al centro eléctrico (el centro eléctrico implica un voltaje de salida nulo; esta condición se da cuando por la posición del vástago el voltaje inducido en los devanados secundarios es igual). La polaridad del voltaje de salida es función de la dirección del desplazamiento del núcleo con respecto al centro eléctrico.

El rango de trabajo del vástago es 5 cm. Un resorte empuja al vástago para que normalmente todo esté fuera; en esta posición, el voltaje entregado por DC-DC es máximo con una polaridad dada; si el vástago es introducido, el

voltaje de salida comenzará a disminuir hasta que se anule, lo que ocurre cuando el vástago ha sido introducido 2.5 cm; si se continúa empujando el vástago, el voltaje empezará a aumentar, pero con una polaridad contraria a la que tenía al principio (la polaridad del voltaje depende de cuál de los dos cables de salida se tome como referencia).

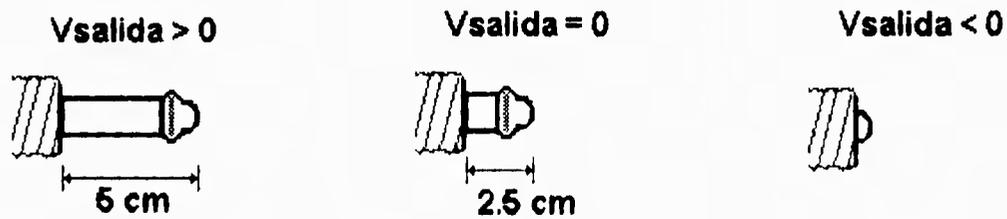


Figura 9 Polaridad del voltaje en función de la posición del vástago

La magnitud máxima del voltaje de salida del DC-DC es función del voltaje al que éste se polarice. La tabla 2 muestra la relación voltaje de salida en función del voltaje de polarización.

Voltaje de polarización [Volt]	Voltaje máximo de salida en circuito abierto [V]
6	4.3
15	10.8
24	18.0
28	20.3

Tabla 2

b) diseño del circuito acondicionador de señal :

El desplazamiento que detecta el vástago del DC-DC es la deformación axial sufrida por la probeta de suelo. La máxima deformación que se espera sufra una probeta de suelo, en la TXC, es de $15000 \mu\text{m}$ con una resolución requerida de $10 \mu\text{m}$, por lo cual se diseñó al circuito acondicionador de señal para que su voltaje máximo de salida (10 V) represente $15000 \mu\text{m}$.

De las hojas de especificaciones proporcionadas por el fabricante se obtuvo que la linealidad de la salida del DC-DC se deteriora cuando éste es conectado a una carga con baja impedancia de entrada, por lo cual la entrada del circuito acondicionador de señal es un amplificador operacional en una configuración de seguidor.

Para poder tener cero volt a la salida del circuito acondicionador de señal cuando la salida del DC-DC no es nula, se diseñó un circuito que suma un voltaje de CD a la señal del DC-DC. La primera aproximación se muestra en la figura 10.

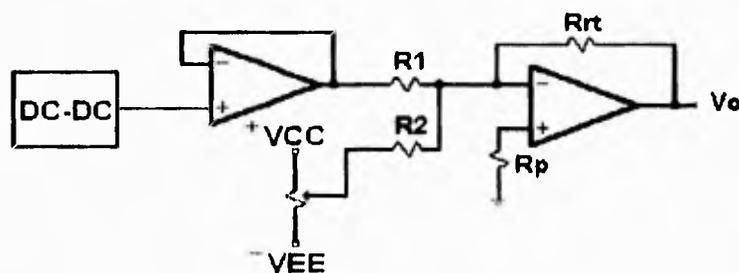


Figura 10 Referencia de voltaje usando un potenciómetro

El circuito de la figura 10 presentó el siguiente problema: como el valor de la resistencia R_2 no puede ser infinita, existe circulación de corriente a través de ella, por lo cual, al cambiar de posición el cursor del potenciómetro cambia el valor de la resistencia equivalente formada por el potenciómetro y R_2 , esto provoca que la ganancia del circuito se modifique. Para corregir lo anterior, se insertó un amplificador operacional a la salida del potenciómetro como se muestra en la figura 11.

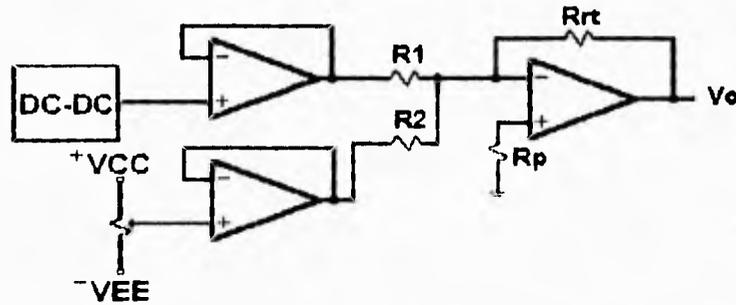


Figura 11 Acoplamiento de la impedancia del potenciómetro

Al probar el circuito de la figura 11, se observó que éste presentaba un comportamiento como si tuviera conectado un capacitor a su salida, el cual se cargaba y descargaba en forma aleatoria; las variaciones de voltaje eran en el orden de milivolt, pero para el fin que estaba siendo diseñado el circuito, esto no era aceptable. Se investigaron las razones de tal comportamiento, lo que condujo a la modificación que se muestra la figura 12.

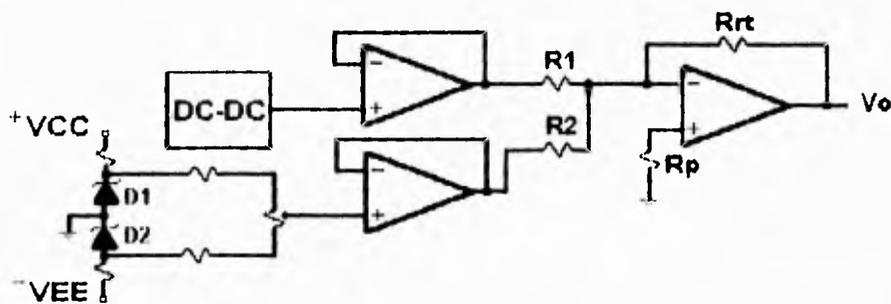


Figura 12 Diseño final de la referencia de voltaje

Con la inserción de D1 y D2 (referencias de voltaje de precisión) se eliminó el problema que se presenta en el circuito de la figura 11. El circuito de la figura 12 es el que se utilizó en el acondicionador de señal.

Es conveniente limitar en banda a las señales que van a ser sometidas a un proceso de conversión analógico-digital; esto se logra haciéndolas pasar a través de un filtro paso-bajas. En el caso del circuito acondicionador de señales para el DC-DC, el filtro es necesario, adicionalmente para eliminar la presencia de la señal del oscilador en el voltaje de salida del acondicionador. El tipo de filtro adecuado para esta aplicación es Butterworth por su respuesta.

En el diseño del filtro se consideraron los siguientes factores: la frecuencia de la señal del oscilador es de aproximadamente 5 kHz, al pasar por un rectificador de onda completa, la frecuencia de la señal aumenta al doble, la señal del oscilador no se puede eliminar con el filtro RC porque el valor máximo del capacitor está limitado por la rapidez de respuesta del DC-DC, por lo que a la salida del DC-DC aparece una señal con una frecuencia de 10 kHz, la cual debe ser suprimida por el acondicionador. La magnitud máxima (para un voltaje de polarización del DC-DC de 24 V) de la señal del oscilador rectificadas a la salida del DC-DC es de 500 mV. Así los parámetros de diseño del filtro son : frecuencia de corte en 10 Hz y que la magnitud máxima de la señal del oscilador rectificadas a la salida del filtro sea menor a 1 mV. El filtro que cumple con los parámetros de diseño es de segundo orden, la configuración empleada para realizar el filtro es la que se muestra en la figura 13.

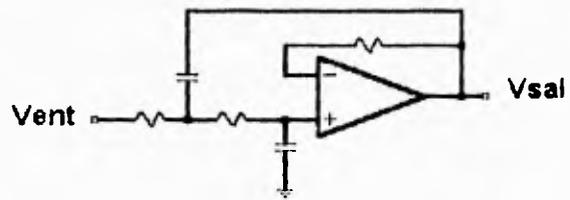


Figura 13 Filtro paso-bajas

El voltaje que sale del filtro paso-bajas está acondicionado para conectarse a la tarjeta de adquisición de datos.

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL GENERADOR DE FUNCIÓN SENOIDAL

III.1 Características del generador original

El desarrollo de un generador de señal senoidal, controlable desde la PC, fue necesario para tener un mejor control del ensaye, principalmente durante la etapa dinámica. El análisis del generador original fue el punto de partida para determinar las características del nuevo.

El generador original tiene las siguientes características :

- a) el rango de frecuencia es de 0.1 Hz a 10 MHz; la frecuencia se selecciona por medio de un potenciómetro de pasos y un interruptor multiplicador
- b) puede entregar señales periódicas del tipo : senoidal, cuadrada ó triangular
- c) el voltaje de la señal de salida está compuesto por la suma de una señal periódica y un voltaje de CD. Cada una de estas señales es controlada, independientemente una de la otra, por un potenciómetro de diez vueltas
- d) la magnitud del voltaje de la señal de salida está limitado a los siguientes voltajes: mínimo 1 y máximo 9 V. Por ejemplo, si se ajusta la señal de voltaje de CD a 6 V y se pretende obtener una señal periódica con una magnitud pico mayor de 3 V, la señal periódica será recortada cuando la señal de salida trate de superar 9 V

e) cuenta con un interruptor que permite activar o desactivar la señal periódica sin modificar el voltaje de CD

III.2 Análisis y desarrollo del generador senoidal controlado digitalmente

III.2.1 características

Del análisis del generador de señales original, así como de diversas pruebas realizadas al pistón de carga del equipo, para conocer su respuesta al excitar el transductor electroneumático con el generador de señales; y de los requisitos impuestos por el tipo de pruebas que se realizan con la TXC; se obtuvo que las características que debería tener el nuevo generador son las siguientes :

- 1) poder ser controlado desde una PC
- 2) rango de frecuencia de 0.1 a 5 Hz
- 3) la señal senoidal de salida es superpuesta a un voltaje de CD
- 4) poder ajustar, independientemente, las magnitudes de la señales: senoidal y de voltaje de CD
- 5) la magnitud del voltaje de la señal de salida debe restringirse al intervalo cerrado $[1,9] V$

III.2.2 bloques constitutivos del generador senoidal

La figura 14 muestra un diagrama a bloques del generador controlado digitalmente desde una PC; se puede observar que el generador senoidal está compuesto por cinco módulos. En lo subsecuente del capítulo se desarrollará cada módulo por separado.

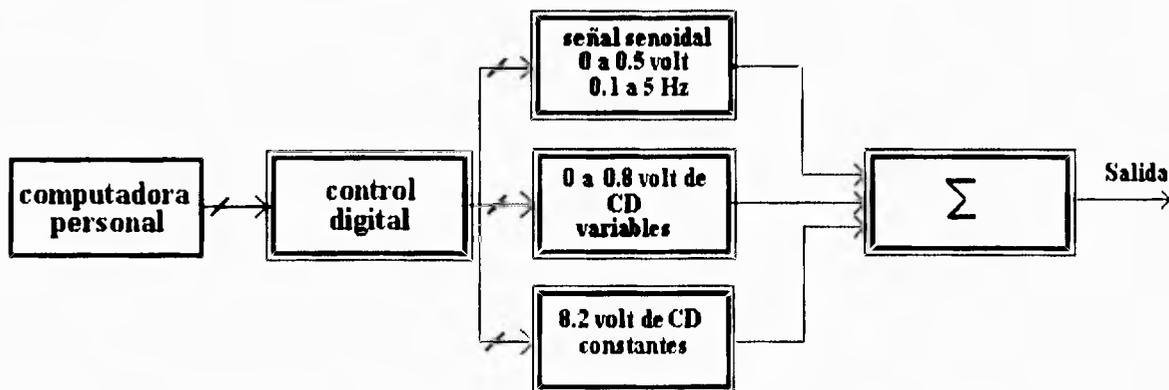


Figura 14 Diagrama a bloques del generador senoidal controlado desde la PC

III.2.2.1 señal senoidal

Existen varias formas de generar señales senoidales, entre las que se encuentran:

- 1) realizar osciladores senoidales utilizando circuitos RC y algún dispositivo amplificador

2) generar la señal senoidal digitalmente y convertirla a una señal analógica mediante un DAC

3) generar una señal triangular y aproximarla a una senoidal mediante alguna de las siguientes formas: variar la pendiente de la señal triangular o aprovechar las no linealidades de algunos dispositivos semiconductores (diodos o transistores)

4) utilizar circuitos integrados fabricados especialmente para este propósito

Se trató de realizar la señal senoidal utilizando el circuito integrado ICL8038, el cual es un generador de señales de precisión, pero la señal senoidal que entrega, en el rango de frecuencias de interés, posee una fuerte distorsión, por lo que no se utilizó en esta aplicación.

Al revisar la literatura se encontró que una forma común de realizar señales senoidales es a partir de señales triangulares; este es el procedimiento empleado para construir la señal senoidal en este trabajo.

III.2.2.1.1 generación de la señal triangular :

La señal senoidal se obtuvo a partir de una señal triangular. La señal triangular se formó integrando una señal cuadrada.

La figura 15 muestra un generador, de onda cuadrada y triangular, en el que la frecuencia de la señales de salida está determinada por el valor de la palabra digital "D" que se coloque en el "bus" de datos del DAC.

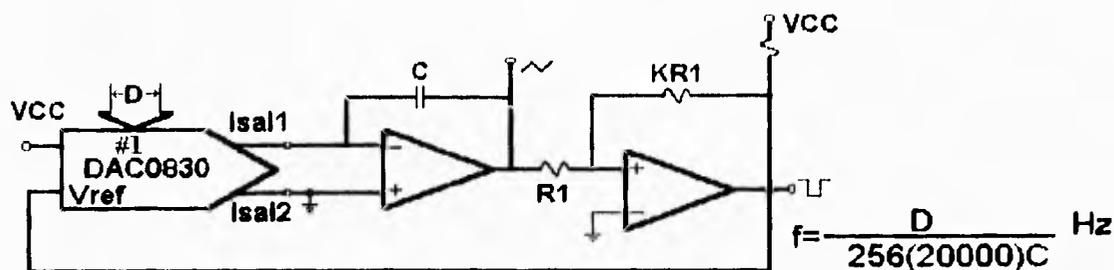


Figura 15 Generador de onda triangular

Si el DAC que se encuentra en la figura 14, lo sustituimos por una resistencia, el circuito resultante sería el ampliamente conocido generador de onda cuadrada y triangular, en el cual la señal cuadrada es generada por un comparador "smitt trigger" de retroalimentación positiva, para el cual los voltajes de histéresis están dados por $\pm V_t = KR1/R1$; la salida del comparador se conecta a la entrada del integrador, y a su vez la salida de este último, a la entrada del comparador. El comparador cambia de estado cada vez que el voltaje de entrada alcanza el valor de $\pm V_t$. La frecuencia de las señales, triangular y cuadrada, se puede cambiar variando uno o más de los componentes pasivos. El componente más fácil de variar es la resistencia del circuito integrador. La ventaja de colocar el DAC en el circuito integrador, en una configuración en la cual actúa como una resistencia controlada digitalmente, es que la frecuencia puede ser ajustada desde una computadora.

III.2.2.1.2 aproximación de una señal triangular a senoidal :

Una vez teniendo la señal triangular, el siguiente paso es realizar el circuito que convierta la señal triangular en senoidal. El circuito elegido es un par

diferencial, el cual obtiene la tangente hiperbólica de la señal de entrada, la que para valores pequeños se aproxima suficientemente a una señal senoidal.

La figura 16 muestra el circuito utilizado para aproximar la señal triangular de entrada en una señal senoidal.

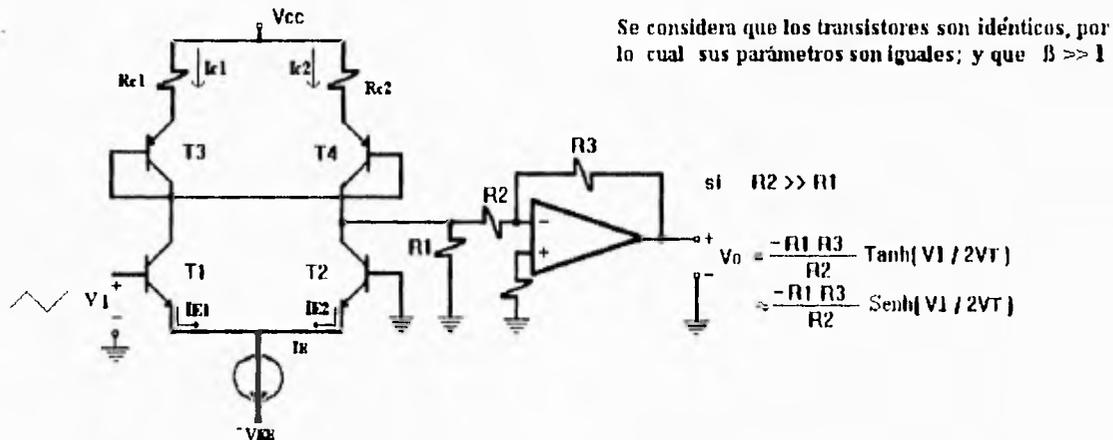


Figura 16 Transformación de una señal triangular a una señal senoidal

III.2.2.1.3 control de la magnitud de la señal senoidal :

El control de la magnitud de la señal senoidal se realizó utilizando el circuito indicado en la figura 17. Este circuito es un atenuador controlado por la palabra digital que se encuentre en el bus de datos del DAC; conectando una señal senoidal a su referencia de voltaje, se puede decrementar la amplitud de ésta variando la palabra digital; esto hace posible controlar la magnitud de la señal senoidal entre los valores de 0 y aproximadamente V_{REF} .

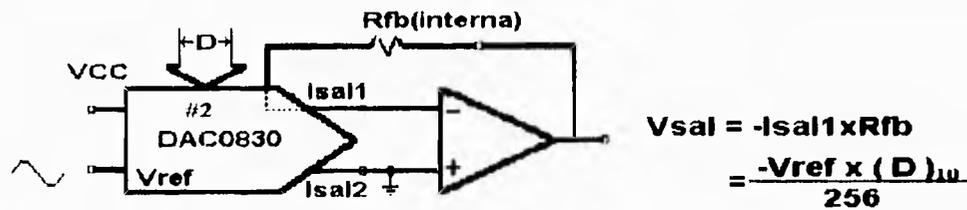


Figura 17 Control de la magnitud de la señal senoidal

III.2.2.2 realización de la señal de voltaje de CD que varía entre 0 y 0.8 V

El control de la magnitud de la señal de CD se realizó con un circuito como el que se muestra en la figura 18. En este circuito cuando la palabra digital "D" es cero, la magnitud del voltaje de salida es cero; por otro lado, cuando "D" es máxima (255, para el DAC0830) el voltaje de salida es aproximadamente igual al voltaje de referencia, pero de signo contrario. El signo del voltaje de salida es negativo, pero al ser aplicado a la entrada de un circuito sumador inversor, se obtiene la polaridad de voltaje correcta en la salida.

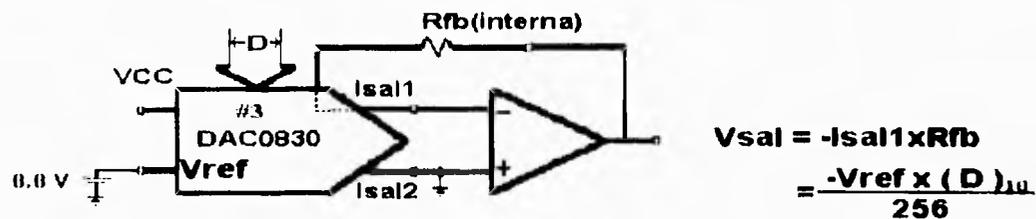


Figura 18 Control digital de la magnitud de la señal de voltaje de CD

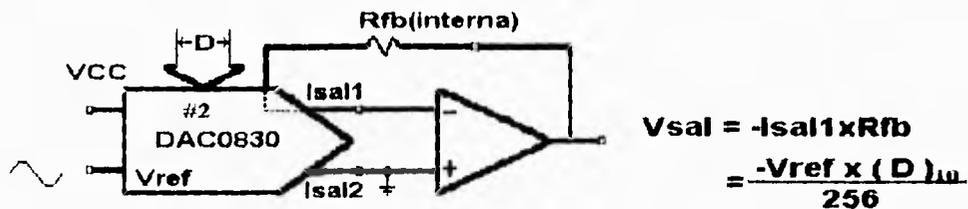


Figura 17 Control de la magnitud de la señal senoidal

III.2.2.2 realización de la señal de voltaje de CD que varía entre 0 y 0.8 V

El control de la magnitud de la señal de CD se realizó con un circuito como el que se muestra en la figura 18. En este circuito cuando la palabra digital "D" es cero, la magnitud del voltaje de salida es cero; por otro lado, cuando "D" es máxima (255, para el DAC0830) el voltaje de salida es aproximadamente igual al voltaje de referencia, pero de signo contrario. El signo del voltaje de salida es negativo, pero al ser aplicado a la entrada de un circuito sumador inversor, se obtiene la polaridad de voltaje correcta en la salida.

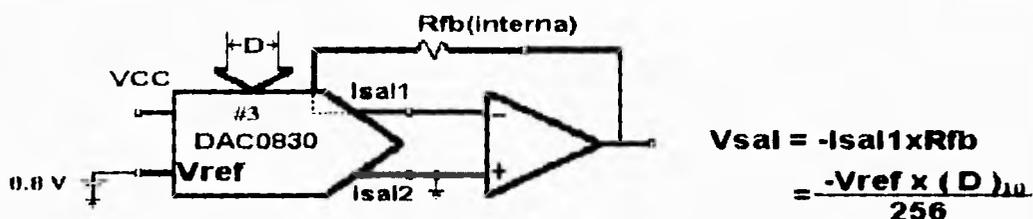


Figura 18 Control digital de la magnitud de la señal de voltaje de CD

III.2.2.3 suma de las señales

En la figura 19 se muestra el diagrama del circuito utilizado para sumar las tres señales: a) la senoidal, b) el voltaje de CD variable de 0 a 0.8 V, y c) el voltaje de CD constante de 8.2 V.

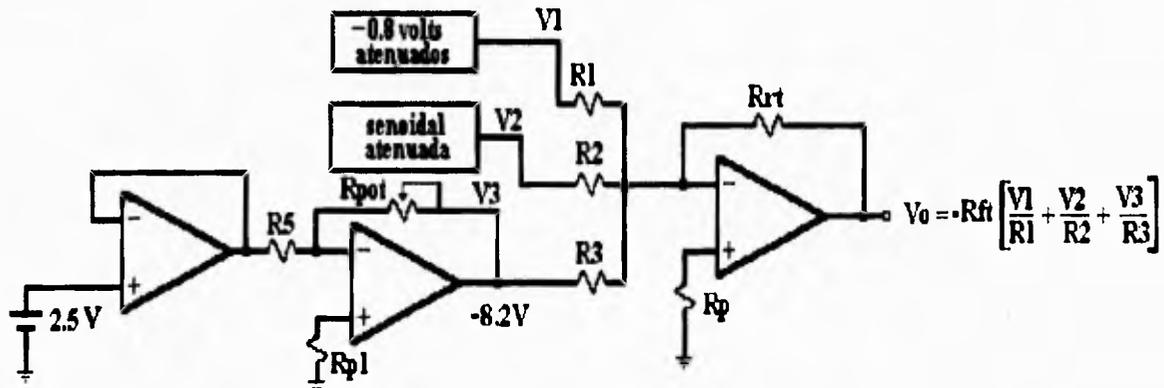


Figura 19 Suma de la señal senoidal con las señales de CD

Con el esquema del circuito mostrado en la figura 19, es posible controlar independientemente los siguientes parámetros del generador de onda senoidal:

- 1) frecuencia de la señal senoidal (por medio del DAC #1)
- 2) amplitud de la señal senoidal (por medio del DAC #2)
- 3) amplitud del voltaje de CD, entre 8.2 y 9 V (por medio del DAC #3)

III.3 Control de la frecuencia, amplitud de la señal senoidal y voltaje de CD

Para poder controlar la frecuencia y la amplitud de la señal senoidal así como el voltaje de CD, se tiene que accesar tres DAC0830, para lo que se necesita un bus de control de al menos 3 líneas; por otro lado, el tamaño de la palabra digital del bus de datos del DAC0830 es de 8 bit, lo que hace necesario un bus de 11 líneas; aquí se presentó un problema ya que la tarjeta de adquisición de datos que se había considerado comprar sólo cuenta con 8 líneas digitales de salida, por lo cual fue necesario multiplexar las ocho líneas de salida de la tarjeta (se tomaron cuatro líneas de datos y las restantes de control).

En la figura 20 se despliega un diagrama a bloques de la manera en que se multiplexaron las ocho líneas digitales de la tarjeta.

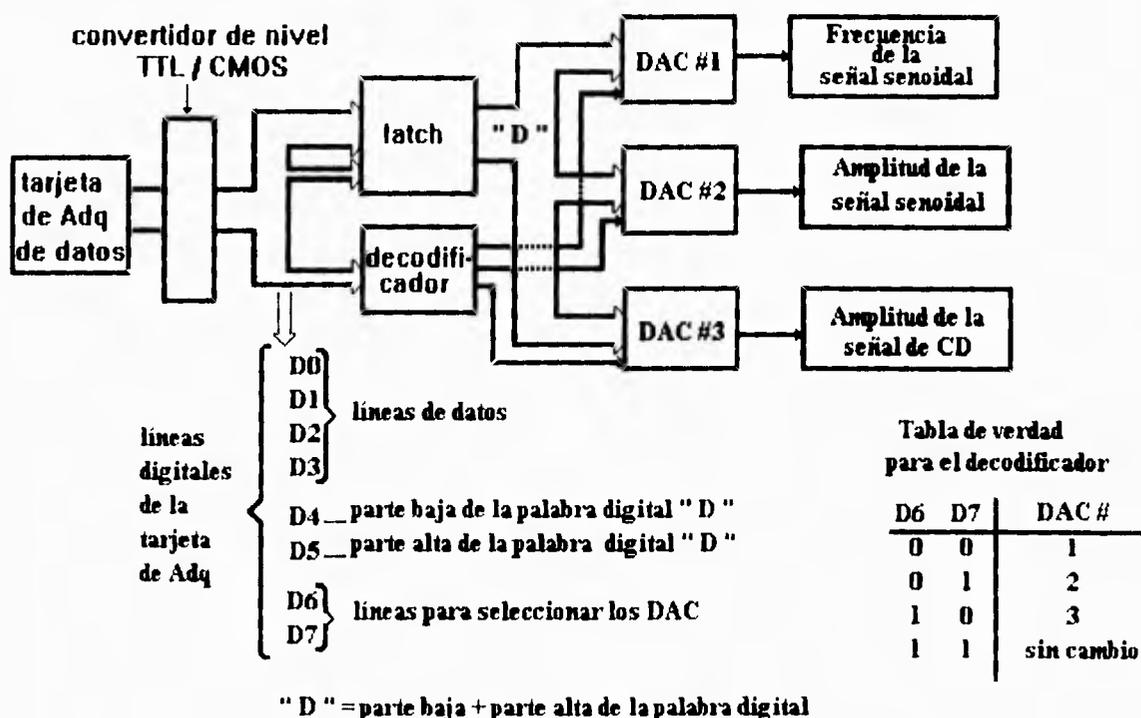


Figura 20 Diagrama a bloques del control digital de los DAC

III.3 Control de la frecuencia, amplitud de la señal senoidal y voltaje de CD

Para poder controlar la frecuencia y la amplitud de la señal senoidal así como el voltaje de CD, se tiene que acceder tres DAC0830, para lo que se necesita un bus de control de al menos 3 líneas; por otro lado, el tamaño de la palabra digital del bus de datos del DAC0830 es de 8 bit, lo que hace necesario un bus de 11 líneas; aquí se presentó un problema ya que la tarjeta de adquisición de datos que se había considerado comprar sólo cuenta con 8 líneas digitales de salida, por lo cual fue necesario multiplexar las ocho líneas de salida de la tarjeta (se tomaron cuatro líneas de datos y las restantes de control).

En la figura 20 se despliega un diagrama a bloques de la manera en que se multiplexaron las ocho líneas digitales de la tarjeta.

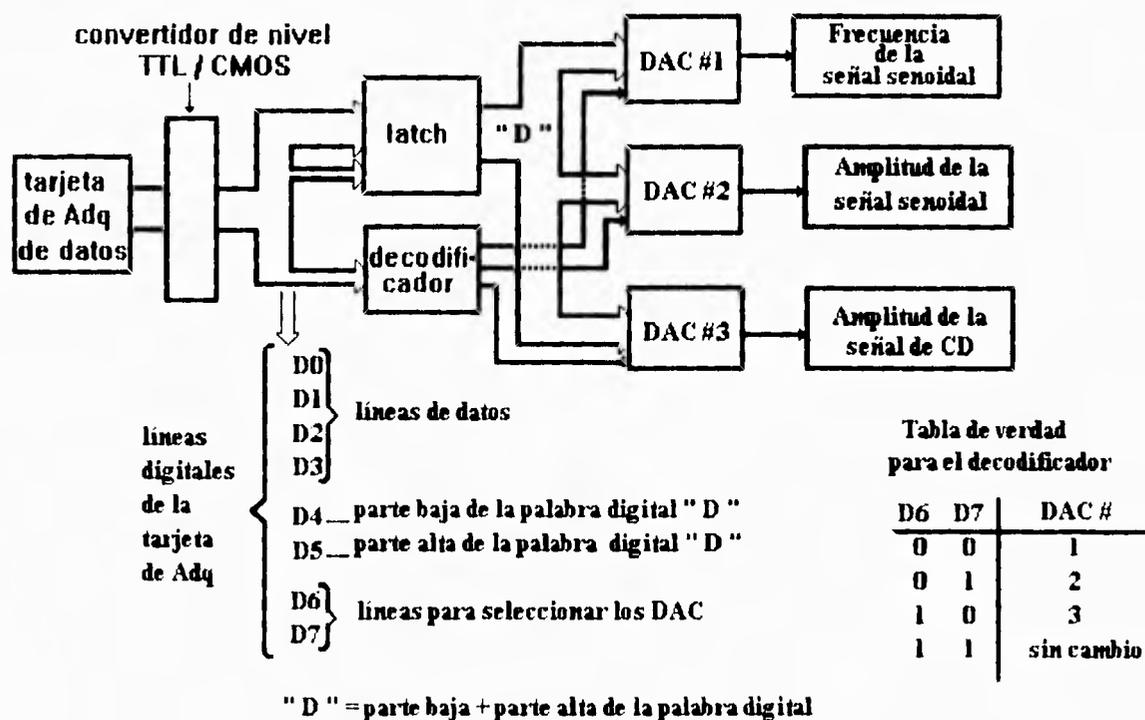


Figura 20 Diagrama a bloques del control digital de los DAC

La manera de cargar los datos en los DAC es la siguiente :

- 1) se manda la parte baja de la palabra digital
- 2) se selecciona guardar la parte baja de la palabra digital en el "latch"
- 3) se manda la parte alta de la palabra digital
- 4) se guarda la parte alta de la palabra digital en el latch
- 5) se selecciona el DAC requerido, mandando los datos adecuados al decodificador
- 6) se deshabilita el acceso a los DAC mandando " 1 1 " por las líneas D6 y D7

Con esto, se concluye la descripción del desarrollo de la nueva versión del generador. El diagrama esquemático así como las mascarillas del circuito impreso se muestran en el Apéndice A.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DEL PROCESO DE LA CAPTURA AUTOMATIZADA DE DATOS

IV.1 Características del software de adquisición de datos

Existen gran cantidad de paquetes de adquisición de datos en el mercado, algunos de los cuales son exclusivamente para capturar los datos (el procesamiento y graficación en pantalla de los datos requiere de software adicional, el cual puede ser elaborado o comprado por el usuario); mientras que otros paquetes pueden adquirir, procesar y desplegar los datos, además de contar con utilerías matemáticas (FFT, IFT, filtros, estadística,... etc.). Por lo general, los paquetes de adquisición de datos sólo son compatibles con las tarjetas fabricadas por las mismas compañías que desarrollaron el software; por lo cual, para evaluar la aplicabilidad de un paquete de adquisición de datos al caso de interés no es suficiente contar con el software, sino que es también necesaria una tarjeta de adquisición de datos que sea soportada por dicho software.

Los fabricantes de tarjetas y software para la adquisición de datos describen, en sus catálogos de venta, las características de sus productos, además de ofrecer programas de demostración; por lo que para determinar el software adecuado para realizar la adquisición de los datos provenientes de la TXC, y que al igual pudiera ser utilizado para adquirir los datos de otros equipos que se encuentran en el laboratorio, se consultó a varios distribuidores de software, consiguiéndose catálogos de venta, manuales de usuario y programas

de demostración. En particular, fue posible conseguir con tres distintos fabricantes el software y una tarjeta de adquisición de datos compatible a él.

Los paquetes que se compararon en el laboratorio fueron:

a) **Genie** (fabricado por **Advantech**) es un lenguaje de programación gráfica, trabaja en ambiente **Windows**, permitiendo adquirir, desplegar y procesar datos en tiempo real. Al efectuar diversas pruebas con el **Genie**, se concluyó que no podía ser utilizado en las aplicaciones que se tienen, porque entre otras cosas, su máxima velocidad de despliegue en tiempo real estaba muy por debajo de lo requerido.

b) **DTVEE** (fabricado por **Hewlett-Packard** y **Data Translation**) es un paquete de programación gráfica (en ambiente **Windows**) para la adquisición, tratamiento y despliegue de datos. Este programa cumplía ampliamente con los requerimientos planteados, además de ser muy versátil, tener una amplia gama de librerías de funciones matemáticas y tratamiento de datos como son: FFT, IFT, estadística,... etc. Sin embargo, no se utilizó el **DTVEE** porque se tuvo la oportunidad de trabajar a un paquete que lo supera, el **LabView**.

c) **LabView** (fabricado por **National Instruments**) es un programa para desarrollar aplicaciones tal como se harían en "C" o "Basic", pero a diferencia de estos lenguajes que utilizan líneas de texto para crear el código, **LabView** utiliza un lenguaje gráfico de programación.

LabView es un paquete de programación de propósito general que cuenta con una extensa librería de funciones y subrutinas para cualquier necesidad de

programación; pero en especial, cuenta con librerías de uso específico para la adquisición, análisis, tratamiento, despliegue y almacenamiento de datos; también cuenta con librerías GPIB (bus de interfase de propósito general que es el nombre común para el 488.1-1987 ANSI/ IEEE estándar) y librerías para realizar control serial de instrumentos.

Existen versiones de **LabView** para trabajar en los ambientes : **Microsoft Windows** , **Computadoras Apple** o **Microsistemas Sun**. **LabView** soporta la mayoría de las tarjetas de adquisición de datos fabricadas por **National Instruments**, pero no soporta tarjetas fabricadas por otras compañías.

Una aplicación programada en **LabView** puede dividirse en dos partes:

a) panel frontal: es la interfase con el usuario, contiene gráficas, diales, "push buttons" y otros tipos de controles o indicadores. El usuario puede tener comunicación con el programa a través del panel frontal utilizando el teclado o el ratón.

b) diagrama: es donde se programa una solución pictórica del problema por medio del lenguaje gráfico; el diagrama es el código fuente del programa.

Después de múltiples pruebas realizadas con el paquete **LabView** se concluyó que cumplía ampliamente con los requerimientos impuestos para realizar la adquisición, tratamiento de datos y graficación en tiempo real de las variables de interés de la TXC.

IV.2 Tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos es el dispositivo que funge como interfase entre la computadora, los acondicionadores de los sensores, así como del generador de señal senoidal; elementos que son utilizados por el sistema de adquisición de datos para la Cámara Triaxial Cíclica. Existen en el mercado una gran variedad de marcas y tipos de estas tarjetas de adquisición; sin embargo, como se seleccionó primero el software de la compañía *National Instruments* y este software sólo soporta tarjetas de la misma compañía, la selección se redujo a elegir una tarjeta que cumpliera con los requerimientos del sistema de adquisición. También se tuvo en cuenta en la selección el costo de ésta, ya que la compañía *National Instruments* fabrica una gran variedad de tarjetas que cubrían las necesidades, pero los costos se elevaban de acuerdo a la sofisticación de las mismas, por lo que se eligió una de ellas de acuerdo a las necesidades y al presupuesto disponible.

Por lo descrito anteriormente, se seleccionó la tarjeta de adquisición de datos modelo : AT - MIO - 16L, la cual tiene las siguientes características :

- 8 canales en modo diferencial (16 canales en modo común)
- Convertidor analógico digital (ADC) de 12 bit
- Máxima frecuencia de muestreo 100 kHz
- Convertidor digital analógico (DAC) de 12 bit
- 8 líneas digitales de entrada/salida compatibles con TTL

La tarjeta AT-MIO-16 tiene 13 puentes y un DIP switch para configurar el "bus" de interfase AT y el conjunto analógico de entradas/salidas. El DIP switch es para las direcciones base de entrada/salida.

Dos puentes son para el DMA, los 11 restantes son para configurar las entradas/salidas analógicas. El diagrama de bloques de la tarjeta se muestra en el Apéndice A.

Las entradas analógicas pueden ser conectadas a la tarjeta de 3 formas diferentes que son: a) diferencial (DIFF), b) común con referencia a tierra de la tarjeta (RSE) ó c) común con tierra no referenciada a la tierra de la tarjeta (NRSE).

DIFF.- "Entradas diferenciales" significa que cada señal de entrada tiene su propia referencia, y que la medición será entre cada señal y su referencia. La señal y su referencia son asignadas cada una a un canal. Con esta configuración la tarjeta puede monitorear 8 entradas de señal diferentes.

RSE.- "Entradas RSE" significa que todas las señales de entrada son referenciadas a un punto de tierra común, el cual está conectado también a la tierra analógica de entrada de la tarjeta. Con esta configuración, la tarjeta puede monitorear hasta 16 señales analógicas.

NRSE.- "Entradas NRSE" significa que todas las señales son referenciadas al mismo punto común, pero este punto no es el mismo con respecto a la tierra de la tarjeta. Este punto es conectado a la entrada negativa del amplificador de

La tarjeta AT-MIO-16 tiene 13 puentes y un DIP switch para configurar el "bus" de interfase AT y el conjunto analógico de entradas/salidas. El DIP switch es para las direcciones base de entrada/salida.

Dos puentes son para el DMA, los 11 restantes son para configurar las entradas/salidas analógicas. El diagrama de bloques de la tarjeta se muestra en el Apéndice A.

Las entradas analógicas pueden ser conectadas a la tarjeta de 3 formas diferentes que son: a) diferencial (DIFF), b) común con referencia a tierra de la tarjeta (RSE) ó c) común con tierra no referenciada a la tierra de la tarjeta (NRSE).

DIFF.- "Entradas diferenciales" significa que cada señal de entrada tiene su propia referencia, y que la medición será entre cada señal y su referencia. La señal y su referencia son asignadas cada una a un canal. Con esta configuración la tarjeta puede monitorear 8 entradas de señal diferentes.

RSE.- "Entradas RSE" significa que todas las señales de entrada son referenciadas a un punto de tierra común, el cual está conectado también a la tierra analógica de entrada de la tarjeta. Con esta configuración, la tarjeta puede monitorear hasta 16 señales analógicas.

NRSE.- "Entradas NRSE" significa que todas las señales son referenciadas al mismo punto común, pero este punto no es el mismo con respecto a la tierra de la tarjeta. Este punto es conectado a la entrada negativa del amplificador de

instrumentación. Con esta configuración, la tarjeta puede monitorear hasta 16 canales diferentes.

Quando es seleccionado el modo común, la salida de los dos multiplexores se conectan juntas y dirigidas a la entrada positiva del amplificador de instrumentación de la tarjeta. La entrada negativa del amplificador de instrumentación es conectada a la tierra de la tarjeta para entrada RSE, o en el caso de entradas NRSE, es conectada a la entrada AI SENSE del conector de entrada/salida. Cuando es seleccionado el modo DIFF, la salida del MUX0 es conectada a la entrada positiva del amplificador de instrumentación, y la salida de MUX1 es conectada a la entrada negativa del amplificador de instrumentación.

La figura 21 muestra la forma de conectar los acondicionadores en forma diferencial y como fuentes de señal flotantes.

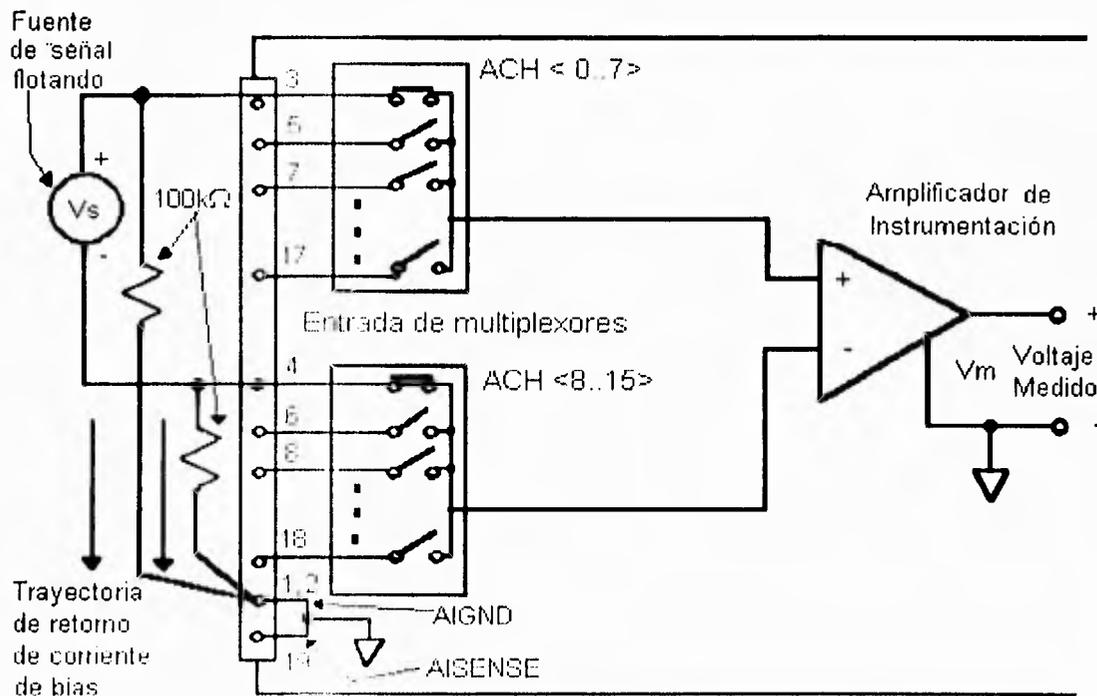


Figura 21 Conexiones de la tarjeta en forma diferencial

Las resistencias mostradas en la figura 21 crean una trayectoria de retorno de las corrientes de "bias" del amplificador de instrumentación. Si no existe esta, las corrientes de bias del amplificador de instrumentación podrían hacer que las capacitancias parásitas se cargaran, resultando en un incontrolable "drift" y posible saturación en el amplificador. Los valores de las resistencias que pueden emplearse son de 10 kΩ a 100 kΩ.

Los rangos y voltajes máximos que soporta la tarjeta son :

- Rango de entrada diferencial : $\pm 10 \text{ V}$
- Rango de entrada en modo común : $\pm 7 \text{ V}$ con respecto a AIGND
- Rango de entrada : $\pm 12 \text{ V}$ con respecto a AIGND
- Máximo voltaje de entrada : $\pm 20 \text{ V}$ polarizada
 $\pm 35 \text{ V}$ no polarizada

La tarjeta AT- MIO-16 tiene ocho líneas digitales de entrada/salida. Estas líneas son divididas internamente en dos puertos de cuatro líneas y son localizadas en las terminales ADIO <3..0> y BDIO<3..0> sobre el conector de entrada/salida de la tarjeta.

Las siguientes especificaciones y rangos se aplican a las líneas digitales de entrada/salida:

- Máximo voltaje absoluto de entrada: 6.0 V con respecto a DIGGND
- Especificaciones de las entradas digitales (referidas a DIGGND) :

V_{IH}	2 V mín
V_{IL}	0.8 V máx
I_{IH}	20 μA máx
I_{IL}	-20 μA máx

- Especificaciones de las salidas digitales (referidas a DIGGND) :

V_{OH} :	2.4 V mín
V_{OL} :	0.5 V máx
I_{OH} :	2.6 mA máx
I_{OL} :	24 mA máx

Con estas especificaciones, cada línea digital de salida puede manejar una carga de 11 compuertas TTL y cerca de 50 LS TTL.

IV.3 Acoplamiento de los acondicionadores y el generador senoidal a la tarjeta

Los canales de entrada de la tarjeta de adquisición de datos fueron configurados para que funcionen como entradas diferenciales bipolares (-10 a 10 V). La tabla 3 muestra el canal que fue asignado a cada circuito acondicionador de señal, así como el factor por el que debe multiplicarse el voltaje que entrega el acondicionador al canal de la tarjeta, para que el producto represente a la variable física en las unidades requeridas.

Canal	Acondicionador de :	Factor	Unidades
0	Fuerza	x 2	kg
1	Desplazamiento	x 1500	μm
2	Nivel Desplazado	x 4.2	cm^3
3	Presión de Poro	x 1	kg / cm^2
4	PC / CP	x 1	kg / cm^2

Tabla 3

Para facilitar la adquisición de datos de equipos distintos a la TXC con la tarjeta, se construyó una caja de conexiones. Los canales de entrada y los de

salida de la tarjeta se comunican con la caja de conexiones, por lo cual es posible accederlos en ésta. Las entradas y salidas de la caja de conexiones son conectores "BNC". Se dividieron las líneas de comunicación de la tarjeta de tal forma que el puerto digital de la tarjeta queda unido, por medio de un cable plano, a un conector DB-9.

La figura 22 muestra la forma en la que se conectaron todos los dispositivos electrónicos (acondicionadores, sensores, generador senoidal, fuente de polarización y la tarjeta). La polarización de los circuitos acondicionadores de señal así como la de los sensores y el generador de señales, se hizo puntual para evitar la formación de redes de tierra. Todos los cables, excepto el cable plano que conecta a la tarjeta con la caja de conexiones y el generador de señales, son coaxiales o blindados para evitar que ruido eléctrico se introduzca en los circuitos a través de ellos.

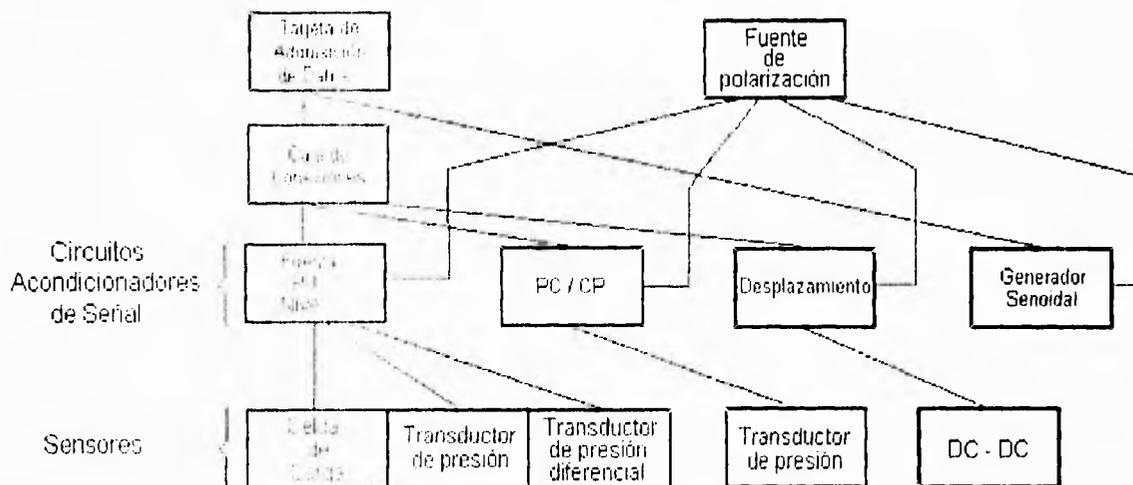


Figura 22 Diagrama de conexiones

IV.4 Programación, procedimiento de automatización y control de ensaye

Como se mencionó anteriormente, los ensayos en la Cámara Triaxial constan de tres etapas: saturación, consolidación y excitación; en esta parte del capítulo se describirá el procedimiento de las tres etapas así como el funcionamiento del programa; para la ejecución satisfactoria de este se necesita una computadora 486 con coprocesador matemático, mínimo 8 Mb de RAM, **Windows** 3.0 o superior, 24 Mb de espacio libre en disco duro (20 para la instalación de **LabView** y 4 para el programa) y crear un disco virtual (D:\) de 1 Mb. Para una explicación detallada del programa refiérase al manual de usuario de la TXC. La figura 23 muestra la pantalla principal del programa donde se da a elegir al usuario qué etapa del ensaye quiere realizar.

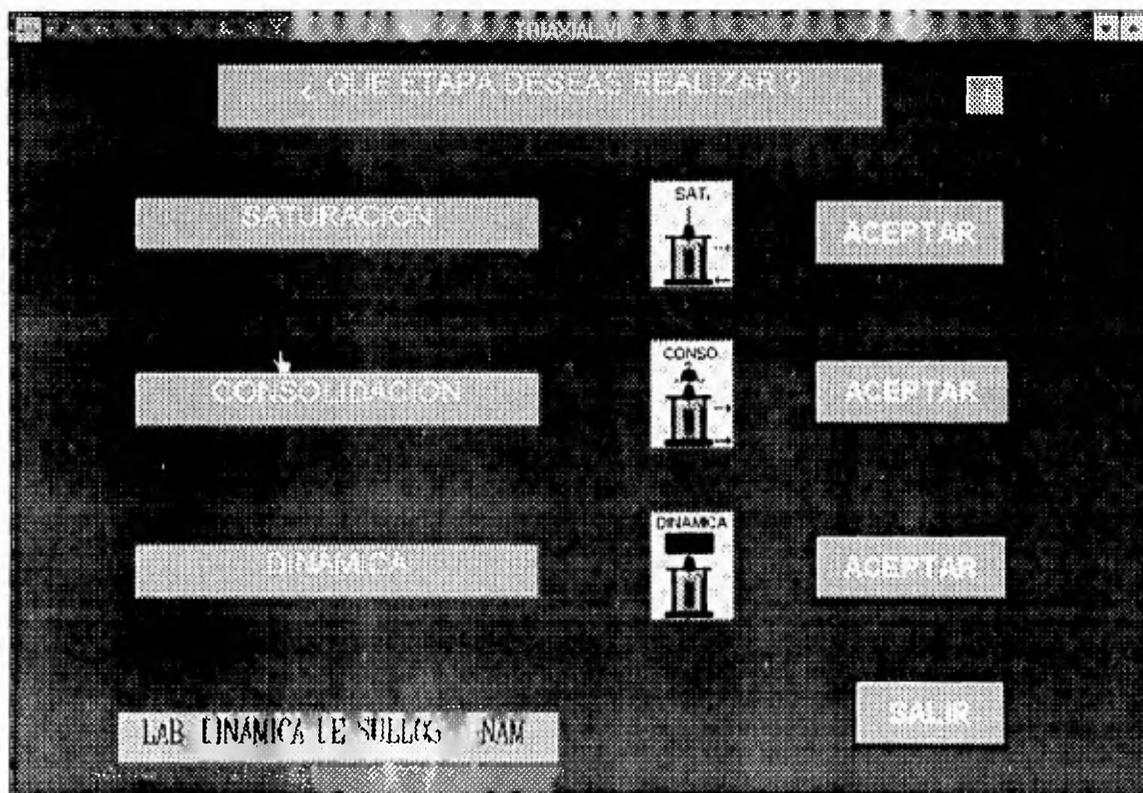
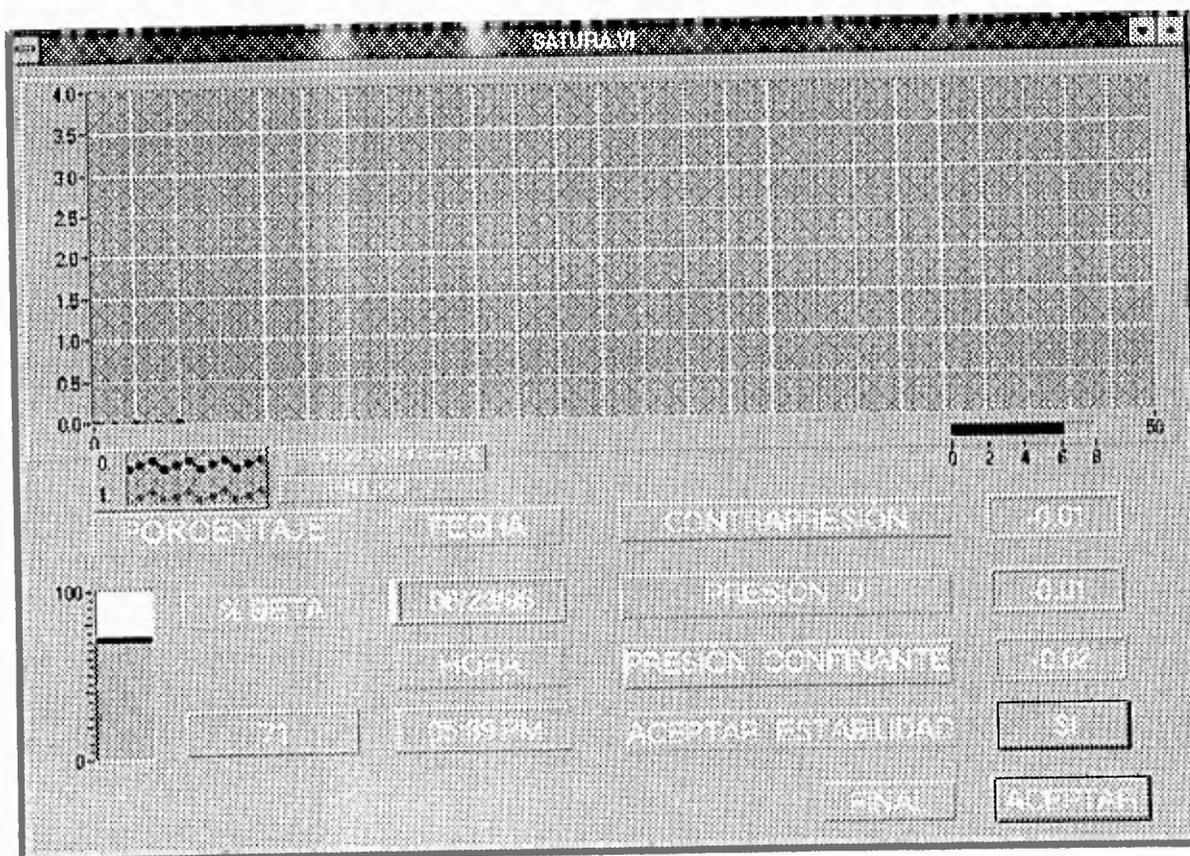


Figura 23 Pantalla principal del programa

IV.4.1 Etapa de saturación

En esta etapa las variables de interés son: presión confinante (P_c), contrapresión (C_p) y presión de poro (U), el procedimiento es ir dando cierta secuencia de incrementos alternados de P_c y C_p , y estar monitoreando la presión de poro hasta que ésta se estabilice, entonces se procede a calcular β que es un índice de saturación de la probeta; este procedimiento se prosigue hasta alcanzar una $\beta \geq 0.96$, en ese momento se acepta que la probeta está saturada. A continuación se describe la secuencia seguida en esta etapa.

1.- Inicio (se muestra la pantalla de trabajo del programa de saturación)



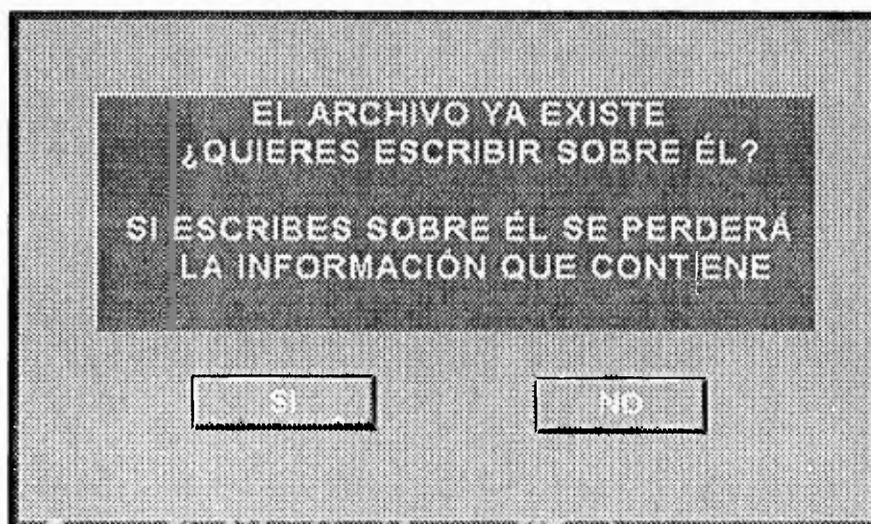
Pantalla 1 de saturación

2.- Se pide la ruta y el nombre del archivo donde serán guardados los datos generales de la probeta



Pantalla 2 de saturación

3.- Si el archivo ya existe, entonces se le indica al usuario si desea reemplazarlo o bien elegir otro nombre



Pantalla 3 de saturación

4.- Se piden los datos generales del proyecto (localización del sondeo)

DATOS GENERALES	
NOMBRE DEL PROYECTO	DGPA IN108194
LOCALIZACIÓN	Parque Ramón López Velarde
NÚMERO DE SONDEO	SM-2
ALCANCE (PROFUNDIDAD TOTAL)	35 m
OBSERVACIONES	Campo libre
ACEPTAR	

Pantalla 4 de saturación

5.- Datos generales del ensaye a realizar

DATOS DEL ENSAYE	
MUESTRA	16
PROFUNDIDAD	11.75 a 11.85 m
SERIE	1
TIPO DE CONSOLIDACIÓN	Isotrópica
OBSERVACIONES	Se utilizó agua no desaerada para el tablero
IDENTIFICACION	Ensayo de prueba del sistema
ACEPTAR	

Pantalla 5 de saturación

4.- Se piden los datos generales del proyecto (localización del sondeo)

DATOS GENERALES	
NOMBRE DEL PROYECTO	DGPA IN108194
LOCALIZACIÓN	Parque Ramón López Velarde
NÚMERO DE SONDEO	SM-2
ALCANCE (PROFUNDIDAD TOTAL)	35 m
OBSERVACIONES	Campo libre
ACEPTAR	

Pantalla 4 de saturación

5.- Datos generales del ensaye a realizar

DATOS DEL ENSAYE	
MUESTRA	16
PROFUNDIDAD	11.75 a 11.85 m
SERIE	1
TIPO DE CONSOLIDACIÓN	Isotrópica
OBSERVACIONES	Se utilizó agua no desaerada para el tablero
IDENTIFICACION	Ensayo de prueba del sistema
ACEPTAR	

Pantalla 5 de saturación

6.- Datos iniciales de la probeta (dimensiones, peso,.... etc.)

The screenshot shows a software interface titled "DATOS INICIALES DE LA PROBETA". It contains several input fields with the following values:

Label	Value
ALTURA	8.3 cm
D sup. =	3.85 cm
D med. =	3.88 cm
D inf. =	3.84 cm
Vol. inicial	97.55 cm ³
CONTENIDO DE AGUA	272 %
PESO	187.98 g

An "ACEPTAR" button is located in the bottom right corner of the form.

Pantalla 6 de saturación

7.- Se pide el nombre del archivo donde se guardarán los datos de la saturación

The screenshot shows a software interface with the following text and input:

ESCRIBE EL NOMBRE DEL ARCHIVO
DONDE SE GUARDARÁN LOS DATOS
DE LA SATURACIÓN

C:\DATOS\SATU1.WRI

ACEPTAR

Pantalla 7 de saturación

8.- Se verifica si el archivo existe, y se sigue el mismo procedimiento del paso 3

9.- Se pide el primer incremento de la presión confinante y el tiempo de espera para que se estabilice el sistema

MUEVA LA VALVULA V3 A LA POSICIÓN R2
PARA MEDIR LA PRESIÓN CONFINANTE

PRESIÓN CONFINANTE 0.00

INCREMENTO # 0

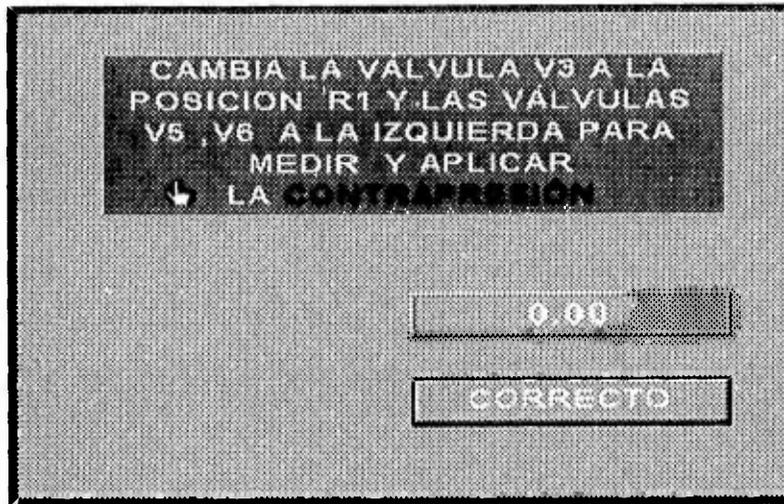
TIEMPO DE ESPERA
PARA ESTABILIZACIÓN

MINUTOS 0

CORRECTO

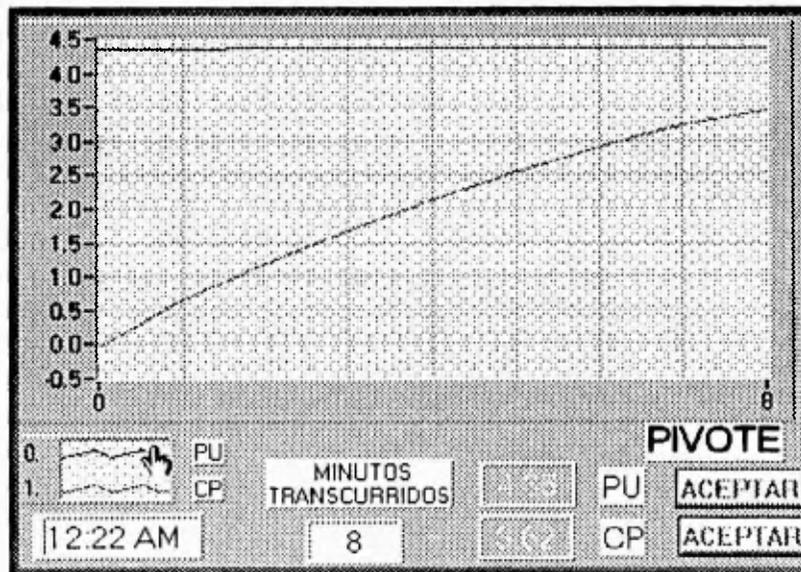
Pantalla 8 de saturación

10.- Se da un incremento a la contrapresión y se manipulan las válvulas como se indica en la pantalla para conectar los tanques de saturación a la probeta



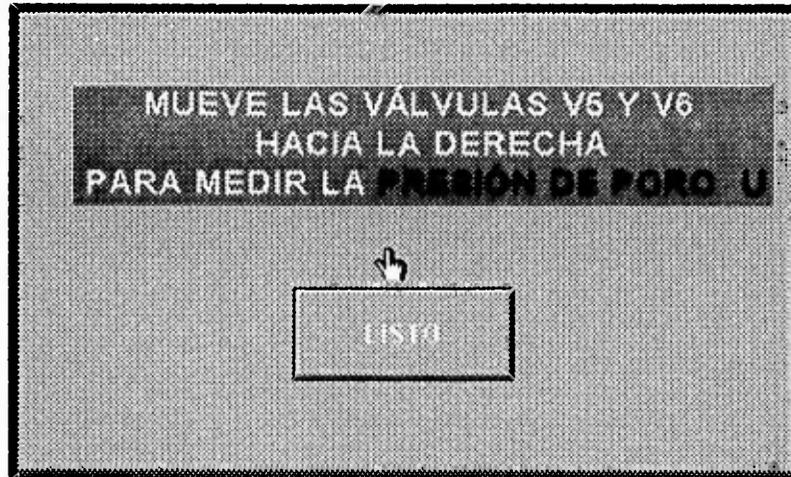
Pantalla 9 de saturación

11.- Se despliega una gráfica donde se monitorea la presión de poro junto con la contrapresión y el usuario debe decidir cuál de los dos valores se debe usar como referencia para calcular el incremento de presión U. Para ver el valor real de la presión de poro, el usuario debe mover las válvulas V5 y V6 hacia la derecha momentáneamente y regresarlas a su posición original



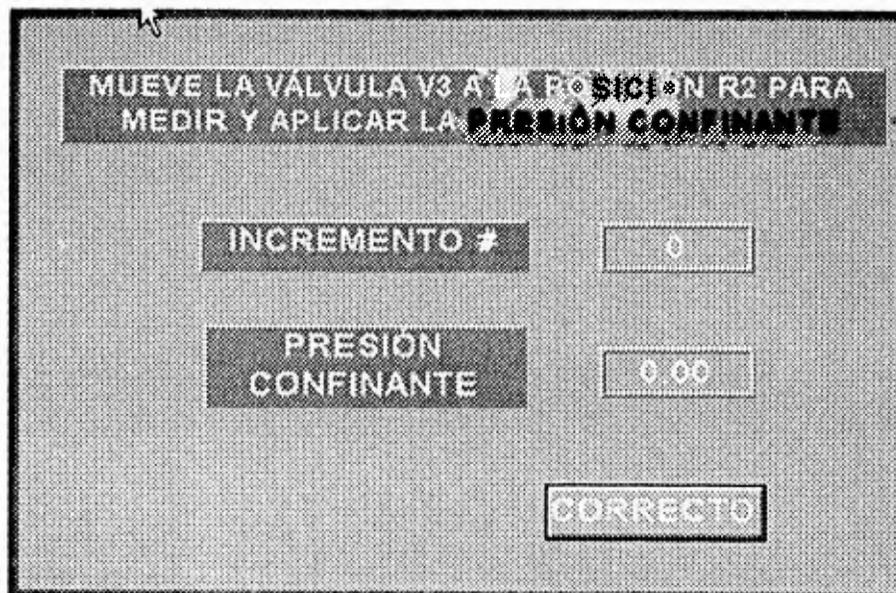
Pantalla 10 de saturación

12.- Se muestra un mensaje para hacer la manipulación de válvulas y así monitorear el incremento de la presión de poro cuando se aplique la presión confinante



Pantalla 11 de saturación

13.- Se aplica la nueva presión confinante (P_c) y se calcula el incremento de presión confinante (ΔP_c)



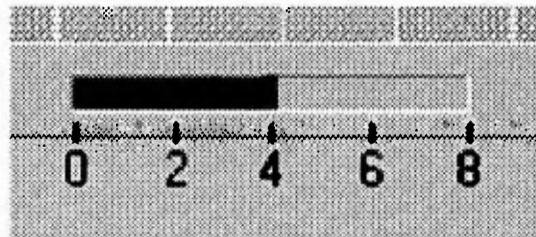
Pantalla 12 de saturación

14.- Se toma una lectura de la presión de poro cada ocho minutos, si dos lecturas consecutivas son iguales se considera que ya se estabilizó la presión U, pero si esto ocurre antes de treinta minutos se mostrará un mensaje al usuario para que decida si acepta este valor o espera más tiempo. Se calcula el incremento de presión U (ΔU) tomando como valor final la última lectura que se haya registrado; teniendo los incrementos tanto de presión de poro como de presión confinante, β se calcula como :

$$\beta = \frac{\Delta U}{\Delta P_c}$$

este valor será siempre mostrado en la parte inferior izquierda de la pantalla.

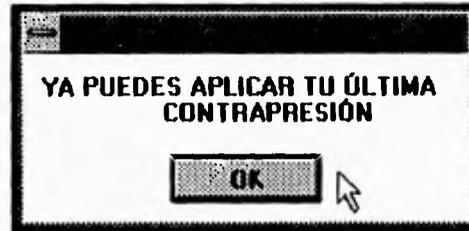
El tiempo que falta entre cada lectura se mostrará en minutos mediante una barra de color rojo que se ubica en la parte inferior derecha de la gráfica, como se muestra a continuación :



15.- Durante este período de ocho minutos, se monitorea el botón de aceptar estabilidad; esto es por si el usuario considera que ya pasó mucho tiempo en estabilizarse la presión de poro y desea continuar con el siguiente incremento de presión confinante; si es accionado este botón, el programa tomará el último valor de β y se procederá al siguiente paso

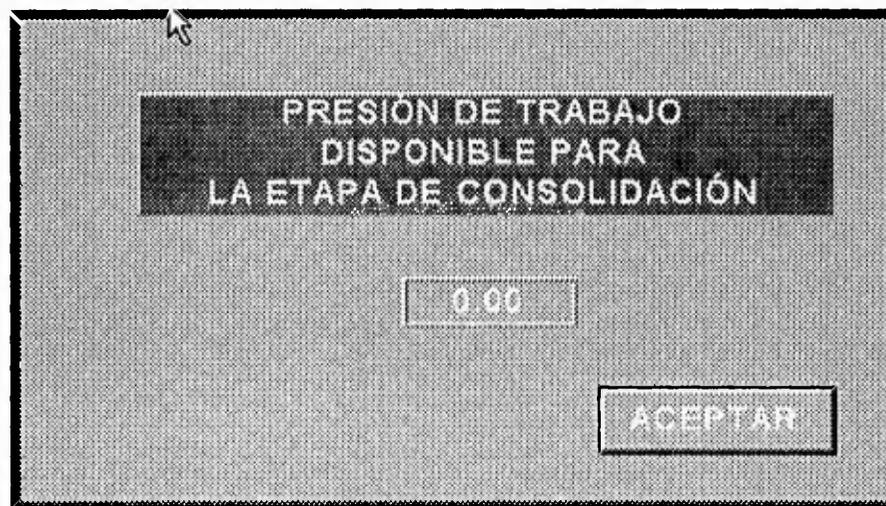
16.- Si $\beta \geq 0.96$, entonces se sigue al paso 17, si no, se regresa al paso 10

17.- Se indica que aplique la última contrapresión



Pantalla 13 de saturación

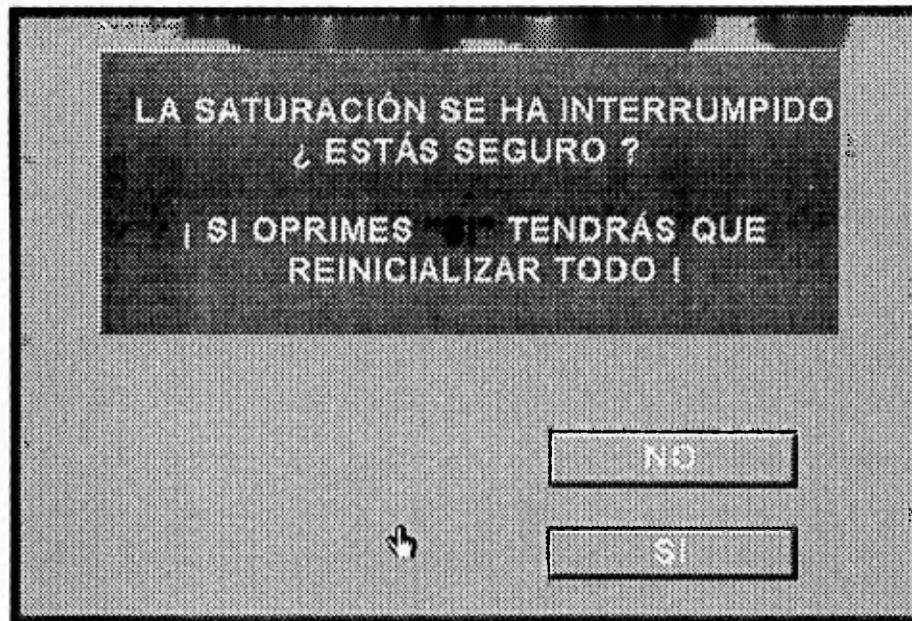
18.- Se muestra la presión de trabajo disponible para la consolidación



Pantalla 14 de saturación

19.- Fin del procedimiento de saturación.

Durante todo el ensaye se verifica si el usuario oprime el botón de final, ya que si lo hace, aparecerá el siguiente letrero :



Pantalla 15 de saturación

donde se le pregunta si está seguro, ya que se de ser así, tendrá que reinicializar todo; en este caso, no se guardan los datos previamente tomados, ya que los datos van siendo guardados en un disco virtual (D:\satu.wri), y cuando se termina el programa, son copiados al archivo que previamente haya escogido el usuario.

IV.4.2 Etapa de consolidación

Esta etapa puede ser de dos tipos: isotrópica o anisotrópica. En el caso isotrópico sólo se aplicará la fuerza necesaria para compensar la acción ejercida

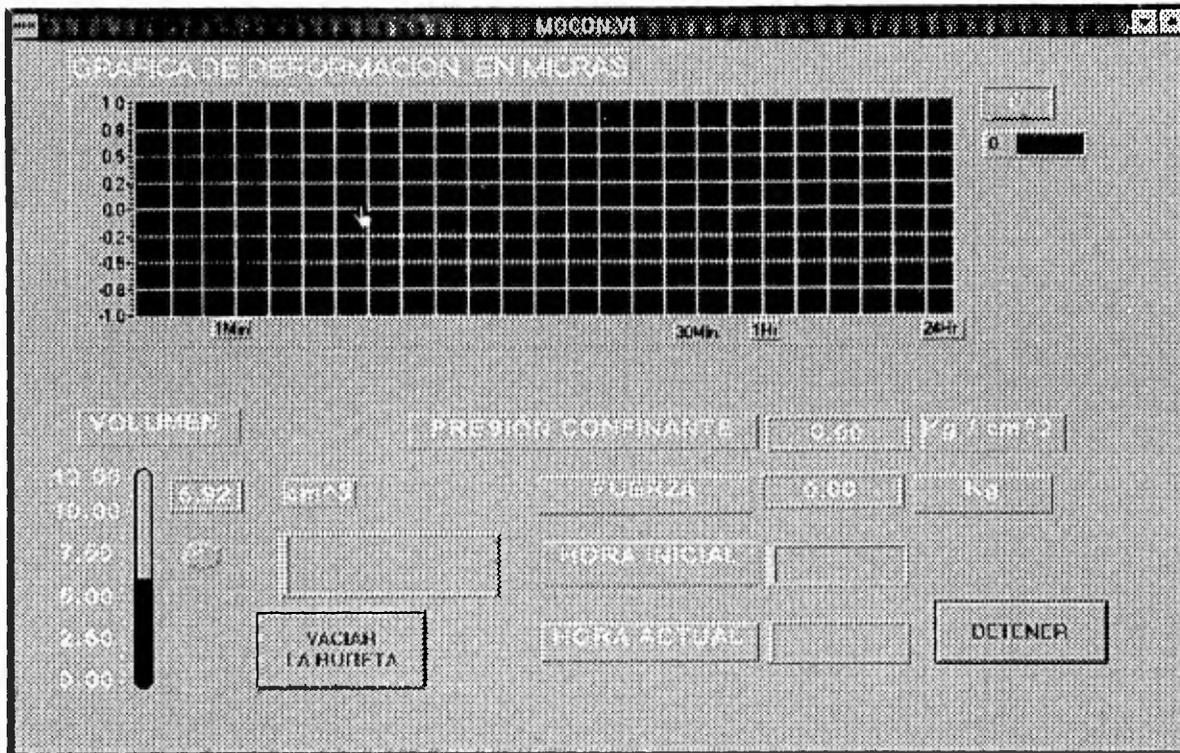
por la presión confinante de la cámara hacia el vástago; mientras que en el caso anisotrópico, además de esta fuerza se sumará otra dada por el usuario.

Las variables de interés son : fuerza (F), volumen de agua evacuado (Nivel), desplazamiento (d), presión de poro (U) y presión confinante (Pc). El procedimiento a seguir es: primero se ajusta la fuerza, ya sea para el caso isotrópico o el anisotrópico, (este ajuste se hace con el vástago sujeto), después se libera el vástago y se abren las válvulas que permiten la salida del agua, se registran los primeros segundos para observar el cambio en el desplazamiento así como en la presión de poro, en seguida el registro de datos se hará con una frecuencia determinada así como períodos determinados, como se indica a continuación :

- 1.- Cada diez segundos durante el primer minuto de la etapa
- 2.- Posteriormente, a cada minuto hasta que transcurran treinta minutos
- 3.- Después, a cada diez minutos hasta completar la primera hora
- 4.- Finalmente, a cada hora hasta completar 24 horas.

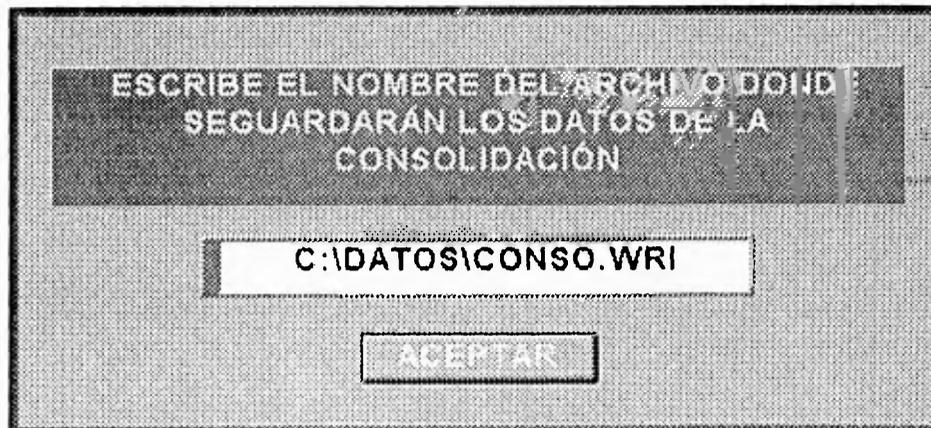
A continuación se muestran las pantallas así como la secuencia del programa de consolidación.

1.- Se muestra la pantalla de trabajo



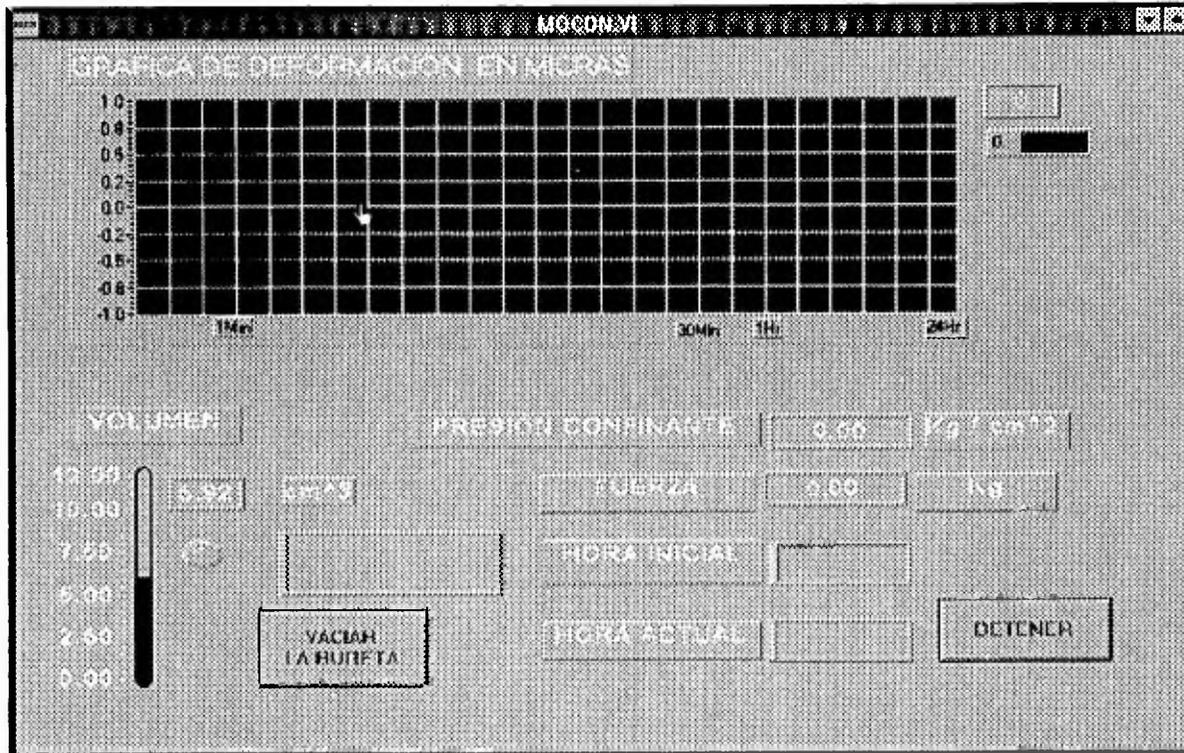
Pantalla 1 de consolidación

2.- Se pide dónde serán guardados los datos de la consolidación



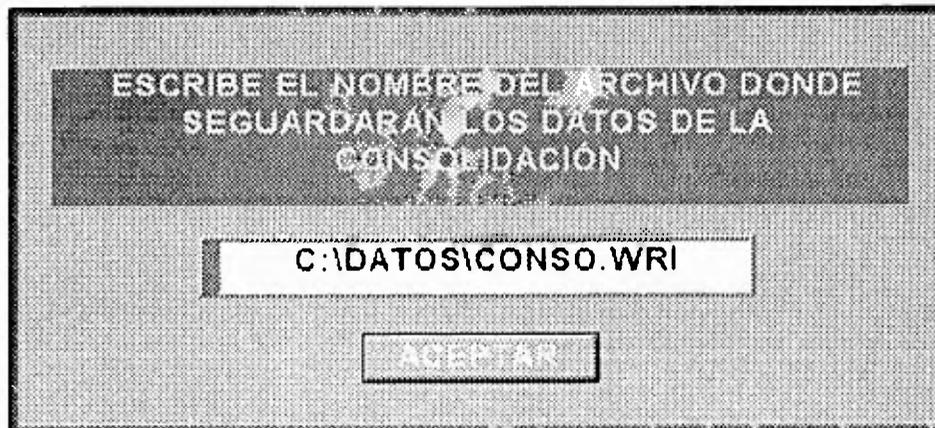
Pantalla 2 de consolidación

1.- Se muestra la pantalla de trabajo



Pantalla 1 de consolidación

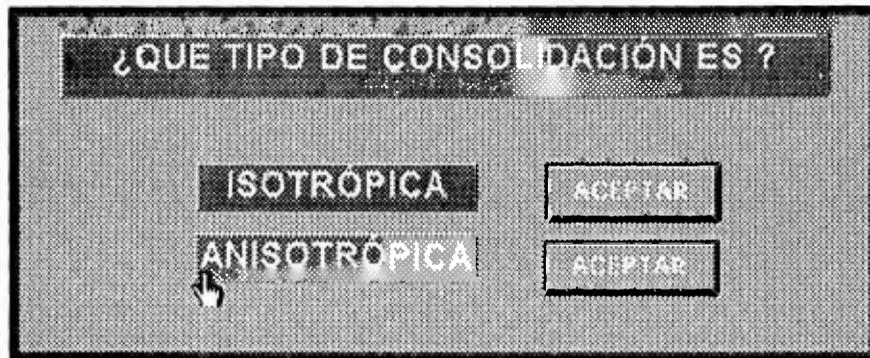
2.- Se pide dónde serán guardados los datos de la consolidación



Pantalla 2 de consolidación

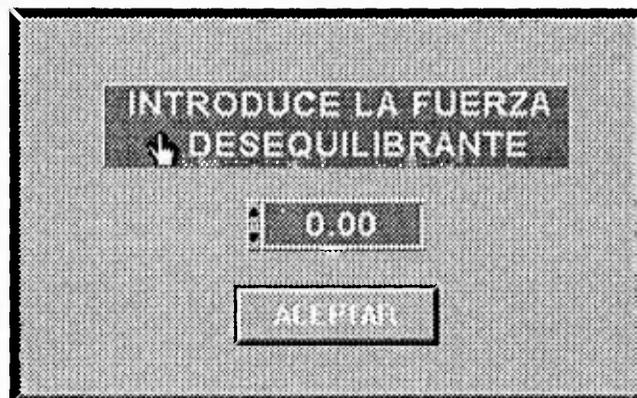
3.- En caso de que ya exista el archivo se seguirá el mismo procedimiento que en la etapa de saturación

4.- Se pregunta si la prueba será isotrópica ó anisotrópica



Pantalla 3 de consolidación

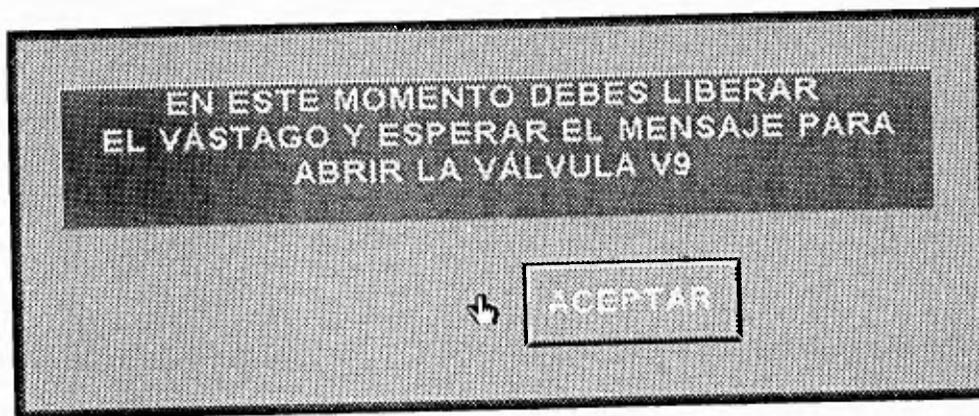
5.- En caso de que se elija un ensaye anisotrópico, se pedirá la fuerza desequilibrante, si no, continúa con el paso 6



Pantalla 4 de consolidación

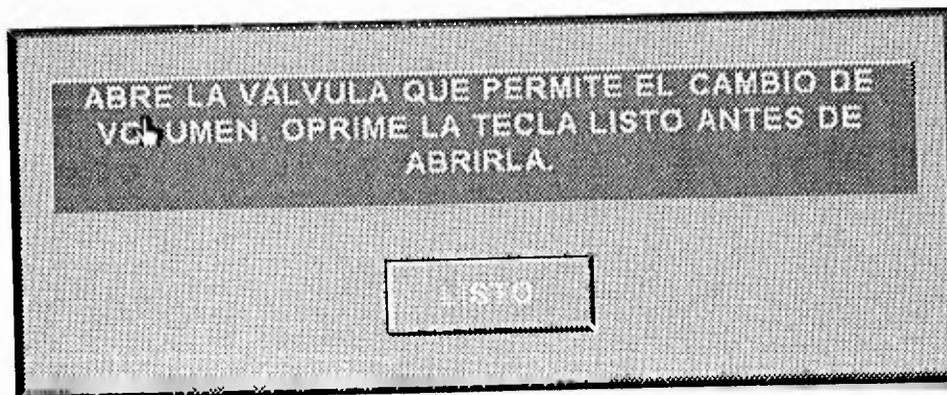
6.- Con el tipo de prueba a realizar así como de una lectura de la presión confinante, se calcula la fuerza necesaria que se debe aplicar (la computadora ajusta la fuerza por medio del generador)

7.- Cuando ya se realizó al ajuste, se le indica al usuario que ya puede liberar el vástago y abrir la válvula que permite el drenaje del agua de la probeta, también se tomará la lectura de desplazamiento para utilizarlo durante toda prueba como referencia



Pantalla 5 de consolidación

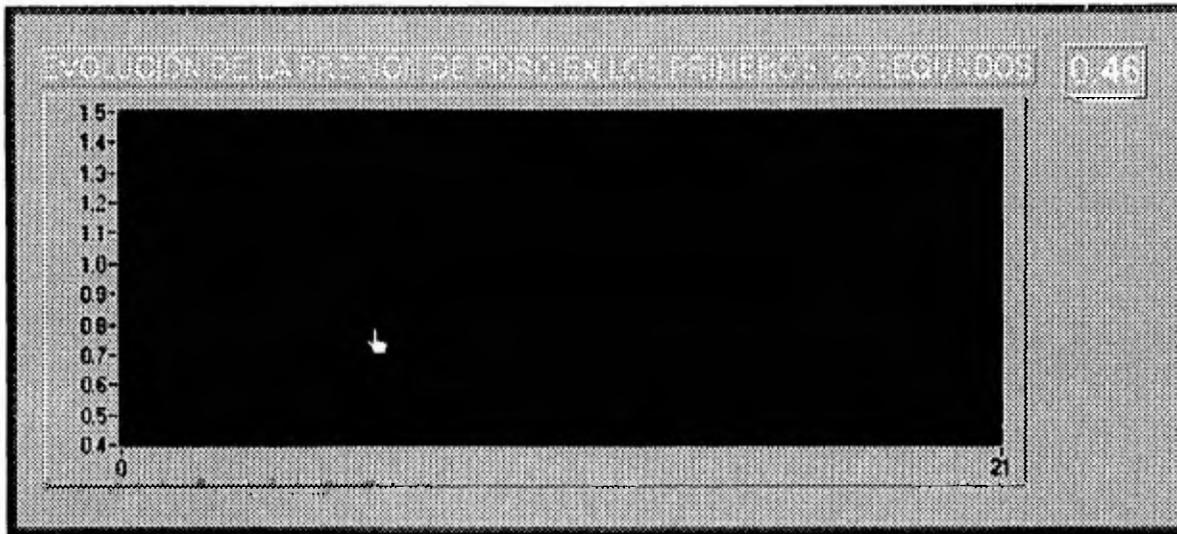
8.- Indica al usuario que puede mover las válvulas para permitir el cambio de volumen



Pantalla 6 de consolidación

5

9.- Se muestra y registra la evolución de la presión de poro (U) durante los primeros segundos



Pantalla 7 de consolidación

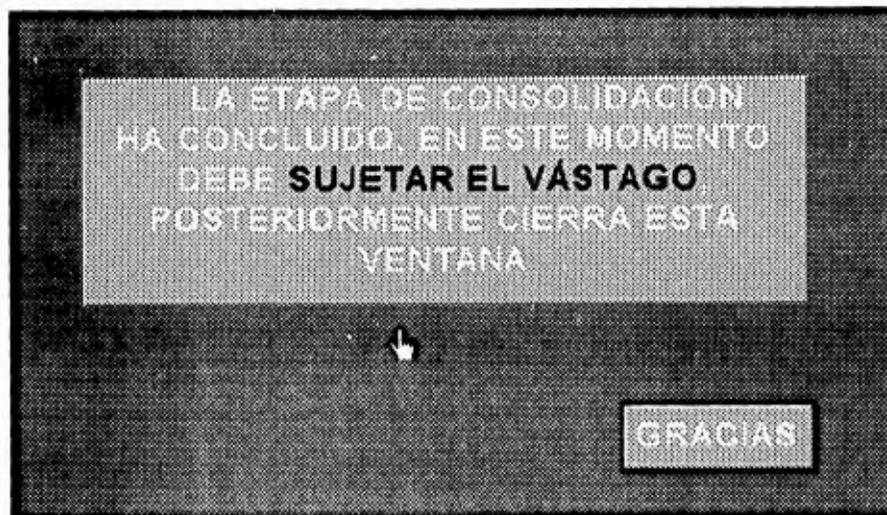
10.- Se muestran y guardan los datos a cada 10 segundos hasta que transcurra el primer minuto de haber empezado el ensaye

11.- Pasado el primer minuto, se guardarán los datos subsecuentes a cada minuto hasta que transcurran 30 minutos de haber iniciado el ensaye, monitoreándose y corrigiéndose la fuerza para que se mantenga constante; en la pantalla se estarán mostrando los valores de las variables en todo momento, excepto cuando se haga un ajuste de la fuerza

12.- Se guardarán los datos cada 10 minutos hasta la primera hora

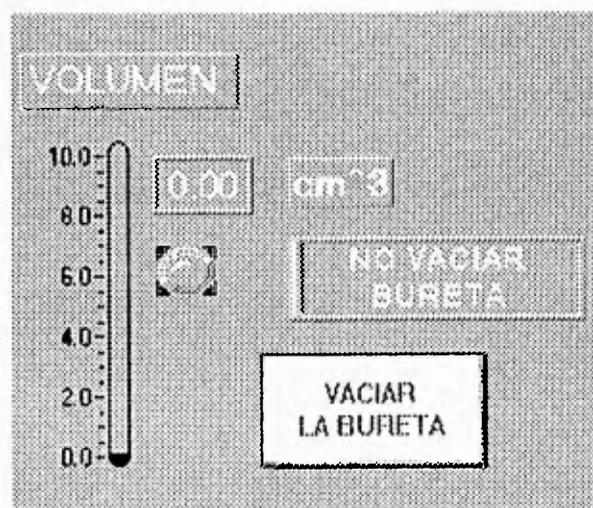
13.- Se guardarán los datos cada hora hasta que han transcurrido 24 horas

14.- Finaliza el programa y se desplegará el siguiente mensaje

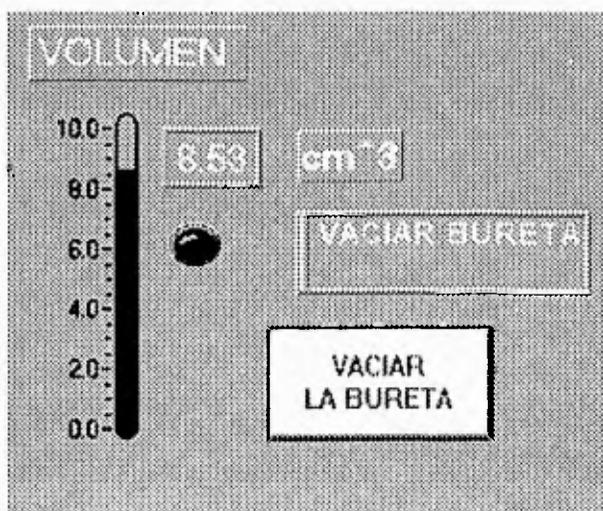


Pantalla 8 de consolidación

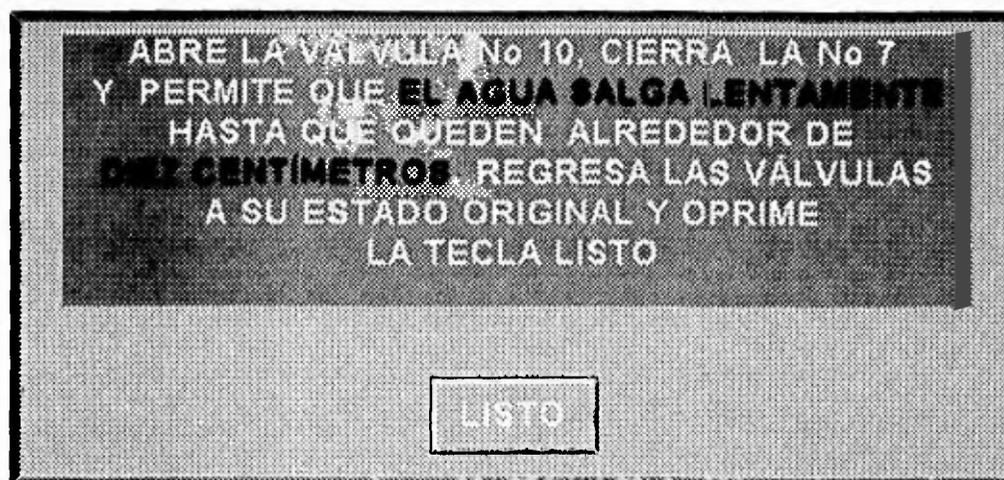
EL programa también indicará al usuario si es que en algún momento la bureta está por llenarse; cuando la bureta está a menos del 75% de su capacidad, entonces se puede observar en la parte inferior izquierda el mensaje de "no vaciar bureta" y el foco estará apagado, como se muestra a continuación:



En caso contrario, cuando la bureta alcanza más del 75% de su capacidad, suena un "beep", apareciendo el mensaje "vaciar bureta" y el foco se encenderá, como se muestra a continuación :

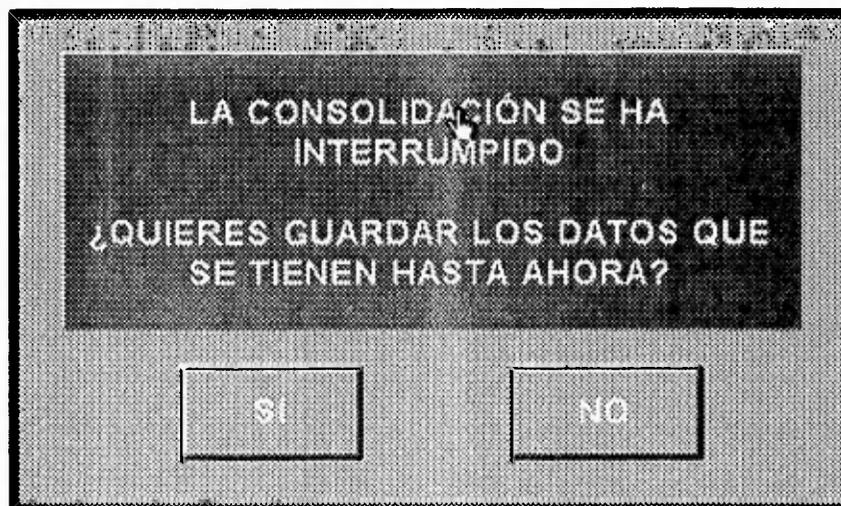


Cuando esto sucede, el usuario debe oprimir el botón que dice "vaciar bureta" y aparecerán las instrucciones para el vaciado de la bureta.



Pantalla 9 de consolidación

También puede interrumpirse el ensaye en cualquier momento; si esto ocurre, se le indicará al usuario si quiere que se guarden los datos tomados hasta ese momento.



Pantalla 10 de consolidación

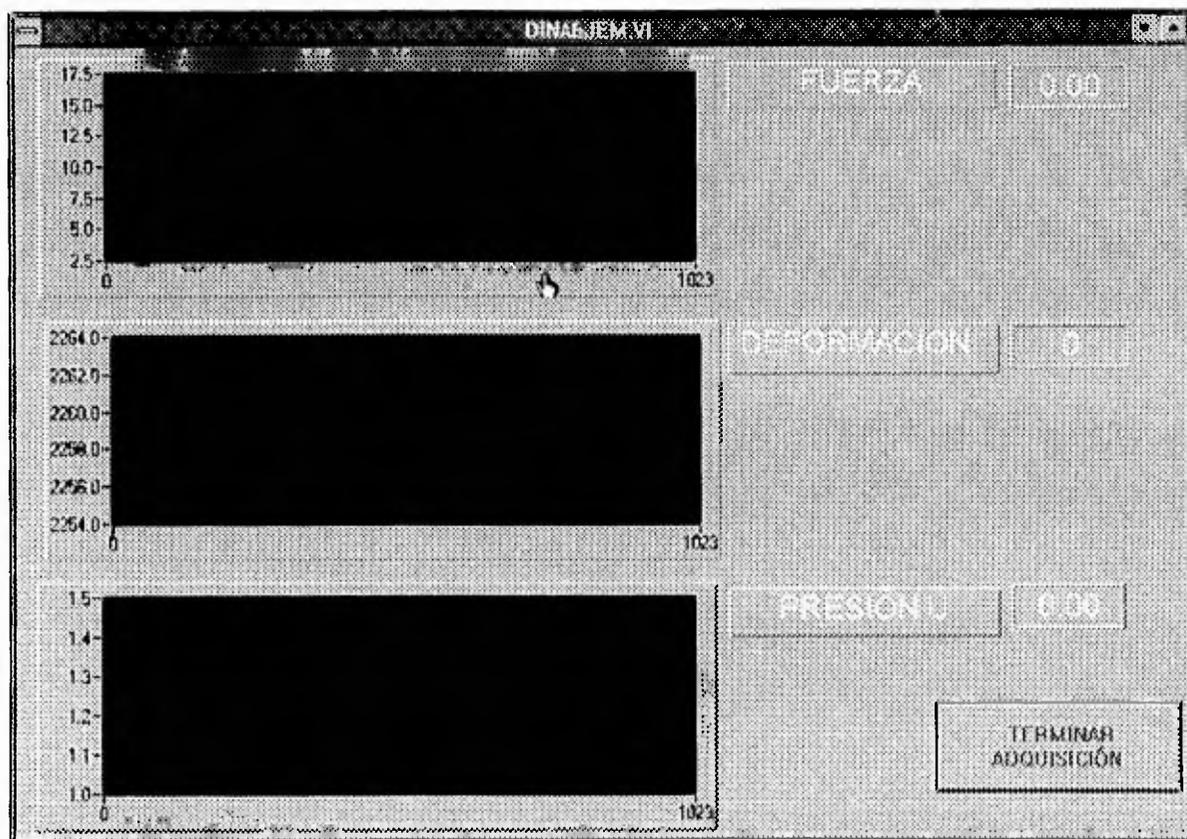
Si elige "sí"; entonces se guardarán los datos hasta ese momento capturados en el archivo que él haya elegido; si elige "no"; simplemente terminará el programa.

IV.4.3 Etapa dinámica

La etapa dinámica consiste en aplicarle una excitación senoidal axialmente a la probeta durante un cierto número de ciclos y monitorear las variables de interés, como son: desplazamiento (d), fuerza (F) y presión de poro (U).

El número de ciclos, la frecuencia y la fuerza serán elegidos por el usuario en un cuadro de diálogo (pantalla 3 de dinámica); el procedimiento de la prueba dinámica se ilustra a continuación:

1.- Se muestra la pantalla de trabajo



Pantalla 1 de dinámica

2.- Se pide en qué archivo serán guardados los datos de la etapa

ESCRIBE EL NOMBRE DEL ARCHIVO
DONDE SE GUARDARÁN LOS DATOS
DE LA ETAPA DINÁMICA

C:\DATOS\DINA.WRI

ACEPTAR

Pantalla 2 de dinámica

3.- Se verifica si existe el archivo; en caso de que ya exista, se le avisa para que modifique el nombre o la ruta

4.- Se piden los datos para iniciar la etapa (configuración de la etapa)

DATOS DE LA ETAPA DINÁMICA

SEMIAMPLITUD DE LA FUERZA	: 3.0	Kg
FRECUENCIA	: 5.0	Hz
NÚMERO DE CICLOS	: 104	
FUERZA DESIGUIBRANTE (CERO SI ES ISOTROPICA)	: 0.1	Kg/cm ²

LISTO

Pantalla 3 de dinámica

5.- Se calcula la fuerza que se debe aplicar así como los límites inferior y superior de la senoidal. Los resultados serán mostrados en la pantalla 4

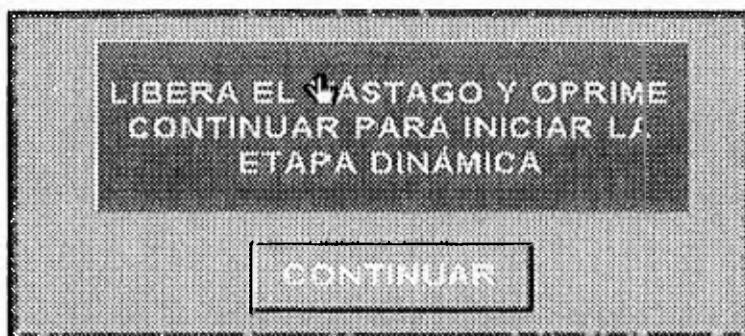


Pantalla 4 de dinámica

6.- El usuario tiene que ajustar la amplitud de la senoidal así como la fuerza constante sobre la que estará montada la senoidal; una vez hecho el ajuste, el usuario oprimirá la tecla listo (pantalla). Cabe mencionar que todos estos ajustes se hacen con el vástago sujeto

7.- Se anula la senoidal (esto es para que sea aplicada una vez que el vástago se libere)

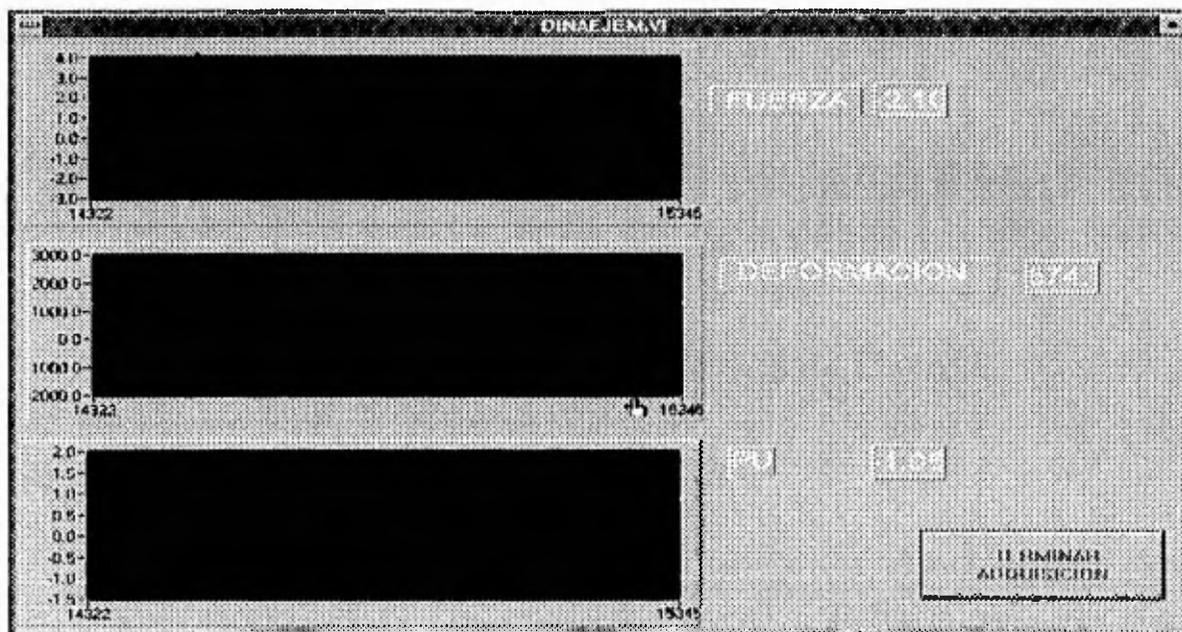
8.- Se indica al usuario que libere el vástago



Pantalla 5 de dinámica

9.- Una vez liberado el vástago, se debe oprimir el botón de "continuar" para que se reactive la excitación senoidal y comience el registro de las señales de interés hasta que se cumpla el número de ciclos que el usuario haya elegido

10.- La toma de datos se hará de tal forma que dé aproximadamente 100 puntos por ciclo. En la pantalla 6 se puede apreciar una vista general de cómo se van adquiriendo y mostrando los datos en la pantalla



Pantalla 6 de dinámica

11.- Una vez aplicado el número de ciclos deseado por el usuario, se termina el programa.

Durante todo el proceso de adquisición, se está verificando si el usuario oprime el botón de "terminar adquisición"; si lo oprime, terminará inmediatamente el programa y tendrá que reinicializar todo, ya que los datos tomados hasta ese momento sólo han sido guardados en la unidad D: que es un disco virtual.

Si el ensaye se lleva con éxito hasta el final, los datos adquiridos serán trasladados al archivo previamente seleccionado por el usuario.

La forma de almacenamiento de los datos en los archivos se ilustrará en el subcapítulo siguiente.

IV.5 Almacenamiento de la información

Durante el transcurso de los ensayos los datos capturados son guardados en un disco virtual; al finalizar la prueba, los datos almacenados en el disco virtual se transfieren automáticamente al subdirectorío C:\DATOS\, con el nombre que haya elegido el usuario.

Para el control del almacenamiento de la información se crea un archivo donde se especifican los datos generales del ensaye. En la figura 24 se muestra la forma en que son almacenados los datos generales del ensaye.

DATOS GENERALES DEL ENSAYE	
NOMBRE DE PROYECTO:	DGPA IN108194
LOCALIZACIÓN:	Parque Ramón López Velarde
NUMERO DE SONDEO:	SM-2
ALCANCE (PROFUNDIDAD):	35 metros
OBSERVACIONES :	
Campo libre	
DATOS DEL ENSAYE	
MUESTRA :	16
PROFUNDIDAD:	11.75 a 11.85 m
SERIE:	1
TIPO DE CONSOLIDACIÓN:	Isotrópica
OBSERVACIONES:	
Se utilizó agua no desaereada para el tablero	
IDENTIFICACIÓN :	
Ensaye de prueba del sistema	
DATOS INICIALES DE LA PROBETA	
ALTURA :	8.3 cm
D Sup :	3.85 cm
D med :	3.88 cm
D inf :	3.84 cm
Vol: inicial :	97.55 cm ³
CONTENIDO DE AGUA :	272 %
PESO :	187.98 g

Figura 24 Datos generales del ensaye

La forma en la que son almacenados los datos de la etapa de saturación se pueden apreciar en la figura 25.

RESUMEN DE LA ETAPA DE SATURACIÓN							
TIEMPO INICIAL	Pc	DELTA Pc	Cp	TIEMPO FINAL	PU	DELTA PU	BETA
03:34 PM	0.000	0.000	0.000	03:34 PM	0.000	0.000	0.000
03:34 PM	0.597	0.597	0.000	04:00 PM	0.155	0.155	26.051
04:00 PM	0.597	0.000	0.500	04:20 PM	0.500	0.000	0.000
04:20 PM	1.099	0.499	0.500	04:53 PM	0.783	0.283	56.619
04:54 PM	1.099	0.000	0.997	05:12 PM	0.997	0.000	0.000
05:12 PM	1.594	0.498	0.997	05:29 PM	1.333	0.336	67.513
05:30 PM	1.594	0.000	1.495	05:55 PM	1.495	0.000	0.000
05:55 PM	2.097	0.504	1.495	06:20 PM	1.866	0.370	73.547
06:21 PM	2.097	0.000	1.998	06:52 PM	1.998	0.000	0.000
06:52 PM	2.596	0.500	1.998	07:23 PM	2.383	0.385	77.007
07:25 PM	2.596	0.000	2.497	08:03 PM	2.497	0.000	0.000
08:03 PM	3.100	0.505	2.497	08:28 PM	2.905	0.409	80.873
08:29 PM	3.100	0.000	3.001	09:10 PM	3.001	0.000	0.000
09:10 PM	3.602	0.504	3.001	09:28 PM	3.424	0.424	84.162
09:29 PM	3.602	0.000	3.520	10:03 PM	3.497	0.000	0.000
10:03 PM	4.097	0.496	3.520	10:52 PM	3.936	0.439	88.432
PRESIÓN CONFINANTE FINAL =					4.097 kg/cm ²		
CONTRAPRESIÓN FINAL =					4.003 kg/cm ²		
PRESIÓN DE TRABAJO RESTANTE=					2.997 kg/cm ²		
HORA FINAL=					10:53 PM		

Figura 25 Datos de la etapa de saturación

En la figura 26 se muestra la forma en la que se almacenan los datos de la etapa de consolidación.

RESUMEN DE LA ETAPA DE CONSOLIDACIÓN					
TIEMPO (Seg)	FUERZA (Kg)	DEFORMA (micras)	VOLUMEN (cm ³)	PU (Kg/cm ²)	Pc (Kg/cm ²)
00000	9.184	00027	0.051	4.475	4.833
00011	9.157	00037	0.063	4.013	4.837
00021	9.158	00051	0.071	4.013	4.837
00031	9.179	00064	0.077	4.013	4.835
00041	9.192	00075	0.082	4.013	4.836
00051	9.213	00088	0.087	4.013	4.836
00061	9.228	00099	0.092	4.013	4.835
00132	8.919	00117	0.119	4.014	4.836
00182	8.887	00119	0.138	4.013	4.832
00242	8.953	00151	0.159	4.013	4.836
00302	9.006	00184	0.179	4.014	4.829
00362	8.871	00206	0.197	4.014	4.833
00422	9.001	00234	0.215	4.013	4.833
00482	9.010	00259	0.233	4.013	4.833
00542	8.980	00277	0.251	4.013	4.835
00602	8.916	00287	0.268	4.013	4.834
00662	8.869	00299	0.285	4.014	4.833
00722	8.832	00311	0.300	4.014	4.835
00782	8.877	00351	0.317	4.014	4.832
00842	8.854	00363	0.332	4.014	4.831
00902	9.007	00395	0.348	4.014	4.834
00962	8.926	00405	0.364	4.015	4.830
01022	8.876	00413	0.378	4.014	4.828
01082	8.841	00423	0.393	4.014	4.832
01147	8.944	00461	0.408	4.014	4.832
01209	8.917	00475	0.423	4.015	4.833
01262	8.984	00492	0.437	4.015	4.832
01322	9.004	00512	0.450	4.015	4.833
01382	9.008	00533	0.465	4.015	4.833
01442	8.998	00548	0.478	4.016	4.832
01502	8.996	00563	0.492	4.016	4.835
01562	8.990	00578	0.505	4.015	4.828
01622	8.984	00593	0.518	4.016	4.829
01682	8.992	00607	0.531	4.016	4.831
01742	8.987	00622	0.545	4.016	4.832
01802	8.976	00636	0.557	4.015	4.835
02403	8.972	00776	0.678	4.017	4.829
03003	8.970	00900	0.790	4.019	4.832
03603	8.976	01017	0.895	4.019	4.830
07205	8.995	01573	1.404	4.023	4.825
10805	8.945	01970	1.792	4.023	4.828
14405	8.918	02276	2.104	4.028	4.833
18005	8.849	02533	2.362	4.032	4.830

Figura 26 Datos de la etapa de consolidación

La forma en la que se almacena la información en la etapa dinámica se muestra en la figura 27.

RESUMEN DE LA ETAPA DINÁMICA		
FUERZA DESQUILIBRANTE = 0.1 Kg		
NUMERO DE CICLOS = 104		
SEMIAMPLITUD = 3.8 Kg		
FRECUENCIA = 5.0 Hz		
F	D	PU
Kg	um	Kg/cm ²
6.533	3991	2.671
6.465	4035	2.681
6.436	4028	2.681
6.416	4020	2.671
6.406	3999	2.656
6.367	3977	2.642
6.357	3962	2.632
6.357	3969	2.637
6.357	3977	2.642
6.377	3991	2.656

Figura 27 Almacenamiento de datos de la etapa dinámica

En la figura 27 sólo se muestra una fracción del archivo, ya que como se toman cien datos por ciclo senoidal, para mostrar el archivo completo se necesitarían más de 200 hojas.

CAPÍTULO V

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conforme se desarrollaron los programas para la captura de datos de las diferentes etapas, se realizaron pruebas tipo; en las pruebas tipo efectuadas, se utilizaron probetas del subsuelo arcilloso de la ciudad de México, dado que a él se orienta la aplicación del equipo. Una vez concluidos los programas, se realizaron varios ensayos completos para probar al sistema en conjunto, obteniéndose los resultados descritos en IV.5.

Comparando el proceso de adquisición de datos de la versión original de la TXC y la versión automatizada, se pueden observar las ventajas de este último sobre el primero, como son :

- 1) en la etapa de saturación del ensaye, en ambas versiones se necesita la presencia del usuario para la manipulación de las válvulas del tablero de control, pero en la versión automatizada, las lecturas no dependen de la apreciación del usuario
- 2) en la etapa de consolidación el usuario sólo necesita configurarla al inicio y el sistema tomará los datos en los tiempos predeterminados
- 3) en la etapa dinámica se adquieren las señales con una resolución de 100 puntos por ciclo, lo cual es imposible en la versión manual ya que el usuario tenía que obtener los datos a partir de la lectura de una gráfica trazada sobre un papel milimétrico como se aprecia en la figura 28. La gráfica 28 b es un registro de la

fuerza contra el tiempo con una amplitud de 6 kg pico a pico, y la gráfica 28 a es la presión de poro contra el tiempo, donde cada cuadro es $0.1 \frac{kg}{cm^2}$

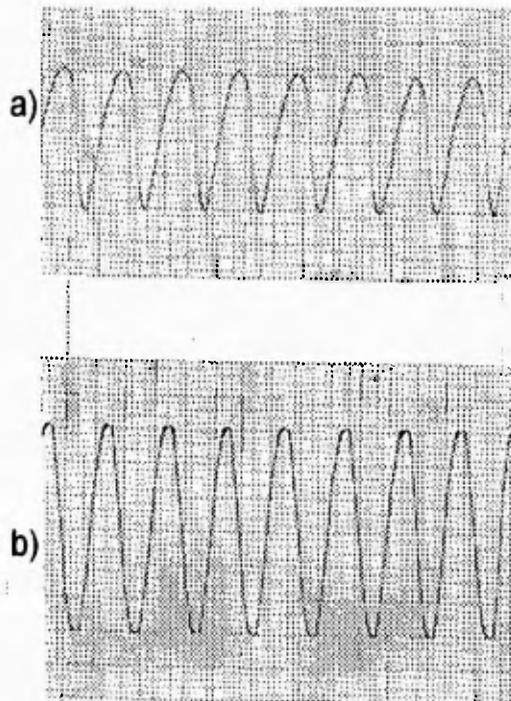


Figura 28 a) Gráfica de F vs. t b) PU vs. t
[versión original del equipo]

- 4) el ajuste del generador se hace desde la computadora
- 5) la realización del ensaye se facilita porque se muestran ventanas con el procedimiento a seguir
- 6) el usuario no necesita tener conocimientos de electrónica para poder hacer uso del equipo

fuerza contra el tiempo con una amplitud de 6 kg pico a pico, y la gráfica 28 a es la presión de poro contra el tiempo, donde cada cuadro es $0.1 \frac{kg}{cm^2}$

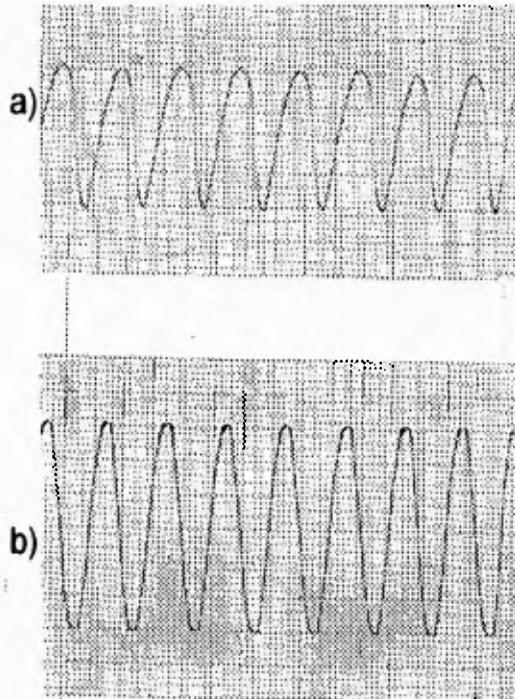


Figura 28 a) Gráfica de F vs. t b) PU vs. t
[versión original del equipo]

- 4) el ajuste del generador se hace desde la computadora
- 5) la realización del ensaye se facilita porque se muestran ventanas con el procedimiento a seguir
- 6) el usuario no necesita tener conocimientos de electrónica para poder hacer uso del equipo

7) la información capturada se almacena en el disco duro de la PC, con lo cual se facilita su procesamiento posterior mediante hojas electrónicas de cálculo o programas específicos, obteniéndose así resultados rápidamente

De los resultados obtenidos, se concluye que los objetivos planteados fueron cubiertos satisfactoriamente; además, se dejan las bases para mejorar al equipo, como sería la automatización del manejo de las válvulas, y poder realizar ensayos donde la variable de control sea la deformación axial que experimenta la probeta. Estas mejoras son factibles de realizarse por el diseño modular del programa, y el acondicionamiento de señales efectuados.

Finalmente, para tener un desempeño óptimo del equipo se hacen las siguientes recomendaciones :

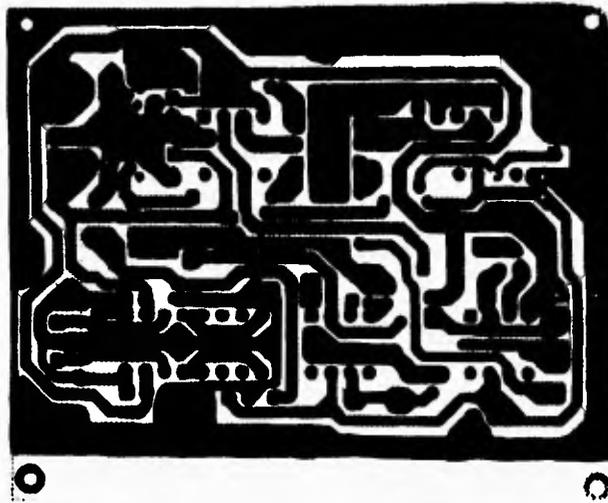
- 1.- Instalación de la "tierra física"
- 2.- Se debe encender cada una de las partes del equipo 30 minutos antes de iniciar un ensaye
- 3.- Asegurarse de que no haya burbujas en las líneas que conducen agua
- 4.- Utilizar agua desaerada, fresca
- 5.- Conectar a tierra física el marco metálico de la Cámara Triaxial
- 6.- Revisar que los cables estén conectados correctamente
- 7.- No mover las líneas de agua y de aire durante el ensaye

- 8.- Sellar oportunamente cualquier fuga en las líneas
- 9.- Mientras no exista instalación de tierra física, se deberá conectar las cubiertas de los acondicionadores al chasis de la computadora, en caso contrario no será necesaria esta conexión
- 10.- Seguir las instrucciones de manipulación de válvulas que indica el programa
- 11.- Realizar la calibración periódica de los acondicionadores
- 12.- Es preferible que el marco y la Cámara Triaxial estén dispuestos en medio del tablero de saturación y la consola electroneumática, ello con el fin de aminorar la longitud de las líneas de alimentación neumática del pistón de carga y así reducir el tiempo de respuesta de este último.

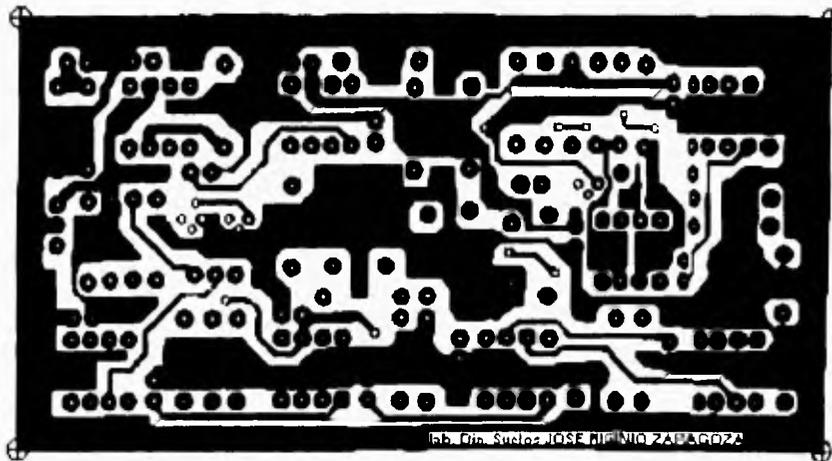
APÉNDICE A

CIRCUITOS IMPRESOS Y DIAGRAMAS

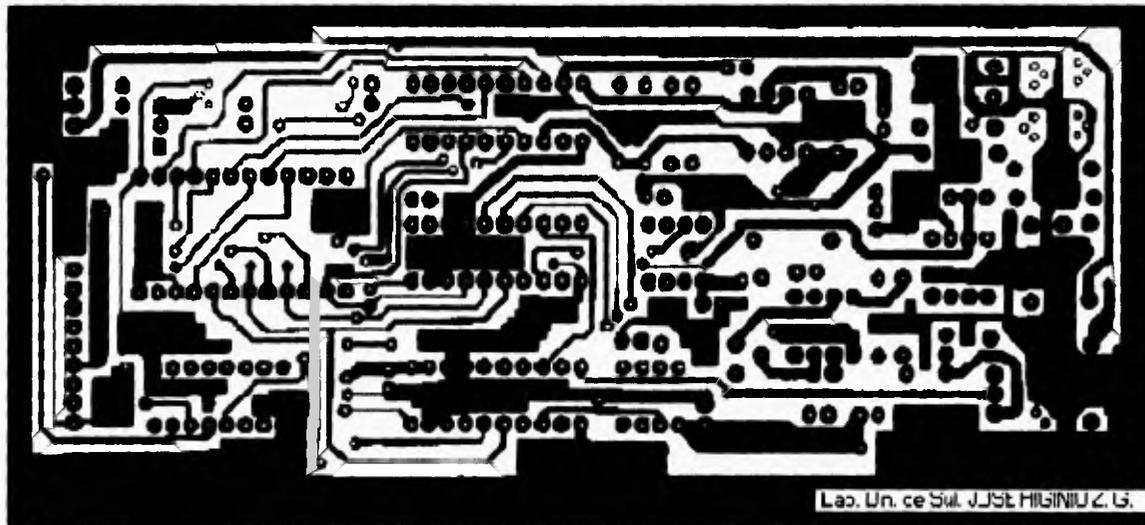
a) mascarilla del circuito impreso, de los acondicionadores de fuerza, nivel y presión



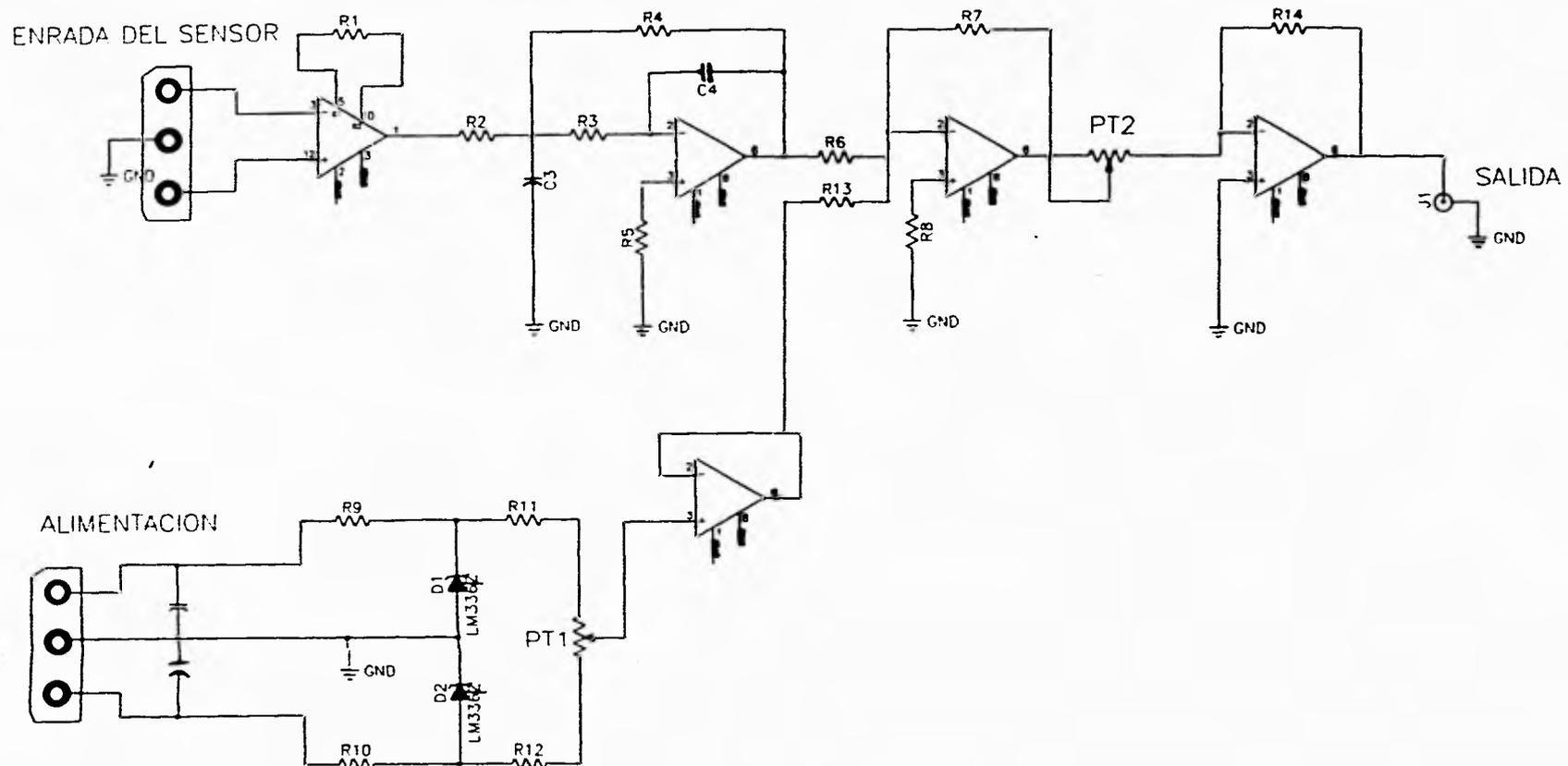
b) mascarilla del circuito impreso del acondicionador de desplazamiento lineal



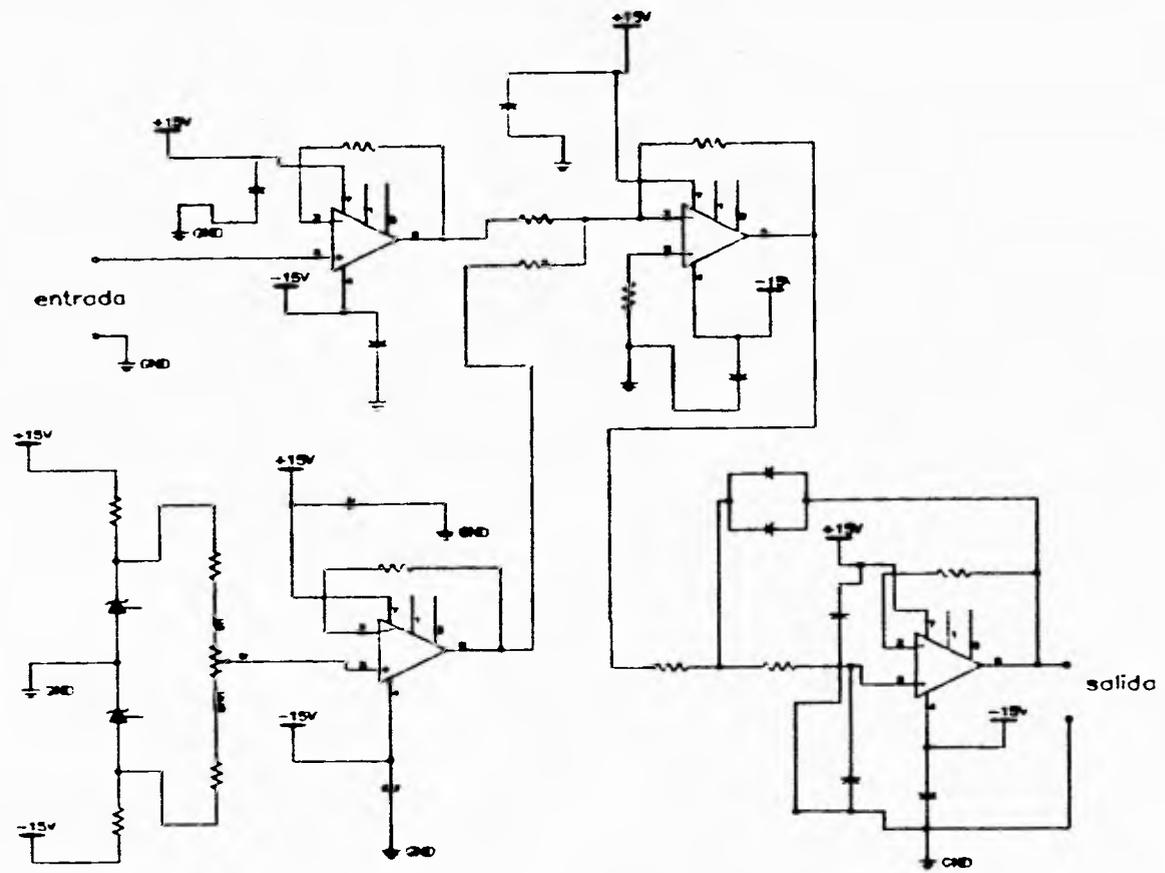
c) mascarilla del circuito impreso del generador de onda senoidal



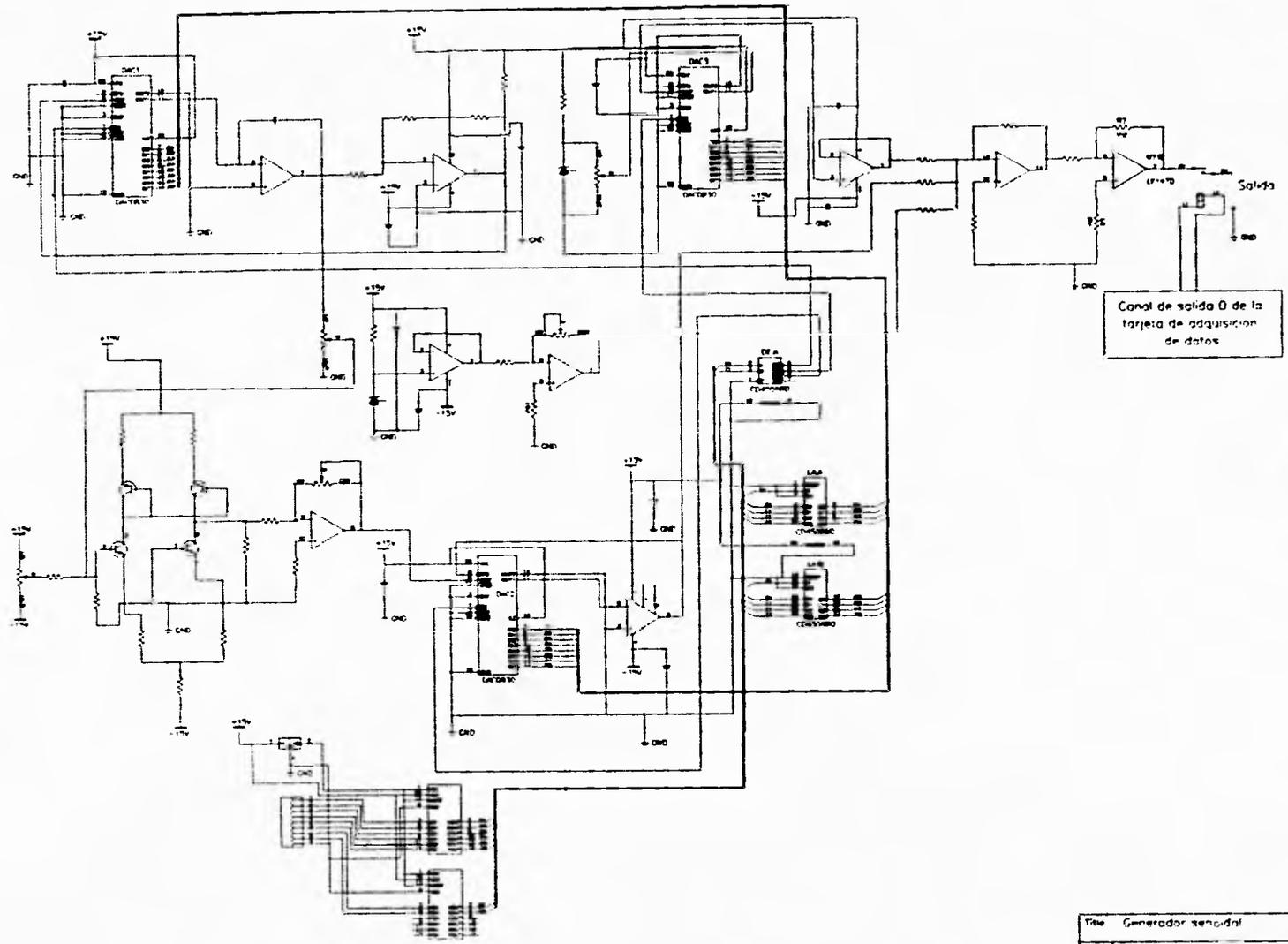
A continuación se muestran los diagramas eléctricos de los acondicionadores y del generador, así como el diagrama a bloques de la tarjeta.



Title Acondicionadar general		
Size D	Number	Rev
Date JUNIO 95	Drawn by JL. SORIANO	
Filename	Sheet 1 of 1	



Title			Desplazamiento lineal		
Size	Number				Rev
A1					
Date	Junio 95	Drawn by		[Signature]	
Filename	des.s01	Sheet		1 of 1	



Title			Generador senoidal		
Size	Number	Rev			
A1					
Date	Junio 95	Drawn by	gpo	bagan	
Filename	seno-331401	Sheet	1	of 1	

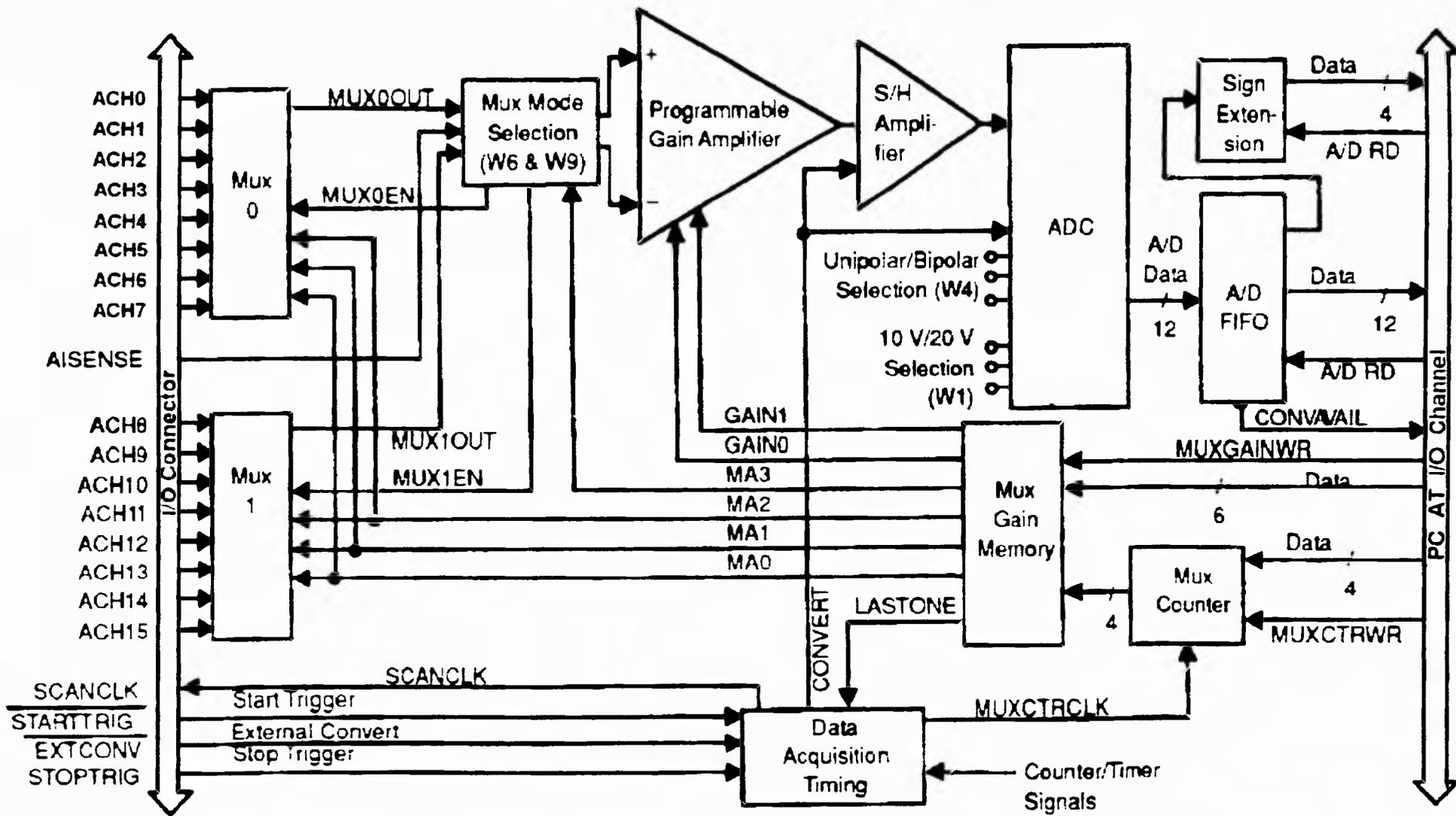


Diagrama a bloques de la tarjeta de adquisición de datos

APÉNDICE B

CALIBRACIÓN DE ACONDICIONADORES

Para realizar una correcta calibración, se deberá encender el equipo media hora antes de iniciarla (acondicionador a calibrar y computadora).

B.1 Calibración del acondicionador del sensor de fuerza

El procedimiento para la calibración del acondicionador se basa en el uso de un programa específico y se describe a continuación :

a) se tiene que desmontar la celda de carga de la TXC y montarla en una estructura fija donde se pueda aplicar una fuerza conocida y totalmente vertical como se muestra en la figura B1. El peso de la estructura que sostendrá a las pesas será compensado por medio de un juego de poleas y contrapesos para que no influyan en la medición

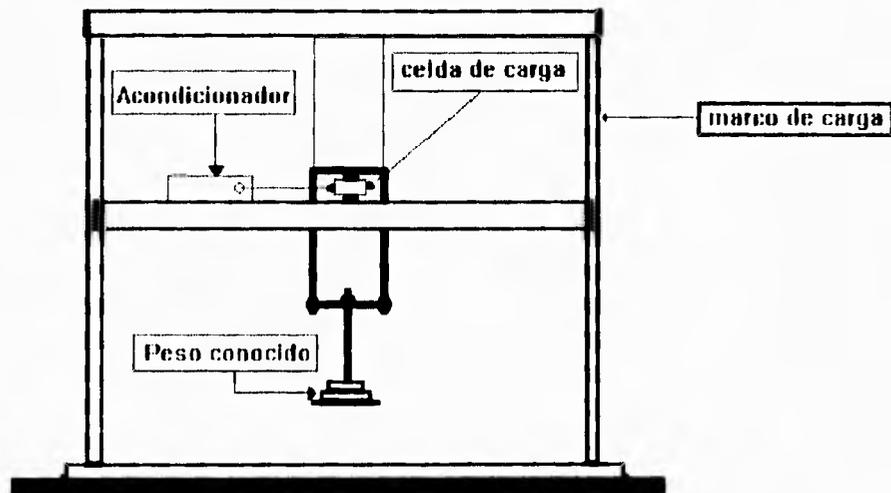


Figura B1 Montaje de la celda de carga

5

b) la calibración se hará junto al marco fijo, con lo que habrá que llevar la computadora, el acondicionador y la fuente de voltaje al sitio

c) una vez todo en el sitio de calibración, se conectará la celda de carga al acondicionador y este último a la computadora

d) se correrá el programa de calibración

e) en el programa aparecerá la lectura que se hace de la celda de carga; sin colocar algún peso, se procede entonces a ajustar a cero con el potenciómetro que se encuentra en la parte frontal del acondicionador

f) una vez logrado el paso anterior se coloca un peso de 2 kg y se observa en la computadora la lectura, si ésta es de 2 kg, el acondicionador está calibrado, si no, se procederá a quitar la tapa superior del acondicionador y mover el potenciómetro PT2 que se indica en la figura B2 hasta que se observe una lectura de 2 kg

g) ya que se haya logrado la lectura de 2 kg, se quitará el peso y se volverá ajustar el cero de referencia

h) después de ajustar el cero, se volverá a colocar el peso de 2 kg y se observará la lectura en la computadora, si es la correcta, se ha logrado la calibración, si no, se volverá ajustar con el potenciómetro PT2 y se hará nuevamente el paso anterior.

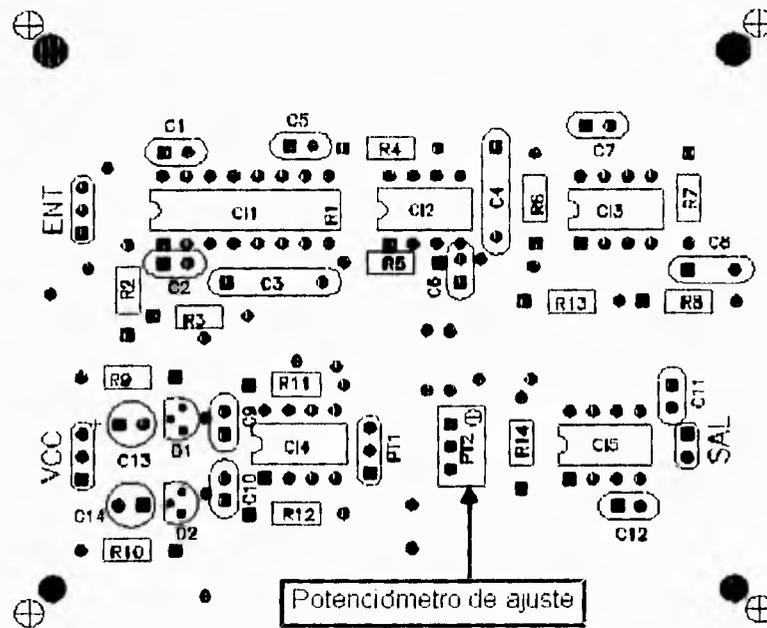


Figura B2 Esquema de la parte superior del circuito del acondicionador
(celda de carga y sensores de presión)

B.2 Calibración del acondicionador de nivel

Para la calibración se utiliza un programa específico y se siguen los siguientes pasos :

- a) se deben llenar las líneas de agua, teniendo cuidado de que no existan burbujas de aire, ya que éstas afectan drásticamente la medición
- b) llenar de agua la bureta hasta los 10 cm
- c) se correrá el programa de calibración y se ajustará el cero

d) una vez ajustado el cero se procede a llenar la bureta hasta los 20 cm, con lo cual se debe observar una lectura de 8.4 cm^3 , si la lectura es correcta el acondicionador está calibrado, si no, se procede a hacer el ajuste

e) como en el caso anterior se quitará la tapa superior del acondicionador y se moverá el potenciómetro PT2, que se ilustra en la figura B2, hasta que se obtenga la lectura correcta

f) teniendo la lectura correcta en la pantalla, se vacía la bureta hasta los 10 cm otra vez y se vuelve a ajustar el cero

g) se procede a llenar la bureta nuevamente hasta los 10 cm y se observará la lectura en la pantalla, si es la correcta, el acondicionador estará ajustado, si no, se procederá a hacer otro ajuste a PT2 y se volverá a hacer el paso anterior hasta que se logren las lecturas correctas.

B.3 Calibración de los acondicionadores de los sensores de presión

La calibración de estos acondicionadores se hará como sigue:

a) se conectará un manómetro de precisión (patrón de referencia) a la entrada "Columna hg" que se encuentra en el panel de control de la TXC

b) mediante la manipulación de las válvulas se hace que la presión de control llegue tanto al sensor de presión (cuyo acondicionador se quiere calibrar) como al manómetro de precisión

c) se correrá el programa de calibración y se ajustará el cero del acondicionador mediante su respectivo potenciómetro

d) se aplicará una presión de $3 \frac{kg}{cm^2}$, y se observará la lectura en la pantalla, si es la correcta, el acondicionador está calibrado, si no, se hará el ajuste con PT2 (figura B2) hasta obtener la lectura correcta y se seguirá el procedimiento que en los anteriores acondicionadores.

B.4 Calibración del acondicionador de señal del sensor de desplazamiento lineal

La calibración del acondicionador de desplazamiento lineal se realiza utilizando un programa específico de calibración y se siguen los siguientes pasos :

a) se desmonta el "DC-DC" del marco de la TXC y se instala en el soporte de calibración como se muestra en la figura B3



Figura B3 Soporte de calibración del "DC-DC"

b) se verifica que el acondicionador de señal esté conectado correctamente a la fuente de alimentación y a la caja de conexiones

c) se ejecuta el programa de calibración

d) se destapa la fuente de alimentación de los acondicionadores

e) se ajusta el micrómetro a cero, se coloca al DC-DC de tal forma que la deformación detectada en pantalla sea cero (vástago a mitad de carrera); para hacer el ajuste fino (deformación desplegada dentro del rango de $\pm 300 \mu\text{m}$) utilice el potenciómetro multivuelta que está en la caja del acondicionador

f) se manipula el micrómetro patrón para que mida $10000 \mu\text{m}$, si la lectura desplegada en pantalla es $10000 \mu\text{m}$, el acondicionador está calibrado; si la lectura es diferente, se mueve el tornillo del potenciómetro (ver figura B4) del circuito impreso de la fuente de alimentación hasta que la lectura sea $10000 \mu\text{m}$

g) se manipula el micrómetro patrón para indicar $0 \mu\text{m}$, si la lectura desplegada no es cero, se mueve el potenciómetro multivuelta hasta que aquella sea cero; se mueve el micrómetro para que marque $10000 \mu\text{m}$, si la lectura desplegada es diferente, se repite el inciso "g", en caso contrario, el acondicionador está calibrado

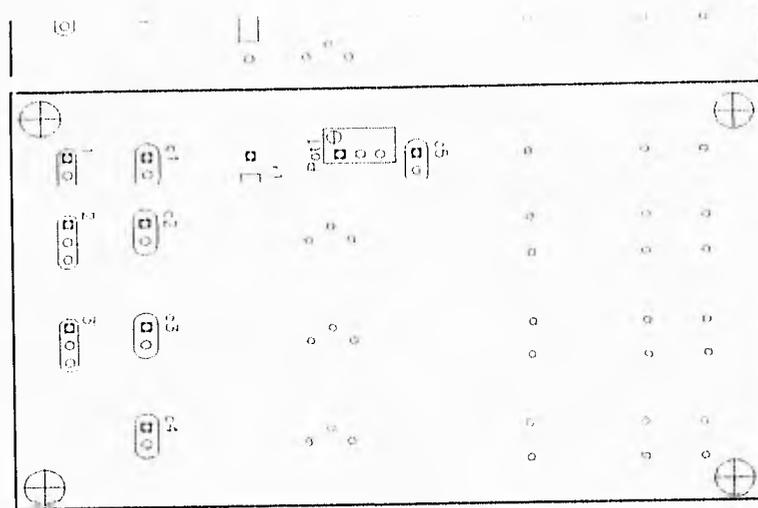


Figura B2 Circuito impreso de la fuente de alimentación

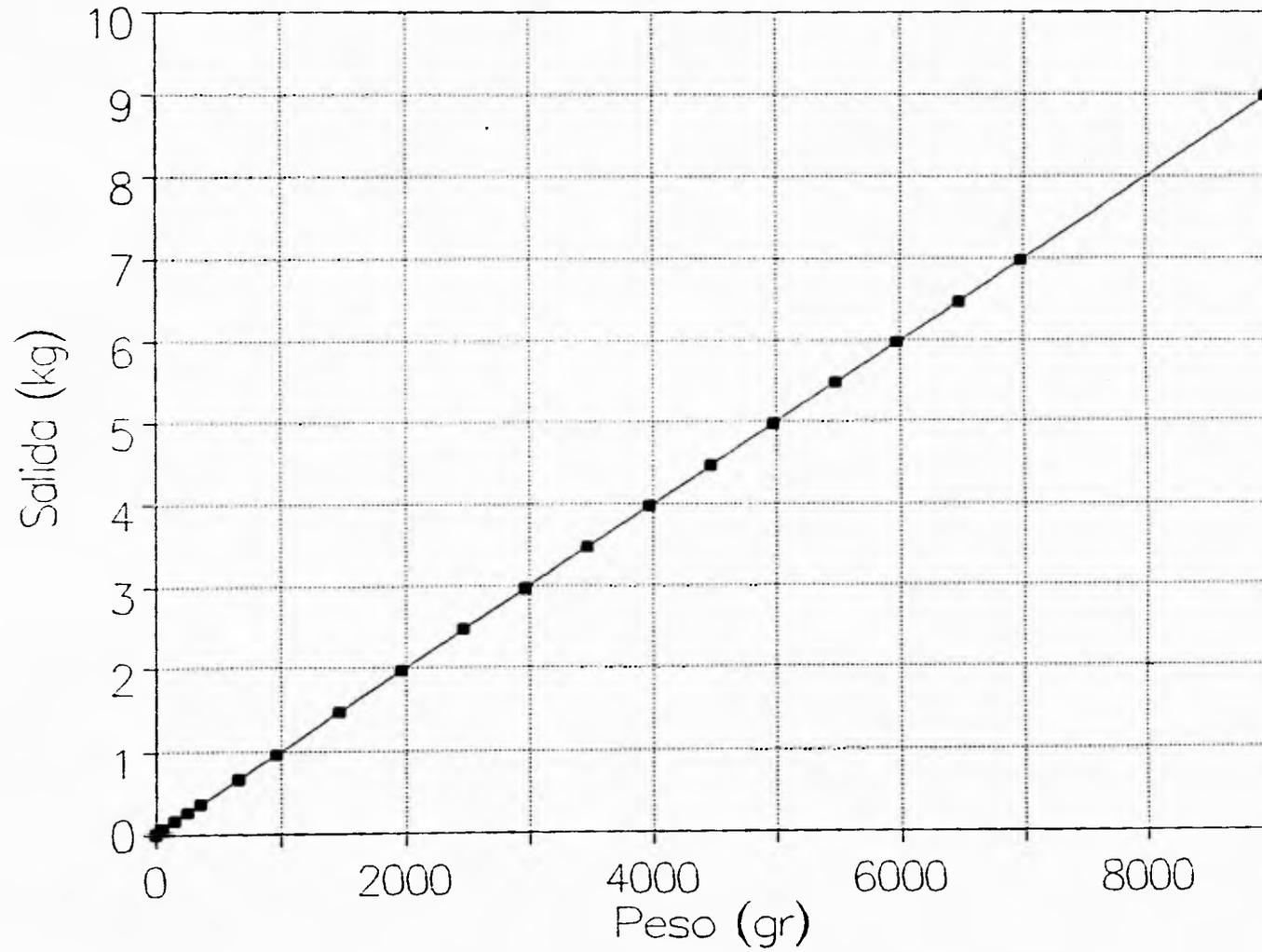
Acondicionador de fuerza

$r^2=0.999998497$ FitStdErr=0.00341002392 Fstat=11974244.7

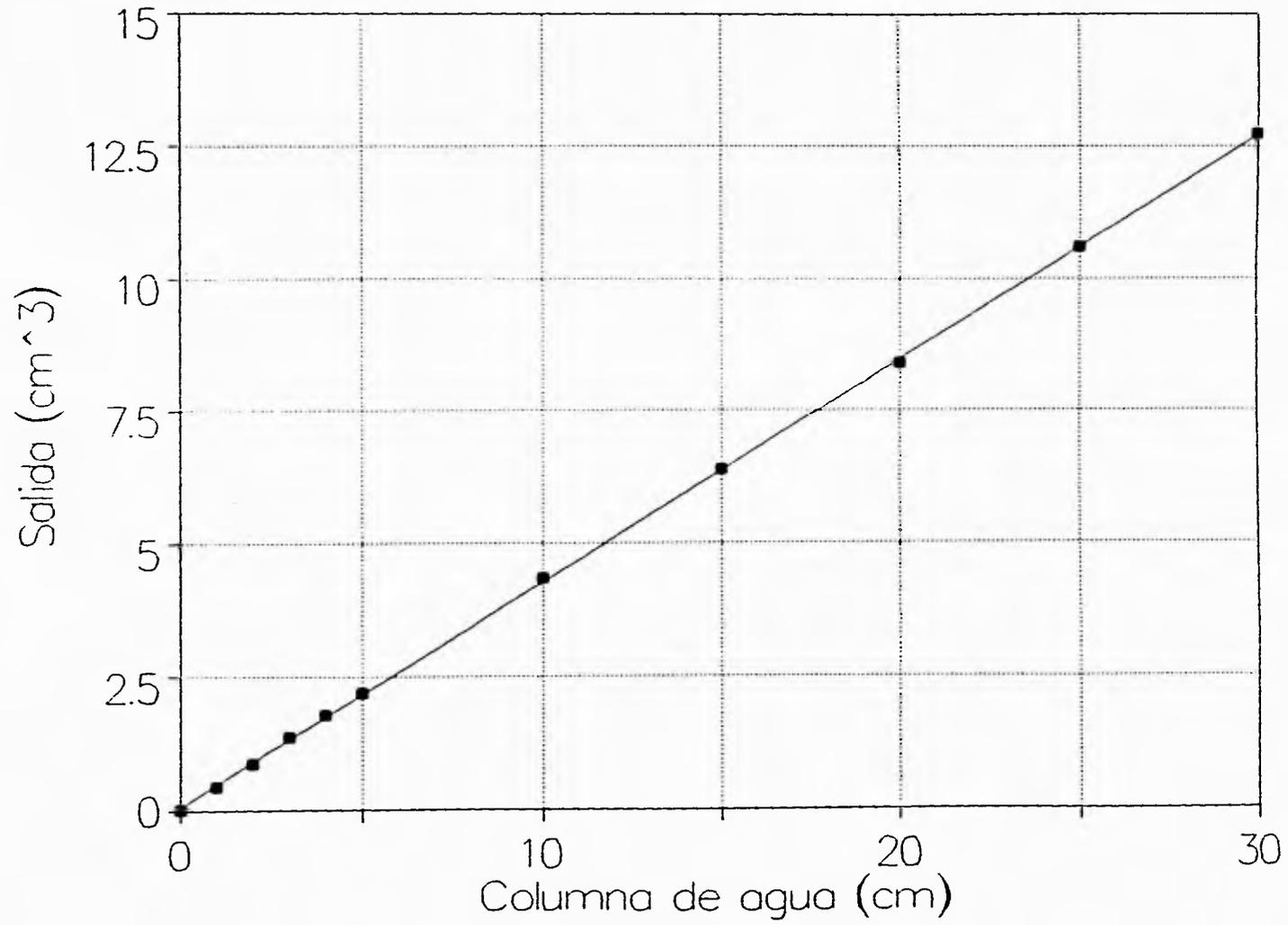
Rank 26 Eqn 1 $y=a+bx$

$a=-0.00014570501$

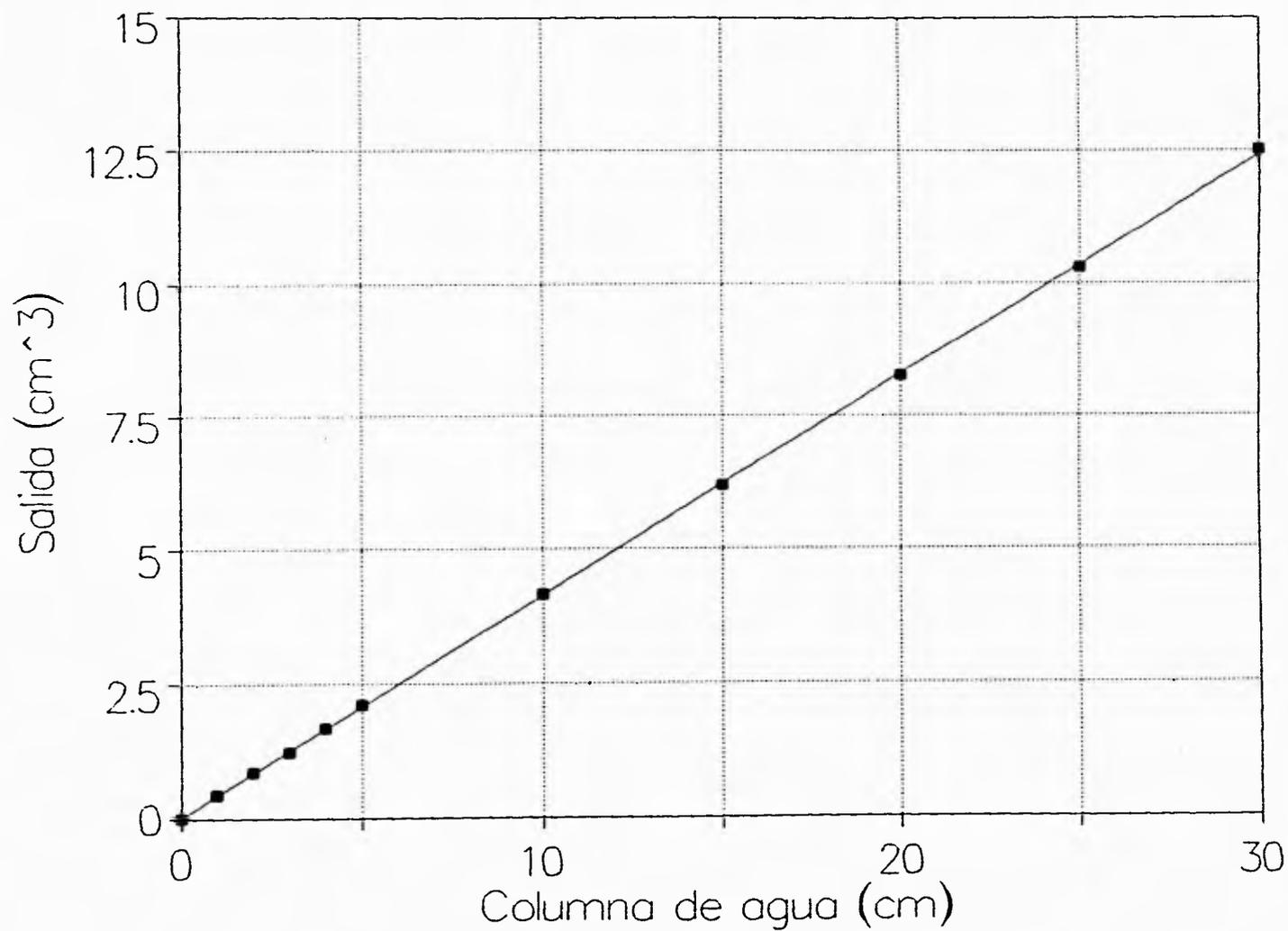
$b=0.00099928056$



Acondicionador de nivel (Cp = 0)
 $r^2=0.999892766$ FitStdErr=0.0483861903 Fstat=83919.7023
Rank 38 Eqn 1 $y=a+bx$
 $a=0.038004946$
 $b=0.42210387$



Acondicionador de nivel ($C_p = 3 \text{ kg/cm}^2$)
 $r^2=0.999905331$ FitStdErr=0.044592993 Fstat=95058.9037
Rank 37 Eqn 1 $y=a+bx$
 $a=-0.0011034625$
 $b=0.41402729$



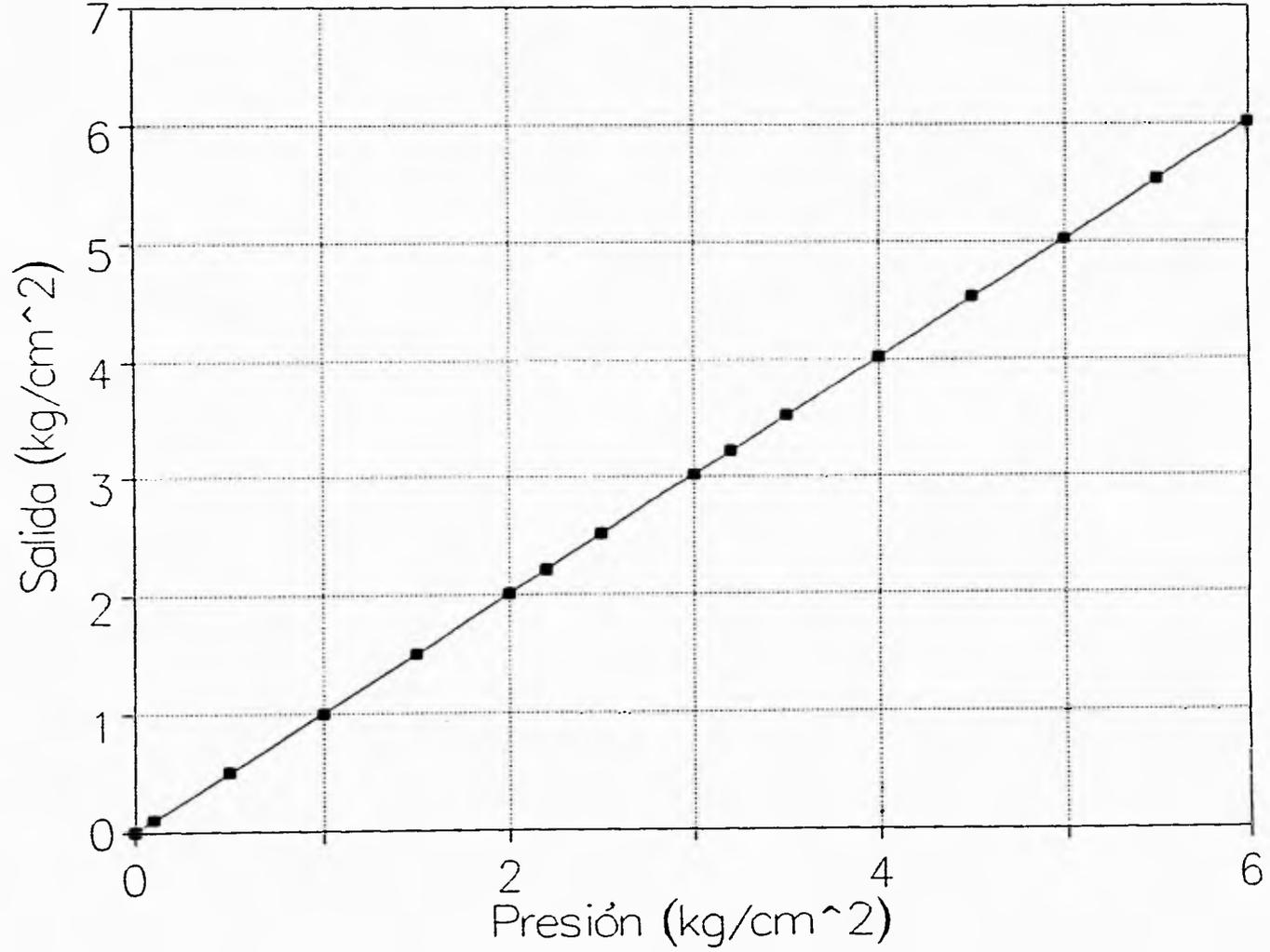
Acondicionador de presión

$r^2=0.999994184$ FitStdErr=0.00474344263 Fstat=2407133.47

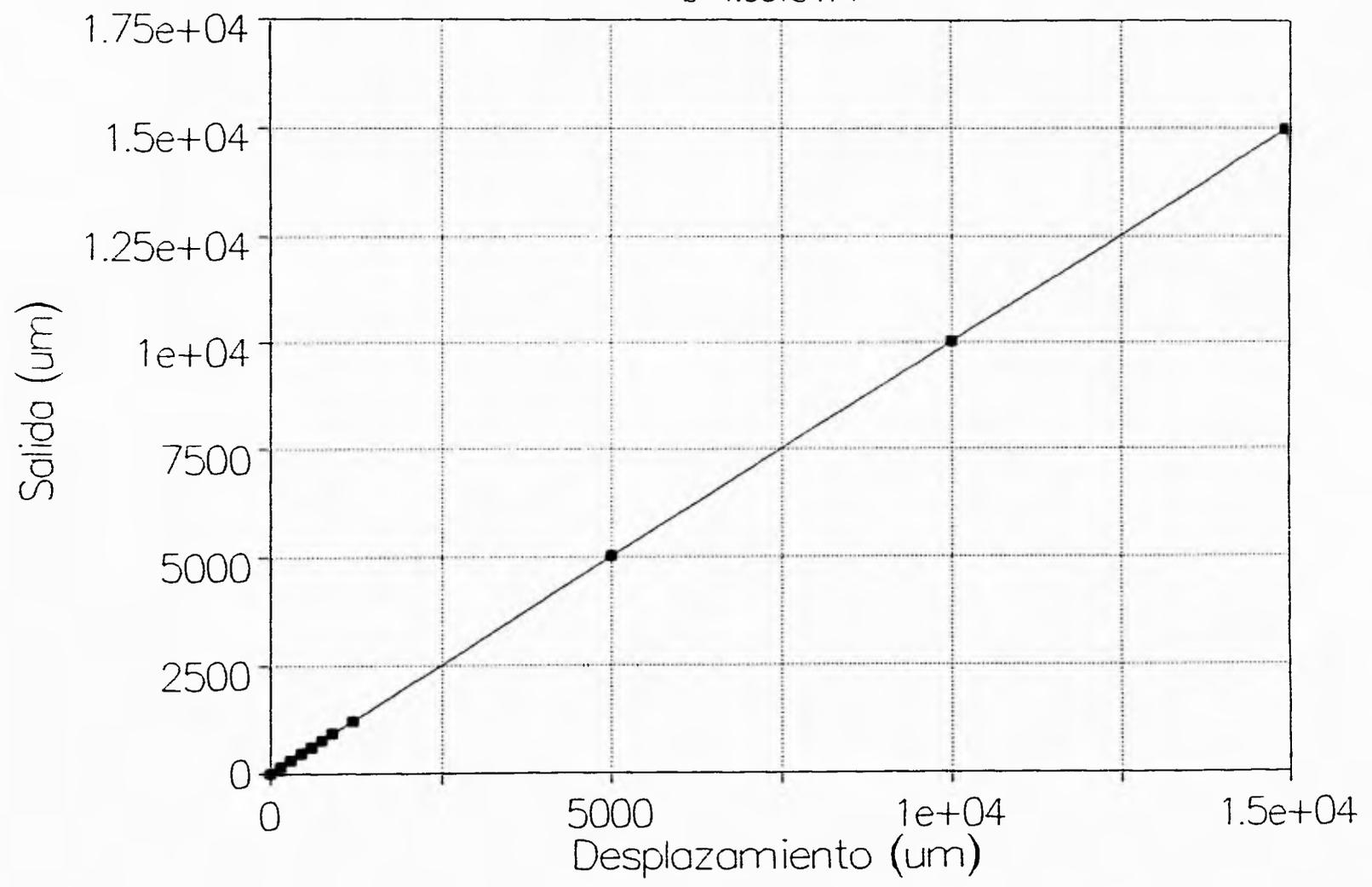
Rank 37 Eqn 1 $y=a+bx$

$a=0.0023138216$

$b=1.0031231$



Acondicionador de desplazamiento lineal
 $r^2=0.999999531$ FitStdErr=3.57990724 Fstat=19171518.5
Rank 22 Eqn 1 $y=a+bx$
 $a=2.5259294$
 $b=1.0013474$



BIBLIOGRAFÍA

-Macmillan Publishing Company
"OPERATIONAL AMPLIFIERS WITH LINEAR INTEGRATED CIRCUITS"
-William D. Stanley.

-Yellow Springs Instruments Co., Inc.
"TRANSDUCERS IN MECHANICAL AND ELECTRONIC DESIGN"
-Harry L. Trietley

-John Wiley & Sons
"ELECTRONICS OF MEASURING SYSTEMS"
-Tran Tien Lang.

-Motorola, Inc.
"PRESSURE SENSOR DEVICE DATA"
-Motorola, Inc.

-National Semiconductor Corporation
"LINEAR DATA BOOK 1"
-National Semiconductor Corporation.

-Burr-Brown
"INTEGRATED CIRCUITS DATA BOOK"
Volume 33
-Burr-Brown Corp.

-National Instruments
"LabView for Windows, User Manual"
-National Instruments.

-National Instruments
"AT-MIO-16 USER MANUAL"
-Multifunction I/O Board for the PC/AT
-National Instruments.