



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

“Diseño, Construcción, Calibración y Adquisición de Datos por Computadora para un Acelerometro Tipo Viga en Voladizo”

PROYECTO DE GRADO

**Previo a la Obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO**

Presentado por:

Tomás Iván Mieles Peña

Guayaquil - Ecuador

1989

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Guillermo Urquizo Calderón, Director de este Proyecto de Tópico de Graduación, por su constante e invalorable ayuda.

Al Dr. Hans Peter Löhrlein y al Ing. Eduardo Orcés, profesores de las materias complementarias al Tópico de Graduación.

A mis compañeros de Tópico y demás personas que directa e indirectamente han colaborado con la elaboración del presente trabajo.

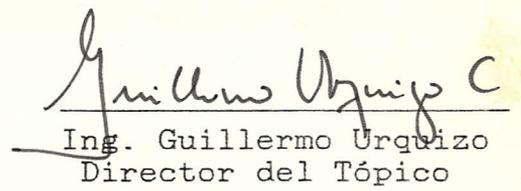
DEDICATORIA

A MIS PADRES

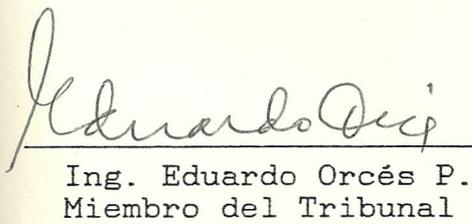
A MIS HERMANOS



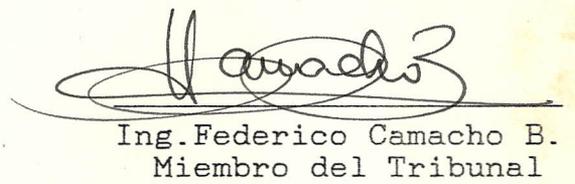
Ing. Nelson Cevallos B.
Decano FIM



Ing. Guillermo Urquiza C.
Director del Tópico



Ing. Eduardo Orcés P.
Miembro del Tribunal



Ing. Federico Camacho B.
Miembro del Tribunal

DECLARACION EXPRESA

" La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en este Proyecto de Grado, me corresponden exclusivamente ; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral " .

(Reglamento de Tópico de Graduación).

T. Mielles

TOMAS I. MIELES PENA

RESUMEN

El presente trabajo constituye el desarrollo del proyecto denominado "Diseño, Construcción, Calibración y Adquisición de Datos por Computadora para un Acelerómetro tipo viga en voladizo".

El proyecto tiene la finalidad de, por medio del uso de los denominados extensómetros resistivos, implementar un dispositivo capaz de registrar lecturas de aceleración de vibración.

Para la consecución de este objetivo se necesita en primer lugar sentar las bases teóricas necesarias para describir el fenómeno físico de la medición de las vibraciones mecánicas, las cuales dan la pauta inicial para los criterios de diseño. Estudios de sistemas vibratorios continuos como es el caso de la viga en voladizo son indispensables para el diseño del prototipo. Además es necesario conocer el principio, modo de operación y usos posibles de los extensómetros resistivos, ya que ellos serán los encargados de cumplir la labor de transductor aceleración - deformación .

Una vez construido e instrumentado el acelerómetro, se requiere proceder a la calibración del mismo para poder

conocer la verdadera respuesta del instrumento .

Finalmente se implementa un sistema de adquisición de datos por computadora, el cual facilita el registro y el procesamiento de la variable a medirse.

INDICE GENERAL

/ RESUMEN

/ INDICE GENERAL

/ INDICE DE FIGURAS

INTRODUCCION

1.- FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1.- Medición de las vibraciones mecánicas

1.1.1.- Parámetros de medición

1.1.2.- Teoría de los instrumentos de
medición

1.2.- Teoría del acelerómetro tipo viga en voladizo

1.3.- Relaciones deformación - aceleración de la
viga en voladizo

1.3.1.- Medición de la deformación mecánica

1.3.2.- Relaciones esfuerzo - deformación -
aceleración

2.- DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL ACELEROMETRO TIPO VIGA EN
VOLADIZO

2.1.- Consideraciones previas para el diseño

2.2.- Cálculos para el diseño

2.2.1.- Determinación de la frecuencia
natural

2.2.2.- Determinación de dimensiones de la
viga

2.2.3.- Determinación de las dimensiones de
la masa concentrada en el extremo

2.2.4.- Determinación de la ubicación de los extensómetros

2.2.5.- Determinación de la sensibilidad del acelerómetro

2.2.6.- Determinación del rango dinámico del acelerómetro

2.3.- Construcción del acelerómetro

3.- CALIBRACION DEL ACELEROMETRO TIPO VIGA EN VOLADIZO

3.1.- Instrumentación utilizada

3.1.1.- Procedimiento general de calibración

3.2.- La Calibración

3.2.1.- Primera tentativa: Calibración en máquina de ensayos dinámicos INSTRON 1230

3.2.2.- Segunda tentativa: Calibración por desbalance rotatorio

4.- ADQUISICION DE DATOS POR COMPUTADORA

4.1.- Fundamentos de la conversión analógica a digital

4.1.1.- Señal analógica vs. señal digital

4.1.2.- Codificación y cuantificación de señales analógicas

4.1.3.- Principio del funcionamiento de un convertidor analógico a digital

4.1.4.- Criterios para el muestreo

4.2.- Adquisición de datos para el acelerómetro tipo viga en voladizo

4.2.1.- Descripción del sistema físico
(hardware)

4.2.2.- Descripción del programa (software)
de adquisición

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

APENDICES

NOMENCLATURA

BIBLIOGRAFIA

INDICE DE FIGURAS

N°	DESCRIPCION
1.1	Parámetros de medición de vibraciones mecánicas en el dominio de la frecuencia.
1.2	Sistema básico de los medidores de vibraciones.
1.3	Error de aceleración vs. relación de frecuencia .
1.4	Esquema del acelerómetro tipo viga en voladizo.
2.1	Disposición de las masas concentradas en el extremo de la viga.
4.1	Elementos de un convertidor A/D.
4.2 y 4.3	Diagrama operacional de un convertidor A/D.
4.4	Diagrama del sistema de adquisición de datos por computadora para el acelerómetro tipo viga en voladizo.

INTRODUCCION

El tópicó de graduación " Análisis Experimental de Esfuerzos" está dirigido al uso de los denominados extensómetros resistivos o mejor conocidos por su nombre en inglés " strain gages". Dentro de su basta aplicación se puede diferenciar claramente 2 tipos : la determinación experimental de los esfuerzos de elementos estructurales y el diseño de transductores mecánico - eléctricos. El presente proyecto se enmarca dentro de esta última categoría.

La medición de la severidad de las vibraciones mecánicas constituye en la actualidad un medio rápido y eficaz para detectar posibles fallas en componentes mecánicos. De esta manera es factible predecir el tiempo de vida restante de un elemento de una maquinaria.

Es el propósito de este proyecto diseñar y construir un instrumento capaz de captar la aceleración vibratoria de algún sistema en particular usando extensómetros resistivos .

Cabe anotar que hace 10 años el Sr.Ing. Giulio Ricci desarrolló un proyecto similar donde trató profundamente el análisis matemático del problema, así

como también se construyó un prototipo. El presente proyecto no pretende repetir el trabajo anterior sino más bien , usando las ideas planteadas anteriormente, implementar nuevas variantes al acelerómetro tipo viga en voladizo.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEORICOS

El siguiente capítulo tiene la finalidad de presentar los conceptos teóricos necesarios sobre los cuales se sustenta el diseño del prototipo.

Estos conocimientos incluyen estudios sobre la teoría de medición de vibraciones, vibración de sistemas continuos (viga en voladizo) ,medición experimental de deformaciones, y por último las relaciones deformación - esfuerzo - aceleración vibratoria.

1.1 MEDICION DE LAS VIBRACIONES MECANICAS

1.1.1 Parámetros de medición

El estudio de las vibraciones, como muchas otras ramas de las ciencias aplicadas, necesita de parámetros para poder ser descrita.

Esencialmente existen 3 cantidades de interés:

- Desplazamiento x
- Velocidad $v = dx/dt$
- Aceleración $a = dv/dt = d^2x/dt^2$

Ahora bien, ¿ cuál de ellos resulta el parámetro más idóneo para medir ? En teoría resulta irrelevante cual de ellos se escoja. Visualizando los 3 parámetros en el dominio de la frecuencia (fig 1.1), se puede observar que el desplazamiento ofrece componentes bajos a altas frecuencias, mientras que la aceleración posee componentes de amplitud considerable. Esto conlleva a una consideración práctica que puede influenciar la elección del parámetro más recomendable dependiendo de la naturaleza de la vibración (ref. 3).

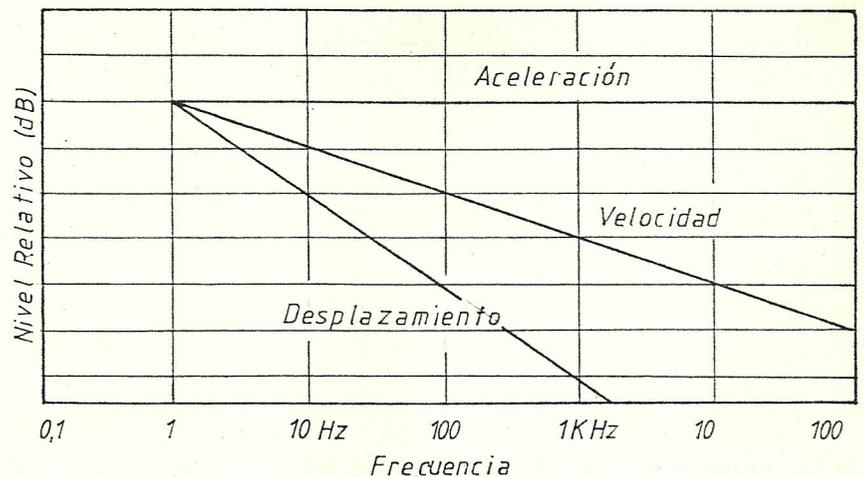


fig 1.1 (ref 3, pag.97)

Por ejemplo, vibraciones a bajas frecuencias tipo desbalanceamiento, las cuales suelen ocurrir a la frecuencia de rotación del eje, son descritas mejor en términos de desplazamiento. Pero cuando se desea detectar en forma prematura el inicio de fallas, tales como rodamientos o engranajes en mal estado, las cuales se manifiestan como vibraciones a altas frecuencias, el parámetro más indicado es la aceleración.

Un factor adicional realza el beneficio de la medición de la aceleración, la señal puede ser fácilmente integrada por medios electrónicos a fin de obtener velocidad y desplazamiento. La ventaja de integrar radica en el hecho de que el error en estado estable tiende a reducirse, mientras que el proceso inverso, la diferenciación, es más complejo (ref. 3).

1.1.2 Teoría de los instrumentos de medición (ref.2)

El sistema básico de muchos instrumentos medidores de vibraciones consiste de una masa

conectada a una carcaza mediante un sistema resorte - amortiguador (fig 1.2).

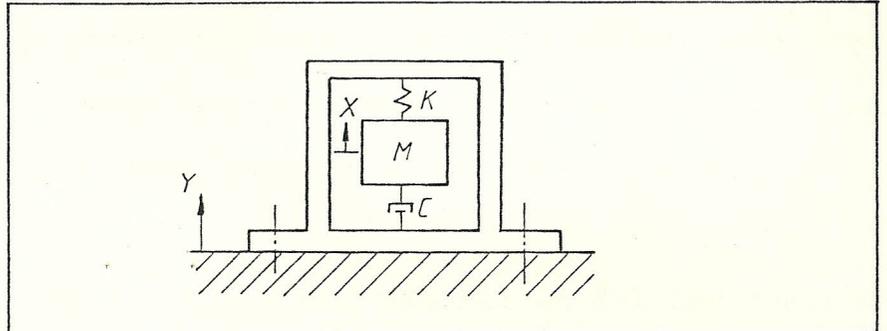


fig. 1.2 (ref. 2, pag. 78)

donde, M=masa

K=constante del resorte

C=constante de amortiguamiento

Y=movimiento de la base

X=movimiento de la masa

Z=movimiento relativo de la masa con respecto a la base

$$Z=Y-X$$

La ecuación que define el comportamiento se la obtiene aplicando la segunda ley de Newton a un sistema de vibración forzada. La solución es :

$$\frac{Z}{Y} = \frac{(w/w_n)^2}{\sqrt{(1 - (w/w_n)^2)^2 + (2\zeta w/w_n)^2}} \quad (1)$$

donde, w_n = frecuencia natural del sistema

w = frecuencia exitatriz

ζ = relación de amortiguamiento

El tipo de instrumento esta determinado por el rango útil de frecuencia con respecto a la frecuencia natural w_n del instrumento.

- Si la frecuencia natural w_n del instrumento es baja con respecto a la frecuencia de vibración w , el desplazamiento relativo Z se aproxima al desplazamiento de la base Y , sin importar el valor del amortiguamiento. Estos instrumentos se conocen como vibrómetros.

- Si la frecuencia natural del instrumento es alta comparada con la de la vibración de excitación, el desplazamiento relativo se torna proporcional a la aceleración del movimiento de la base. Estos instrumentos son los acelerómetros.

$$Z = \frac{w^2 Y}{w_n^2} = \frac{\text{aceleración}}{\text{frec.natural}^2} \quad (2)$$

El rango útil de un acelerómetro considerando su relación de amortiguamiento se lo puede observar en la siguiente figura (fig 1.3).

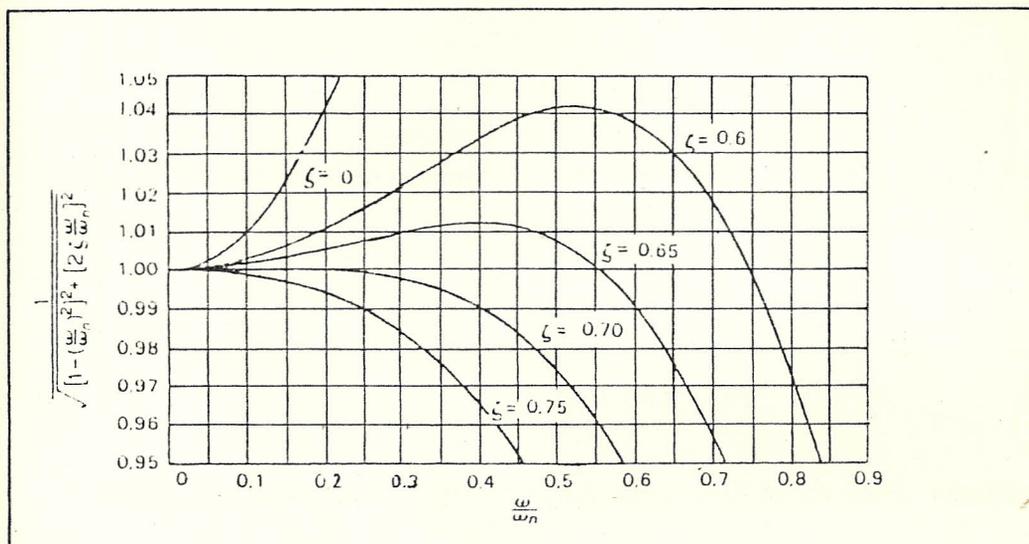


fig. 1.3 (ref.2, pag. 82)

1.2 TEORIA DEL ACELEROMETRO TIPO VIGA EN VOLADIZO

El tipo de acelerómetro consistirá en una viga en voladizo con una masa m y en cuyo extremo tendrá una masa M , tal como lo muestra la figura 1.4. EL estudio considerará amortiguamiento despreciable.

El sistema tiene masa y elasticidad continuamente distribuida. Para especificar la posición de cada partícula se requiere un número infinito de coordenadas y por lo tanto se tiene un número infinito de grados de libertad.

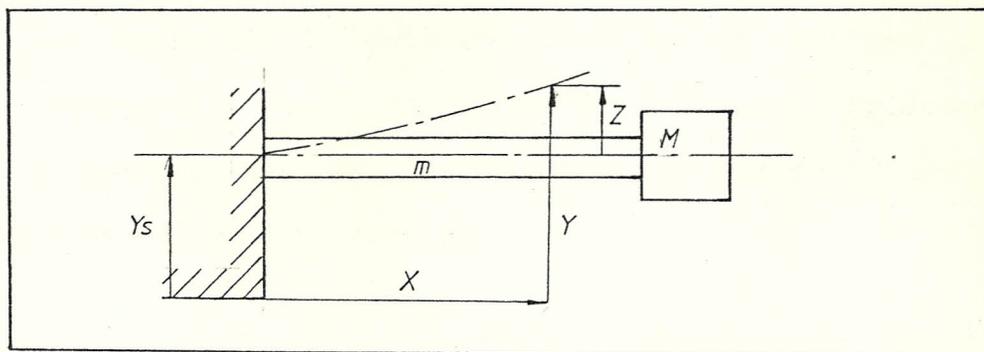


fig. 1.4 (ref. 1)

donde, Y_s = mov. vertical del sistema con respecto a la tierra

Z = mov. vertical relativo de la viga con respecto al empotramiento.

Y = mov. vertical absoluto de la viga
= $Y_s + Z$

X = posición horizontal de un elemento con respecto al empotramiento.

La ecuación diferencial que identifica al sistema es del tipo parcial, no homogénea, de 4° grado (ref.1).

$$EI \frac{\partial^4 Z}{\partial X^4} + \rho A \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} = -\rho A \frac{\partial^2 Y_s}{\partial t^2} \quad (3)$$

donde, E = módulo de elasticidad de la viga

I = inercia de la viga

ρ = densidad del material de la viga

A = área seccional de la viga

La solución de esta ecuación se la obtiene por separación de variables y luego aplicando superposición de los distintos modos naturales (ref.1). La solución es:

$$Z(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} X_n(x) * T_n(t) \quad (4)$$

- $X_n(x)$ = modos naturales de vibración (5)

$$X_n(x) = A[\cosh\beta_n x - \cos\beta_n x - \alpha_n(\sinh\beta_n x - \sin\beta_n x)]$$

A = constante

$$\alpha_n = \frac{\cosh(\beta_n L) + \cos(\beta_n L)}{\sinh(\beta_n L) + \sin(\beta_n L)} \quad (6)$$

β_n se encuentra implícito dentro de la ecuación siguiente :

$$\frac{1}{(\cosh\beta_n L - \cos\beta_n L)} + \frac{M}{\rho A L} \beta_n L (\tanh\beta_n L - \tan\beta_n L) = 1 \quad (7)$$

- $T_n(t)$ = función del tiempo

$$T_n(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t + \frac{\gamma_n \Psi (w/w_n)^2 \sin \omega t}{(1 - (w/w_n)^2)} \quad (8)$$

Ψ = Amplitud de la excitación

$$\omega_n = \beta_n \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (9)$$

$$\gamma_n = \left| \frac{(M/\rho A L) L X_n(L) + \int_0^L X_n dx}{(M/\rho A L) L X_n^2(L) + \int_0^L X_n^2 dx} \right| \quad (10)$$

1.3 RELACIONES DEFORMACION - ACELERACION DEL ACELEROMETRO

1.3.1 Medición de la deformación mecánica

El uso de los llamados extensómetros eléctricos proveen un medio eficaz para la detección y cuantificación de deformaciones en un elemento. Estos dispositivos son resistencias que al experimentar una deformación, responden con un cambio proporcional en su resistencia eléctrica.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{GF \Delta L}{L} = GF \epsilon \quad (11)$$

donde, R = resistencia eléctrica del extensómetro

ΔR = cambio en la resistencia

L = longitud del espécimen esforzado

ΔL = cambio en la longitud

ϵ = deformación unitaria

GF = "gage factor" o factor de celda, especificado por el fabricante.

Los cambios en la resistencia eléctrica son muy pequeños, debido a que las deformaciones unitarias son también de muy poca

magnitud. Para poder apreciar los cambios resistivos se necesita del uso de un puente de Wheatstone (ref.4).

1.3.2 Relaciones deformación-esfuerzo-aceleración

Las deformaciones unitarias se relacionan con los esfuerzos, dentro del campo elástico del material, por medio de la ley de Hooke.

$$\sigma = E \epsilon \quad (12)$$

donde, σ =esfuerzo actuante

ϵ =deformación unitaria

E =módulo de elasticidad del material

Si consideramos que el esfuerzo actuante sobre la viga es debido a flexión, entonces tendremos para el caso de una viga de sección rectangular :

$$\sigma = \frac{M (\frac{1}{2}h)}{I} \quad (13)$$

M = momento flector actuante sobre la viga

I = inercia de la viga

h = espesor de la viga

Si relacionamos el momento flector con los desplazamientos verticales de la viga tendremos :

$$M = EI \frac{\partial^2 Z(x,t)}{\partial x^2} \quad (14)$$

Correlacionando las expresiones esfuerzo-deformación, esfuerzo-momento, momento-desplazamiento, se tiene :

$$\frac{\partial^2 Z(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\epsilon}{\frac{1}{2} h} \quad (15)$$

Para estado estable se tiene :

$$\frac{\partial^2 Z(x,t)}{\partial x^2} = X''(x) \gamma_n \psi (w/w_n)^2 \quad (16)$$

y por lo tanto,

$$\frac{\epsilon(x)}{\frac{1}{2} h} = \frac{X''(x) w^2 \psi \gamma_n}{w_n^2} \quad (17)$$

donde $\psi w^2 =$ amplitud de aceleración

$$\psi w^2 = \frac{\epsilon(x) w_n^2}{\frac{1}{2} h X''(x) \gamma_n} \quad (18)$$

La sensibilidad de un instrumento se define como la relación entre la señal de entrada a la señal de salida. Para el caso en

particular se tiene (ref.1) :

$$\frac{\epsilon(x)}{\psi w^2} = \frac{X''(x) \frac{1}{2}h \delta_n}{wn^2} \quad (19)$$

CAPITULO II

DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL ACELEROMETRO

TIPO VIGA EN VOLADIZO

A continuación se presentará la descripción de la fase del diseño del acelerómetro. Se expondrán las consideraciones hechas , cálculos efectuados y los resultados en cuanto a dimensiones y rangos de trabajo esperados.

2.1 CONSIDERACIONES PREVIAS PARA EL DISEÑO

- Como se mencionó anteriormente el acelerómetro será diseñado libre de amortiguamiento. Esto se asume en teoría , lo cual en la práctica no es del todo cierto, debido al amortiguamiento estructural del material y el amortiguamiento provisto por el aire.

- Para el caso anteriormente mencionado ($\zeta=0$) se tomará una relación de frecuencia natural a frecuencia excitadora de 0.2, con lo cual se induce un error de 4% entre la lectura de desplazamiento

relativo y la de aceleración , tal como se puede observar en la figura 1.3 .

- El acelerómetro será diseñado para trabajar a bajas frecuencias. Su rango de trabajo será de 0 a 40 hertz .

- Se usarán los extensómetros eléctricos en una configuración puente completo, de esta manera se consigue una amplificación de 4 veces de la señal de deformación (ref. 4).

- Los cálculos serán determinados para el primer armónico de vibración.

- Se utilizará como material para la viga, aluminio ($E=71$ GPa, $p.e= 26.6$ KNewton/ mt^3); para la masa concentrada en el extremo se usará acero ($E= 207$ GPa, $p.e= 76.5$ KNewton/ mt^3).

2.2 CALCULOS PARA EL DISEÑO

2.2.1 Determinación de la frecuencia natural

La frecuencia natural se la fija a partir de la relación:

$$f_{\max}/f_n = 0.2 \quad f_n = f_{\max}/0.2$$

si $f_{\max} = 40$ hz,

$$f_n = 200 \text{ hz}$$

$$\omega_n = 1256.64 \text{ rad/seg}$$

2.2.2 Determinación de las dimensiones de la viga

Para este efecto se utilizará la ecuación de la frecuencia natural ,

$$\omega_n = \beta^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

para una sección rectangular :

$$\omega_n = \beta^2 \sqrt{\frac{E h^3}{12 \rho}} \quad (20)$$

$$h = \frac{\omega_n}{\beta^2} \sqrt{\frac{12 \rho}{E}} \quad (21)$$

Como se observa h depende de :

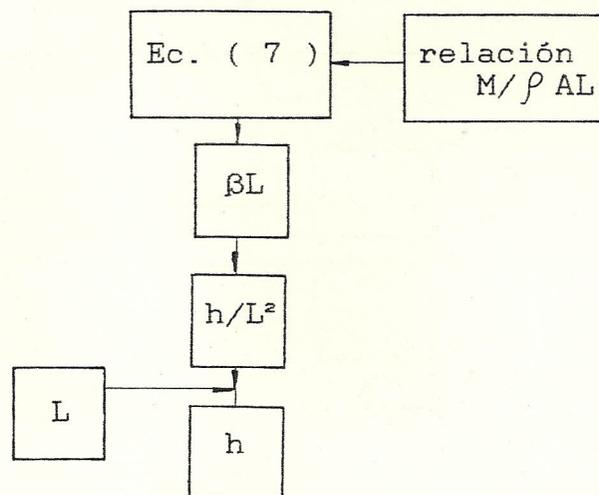
- propiedades del material
- frecuencia natural
- constante β

A su vez β es función de la relación de masas del extremo (masa concentrada) a la

masa de la viga, como se lo puede apreciar en la ecuación (7). Para simplificar los cálculos se tratará a βL y a $M/\rho AL$ como 2 variables independientes, y la solución final para el espesor de la viga quedará en función de la longitud de la misma:

$$\frac{h}{L^2} = \frac{wn}{(\beta L)^2} \sqrt{\frac{12\rho}{E}} \quad (22)$$

Para ilustrar el cálculo en forma esquematizada, éste se efectúa así :



La solución final , después de considerar diferentes alternativas y variar los distintos parámetros, fue :

$$M/\rho AL = 4$$

$$\beta L = 23.29 \text{ mm}$$

$$L = 76.2 \text{ mm}$$

$$h = 5.95 \text{ mm}$$

2.2.3 Determinación de las dimensiones de la masa concentrada en el extremo

La relación de masas seleccionada es 4. La disposición de las masas será de tipo emparedado, tal como se muestra en la figura 2.1.

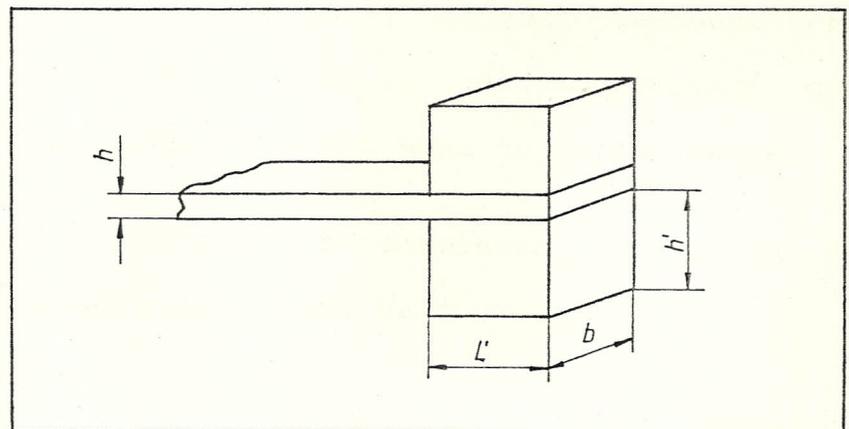


fig. 2.1 (ref.1)

De esta manera la masa total localizada en el extremo es:

$$M = \rho_{al} bhL' + 2\rho_{fe} bh'L' \quad (23)$$

si $M/\rho AL = 4$

$$4 = \frac{\rho_{al} bhL' + 2\rho_{fe} bh'L'}{\rho_{al} bhL} \quad .(24)$$

Como se observa ,el espesor h' depende de la longitud L' . Probando para diferentes relaciones se obtuvo:

$$L' = 17.46 \text{ mm}$$

$$h' = 17.46 \text{ mm}$$

El ancho de la viga se lo fija de acuerdo al ancho de cada extensómetro , los cuales miden 5mm cada uno; como se dispondrán 2 por lado (10 mm), el ancho adecuado será de 17.46 mm ,con lo cual se consigue que las masas de acero sean de forma cúbica.

Para este dimensionamiento la relación de masas recalculada es :

$$M/\rho AL = 4.04$$

y la frecuencia natural es de :

$$f_n = 202.73 \text{ hz}$$

$$\omega_n = 1273.77 \text{ rad/seg}$$

2.2.4 Determinación de la ubicación de los extensómetros

Para la localización de los extensómetros se tomaron los siguientes criterios :

- Lugar donde se producen las máximas deformaciones. Esto se produce en el borde del empotramiento.

- Principio de Saint Venant, el cual es de tipo práctico y dice que los efectos debido a discontinuidades de forma en un elemento, se tornan constantes a una distancia de n veces de una longitud característica del elemento ($d = n \cdot x$) (ref.10).

- La longitud de los extensómetros, que es de 11 mm .

A partir de estas ideas , considerando 2 veces el espesor de la viga y el largo del extensómetro, se halló que el sitio óptimo para su ubicación es a 13 mm del empotramiento.

2.2.5 Determinación de la sensibilidad del acelerómetro

La relación de la sensibilidad está dado por la expresión

$$\frac{\epsilon(x)}{\psi w^2} = \frac{X''n(x) \frac{1}{2} h \gamma_n}{w n^2} \quad (19)$$

por lo tanto se necesitará calcular los siguientes parámetros:

$$X''n(x) = \beta^2 A [\cosh \beta x + \cos \beta x - \alpha (\sinh \beta x + \sin \beta x)] \quad (25)$$

$$\gamma_n = \left| \frac{(M / \rho A L) X_n(L) \cdot L + \int_0^L X_n dx}{(M / \rho A L) X_n^2(L) \cdot L + \int_0^L X_n^2 dx} \right| \quad (9)$$

Los resultados que se muestran a continuación se evaluaron para:

$$\begin{array}{l|l} x = 12.7 \text{ mm} & \beta x = 3.87 \text{ mm} \\ \beta L = 23.24 \text{ mm} & \alpha = 1.118 \\ \beta = 0.305 & \end{array}$$

y estos son :

- $X''n(12.7) = 0.0061 \text{ A} \quad [1/\text{mm}]$
- $X_n(76.2) = 14.08 \text{ A} \quad [\text{mm}]$
- $X_n^2(76.2) = 197.35 \text{ A}^2 \quad [\text{mm}^2]$
- $\int_0^{76.2} X_n(x) dx = 402.39 \text{ A}^2 \quad [\text{mm}^2]$

$$- \int_0^{762} X^2 n(x) dx = 193.69 \text{ E03 A [mm]}$$

$$- n = 0.0186 \text{ 1/A [1/mm]}$$

de esta manera la sensibilidad resulta:

$$\frac{\epsilon(x)}{\psi w^2} = \frac{(0.0061 \text{ A})(0.0186/\text{A}) \frac{1}{2} (5.95)}{(1273.77)^2}$$

$$\frac{\epsilon(x)}{\psi w^2} = 2.08 \text{ E-10 } \frac{\text{mm/mm}}{\text{mm/seg}^2}$$

$$\frac{\epsilon(x)}{\psi w^2} = 2.08 \text{ E-7 } \frac{\text{mm/mm}}{\text{mt/seg}^2}$$

Como se utilizará 4 extensómetros, la sensibilidad se amplifica 4 veces (ref.4).

$$\frac{\epsilon(x)}{\psi w^2} = \frac{8.32 \text{ E-7 } \text{mm/mm}}{\text{mt/seg}^2}$$

Resulta muy común expresar la aceleración en término de "veces" la gravedad. Esto lo conseguimos multiplicando la expresión anterior por 9.8 m/seg².

$$\frac{\epsilon(x)}{\text{"g"}} = 8.15 \text{ E-6 } \frac{\text{mm/mm}}{\text{"g"}}$$

$$\frac{\epsilon(x)}{\text{"g"}} = 8.15 \frac{\mu\epsilon}{\text{"g"}}$$

2.2.6 Determinación del rango dinámico del acelerómetro

El rango dinámico superior del instrumento está determinado por su resistencia estructural (ref. 3).

Conociendo las propiedades del aluminio :

$$S_y = 89.6 \text{ MPa}$$

$$E = 71 \text{ GPa}$$

y utilizando un factor de seguridad de 2 se tiene:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{S_y/2}{E}$$

$$\epsilon = 0.0006 \rightarrow "g"_{\text{max}} = 77.42$$

$$a_{\text{max}} = 758 \text{ m/seg}^2$$

2.3 CONSTRUCCION DEL ACELEROMETRO

La construcción del acelerómetro tipo viga en voladizo fue llevado a cabo en los talleres de la ESPOL. Esencialmente las únicas máquinas herramientas usadas para tal fin fueron la fresadora, en su mayor parte, y el taladro.

Debido a que los elementos son de dimensiones muy

pequeñas se tuvo que trabajar con mucho cuidado. El tiempo de duración de la construcción fue de aproximadamente 6 horas.

Las masas concentradas en el extremo fueron fijadas en su posición mediante un pegamento epóxico, a fin de no alterar las relaciones de masas previstas en el diseño, lo cual conllevaría a una modificación de la frecuencia natural del instrumento.

Los planos de construcción se encuentran en el apéndice C.

CAPITULO III

CALIBRACION DEL ACELEROMETRO TIPO VIGA EN VOLADIZO

La fase de calibración del prototipo consiste en comparar, la señal emitida por el acelerómetro que es de deformación, con la señal de aceleración de un instrumento conocido. Se debe además encontrar una fuente generadora de vibraciones.

A continuación se detalla la instrumentación utilizada, el procedimiento y los resultados obtenidos.

3.1 INSTRUMENTACION UTILIZADA

Los instrumentos que acompañan al acelerómetro para formar un solo equipo son:

- Indicador de deformaciones Micro Measurements modelo P-3500, con un rango de trabajo de +/- 19999 $\mu\epsilon$, y una resolución de 1 $\mu\epsilon$.

- Medidor de picos Micro Measurements modelo

3650, el cual se encarga de registrar la incursión máxima positiva y la incursión máxima negativa. Es usado en conjunto con el medidor de deformaciones para mostrar los valores picos en mediciones de tipo dinámicas. El instrumento está provisto de un filtro paso bajo para la supresión de voltajes transientes, el cual debe de ajustarse por lo menos al doble de la frecuencia de excitación (ref.12).

El instrumento conocido con el que se va a comparar la señal emitida por el prototipo, es un medidor de nivel de vibración de marca Brüel & Kjaer tipo 2513, con un rango dinámico de 0 - 100 mt/seg².

3.2 PROCEDIMIENTO GENERAL DE CALIBRACION

El procedimiento seguido es el siguiente :

- Conección de los terminales del acelerómetro a los terminales correspondientes del medidor de deformaciones.

- Conección de la salida analógica del medidor de deformaciones a la entrada respectiva del medidor de picos .

- Balancear el puente de Wheatstone.

- Sintonizar el filtro paso bajo del medidor de picos en 100 hz (considerando que la $f_{max} = 40$ hz).
- Colocar el acelerómetro conocido lo más próximo posible al prototipo.
- El medidor de nivel tiene una prestación muy útil. Puede registrar la lectura pico de aceleración durante un minuto y al final de este tiempo muestra la lectura máxima. Utilizando una idea similar se procede a registrar el valor de deformación máxima del prototipo, durante el minuto que se encuentra registrando la aceleración máxima el medidor de nivel. Al final se correlacionan ambos datos.

3.3 LA CALIBRACION

En el trabajo del Ing. Ricci, la calibración se llevó a cabo en la máquina de ensayos dinámicos INSTRON 1230 en el laboratorio de Mecánica de Sólidos de la ESPOL. En esta obra se dejó como recomendación la utilización de otro tipo de fuente generadora de vibraciones, ya que la INSTRON no generaba una excitación pura. En aquella vez se necesitaba de una señal senoidal pura, ya que al no

contar con un acelerómetro se tuvo que calcular la aceleración a partir de la velocidad.

El caso actual es diferente, ya que si se cuenta con un acelerómetro patrón, y lo que se necesita es tener cualquier tipo de fuente generadora de vibraciones para correlacionarla con la lectura de deformación del prototipo.

A continuación se detallan los pormenores del proceso de calibración.

3.3.1 Primera tentativa: Calibración en máquina de ensayos dinámicos INSTRON 1230

La calibración en la máquina INSTRON 1230 consistió en registrar las lecturas para ambos instrumentos, el medidor de nivel y el prototipo, manteniendo la carrera del pistón de la máquina INSTRON constante y variando la frecuencia del movimiento.

Sin embargo surgió un problema : las lecturas no eran repetitivas. Esto es, una vez que se registraba un valor de deformación para una determinada frecuencia, y luego se quería

verificar si este valor se repetía para la misma frecuencia, esto ocurría con una considerable variación de la magnitud.

La posible causa es debido al excesivo ruido eléctrico que se genera en el movimiento del cable del acelerómetro al medidor de deformaciones. Este movimiento es causado por el movimiento recíprocante del pistón sobre el cual está montado el acelerómetro (fotos 1 y 2, apéndice A).

Por lo tanto se descartó esta opción y se buscó otro tipo de fuente de excitación.

3.3.2 Segunda Tentativa: Calibración por desbalance rotatorio

Esta forma de calibración consistió en utilizar un motor de revolución variable (0-2500 RPM) e inducirle cierto desbalance. La vibración que se produzca será proporcional a la frecuencia de rotación .

En las fotografías 3 y 4 se puede observar la disposición del acelerómetro sobre el motor .

Para este tipo de calibración si se consiguieron lecturas repetitivas y fueron obtenidas variando la frecuencia de rotación.

Los datos de calibración se encuentran en el apendice B.

La curva de calibración obtenida por medio de un análisis de regresión lineal presenta 2 segmentos (ref. 6) :

- para deformaciones menores a $20 \mu\epsilon$ la curva que mejor se ajusta es:

$$A = 0.98 + 0.73 \epsilon \quad [\text{mt}/\text{seg}^2] \quad (26)$$

con un coeficiente de correlación $R^2=0.93$

- para deformaciones mayores o iguales a $20 \mu\epsilon$ la curva que mejor se ajusta es :

$$A = 9.63 + 0.25 \epsilon \quad [\text{mt}/\text{seg}^2] \quad (27)$$

con un coeficiente de correlación $R^2=0.98$

- La sensibilidad experimental es :

$$\epsilon > 20 \mu\epsilon \quad \epsilon/"g" = 13.42 \mu\epsilon/g$$

$$\epsilon \geq 20 \mu\epsilon \quad \epsilon/"g" = 39.2 \mu\epsilon/g$$

El aumento de la sensibilidad en el segundo

segmento evidencia que el instrumento comienza a experimentar cierta resonancia, lo cual crea un efecto de amplificación de la señal.

CAPITULO IV

ADQUISICION DE DATOS POR COMPUTADORA

El siguiente capítulo tratará acerca de como se incorporó un sistema de adquisición de datos por computadora al acelerómetro tipo viga en voladizo .

Se presenta a continuación las bases generales de la conversión analógica a digital, para luego introducir al problema en particular.

4.1 FUNDAMENTOS DE LA CONVERSION ANALOGICA A DIGITAL

4.1.1 Señal analógica vs. señal digital

Una señal es una representación física de datos e información. Cuando ésta es continua en amplitud a lo largo del dominio del tiempo, se la denomina señal analógica. Pero si esta señal analógica es muestreada cada cierto intervalo discreto de tiempo, presentará un comportamiento no continuo en

el dominio del tiempo, esta es la característica de una señal de tipo digital (ref. 5) (ref. 9).

4.1.2 Codificación y cuantificación de señales analógicas

El procesamiento de señales analógicas mediante el uso de la computadora, hace imperioso el muestreo de señales continuas en el tiempo y convertirlas en valores de código binario discretos en el tiempo, que es el lenguaje de la computadora.

La cantidad física de interés debe ser transferida a voltaje para que pueda ser tratada por componentes eléctricos. Para la representación de valores continuos en el tiempo en datos del código binario, se utilizan los convertidores analógicos - digitales (ref. 5). Ellos consisten de los siguientes elementos que se pueden observar en la figura 4.1.

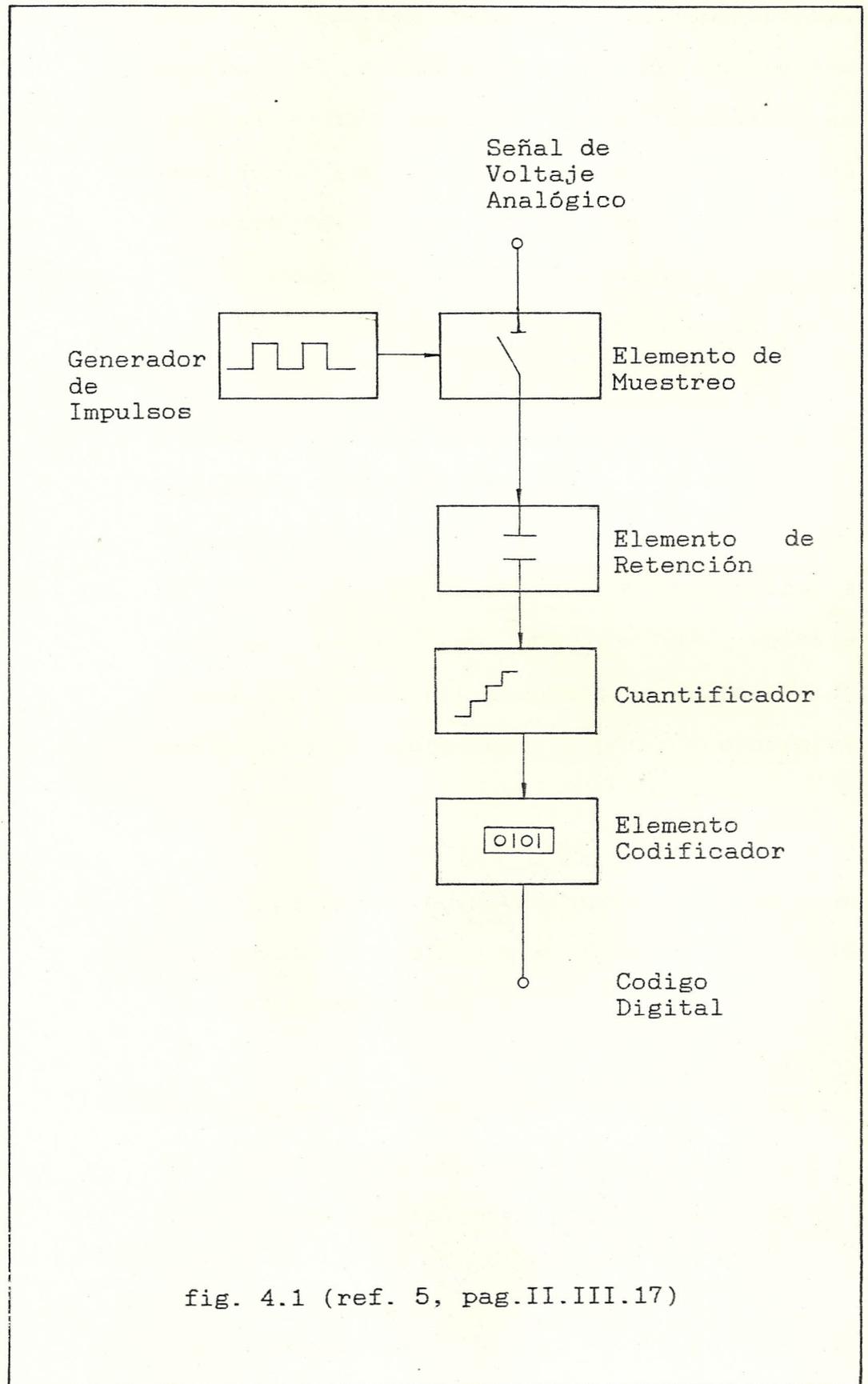


fig. 4.1 (ref. 5, pag.II.III.17)

Para discretizar puntos en el dominio del tiempo, el elemento de muestreo encuentra valores de voltaje proporcionales en amplitud, los almacena temporalmente en el elemento de retención hasta que ellos sean codificados en datos del código binario (ref.5).

4.1.3 Principio de Funcionamiento de un convertidor analógico a digital (ref. 5)

El principio de la conversión analógica a digital radica en comparar el voltaje analógico con un set discreto de voltajes de referencia generados por controles apropiados.

El principio de funcionamiento de un convertidor puede ser descrito de la siguiente manera:

Los elementos principales son un comparador, un generador de impulsos, un contador y un convertidor digital analógico (lo inverso).

- El comparador tiene la capacidad de

comparar 2 diferentes voltajes, la señal analógica y el voltaje de referencia.

- El generador crea impulsos en intervalos iguales de tiempo para accionar un contador.

- Cuando el contador está en cero lo cual implica un voltaje referencial nulo a la salida del convertidor D/A la adquisición se inicia . El contador se incrementa en una cantidad igual al bit menos significativo cada vez que un impulso del generador llega al contador .

- El contador se detiene cuando el voltaje de salida del convertidor D/A ha alcanzado el valor de voltaje de la señal analógica, cuyo valor en dígito binario corresponderá a la numeración en que se halla detenido el contador .

Las siguientes figuras esquematizan lo anteriormente expuesto para el caso de una conversión a 4 bits.

El programa entra dentro del esquema como un

elemento en particular ,ya que es el que direcciona y especifica el intervalo de tiempo de muestreo.

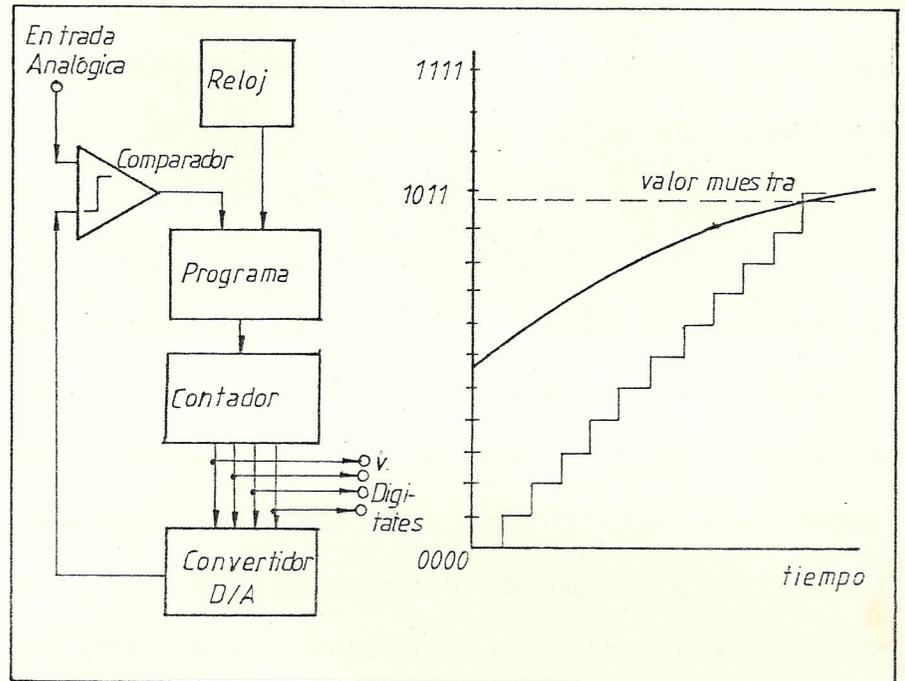


fig. 4.2

fig. 4.3

(ref. 5, pag. II.III.19, pag. II.III.20)

4.1.4 Criterios para el muestreo

El muestrear una señal ,implica tratar de reconstruirla a partir de un set de valores discretos. Es por esto que el tiempo de muestreo o la frecuencia de muestreo juega un papel importante, especialmente cuando se trabaja con señales que varían con una determinada frecuencia.

El teorema de muestreo de Shannon provee un criterio valioso para este fin. Este indica que la frecuencia de muestreo debe ser mayor al doble de la frecuencia máxima de la señal a muestrear. Esto es : $f_m > 2 f_{max}$ o dicho en términos del intervalo de tiempo de muestreo δt , $\delta t < 1/(2 f_{max})$ (ref. 9).

Un problema que surge al no tener en cuenta este criterio es el de producir una especie de submuestreo de la señal, la cual no se reconstruirá con su frecuencia verdadera, sino con una frecuencia "alias", producto del muestreo a una frecuencia menor que el doble de la señal a captar. Este efecto se conoce como " Aliasing" (ref 9).

4.2 ADQUISICION DE DATOS PARA EL ACELEROMETRO TIPO VIGA EN VOLADIZO

La adquisición de datos para el acelerómetro tipo viga en voladizo se la realizó aprovechando el uso de los extensómetros resistivos . Como en los terminales del puente de Wheatstone se puede medir un voltaje, este puede ser convertido a valor

digital y luego mediante una ecuación de calibración se lo transforma a una cantidad en términos de deformación. Finalmente el término de deformación es convertido a valores de aceleración haciendo uso de las ecuaciones encontradas anteriormente (A vs. ϵ) (26 y 27).

4.2.1 Descripción del sistema físico (hardware)

En la adquisición de datos para el acelerómetro tipo viga en voladizo se utilizó una computadora IBM PS/2 modelo 30, a la cual se le proporcionó una tarjeta de conversión analógica a digital de 16 canales y 8 bits. De estos 16 canales se utilizó solamente el canal número 0.

La tarjeta tiene un rango de trabajo de 0 - 5 voltios, con lo cual se consigue una resolución de 0- 255 bits.

La salida analógica del medidor de deformaciones tiene un amplificador incorporado (max 440 $\mu\epsilon$ /milivolt), el cual no es suficiente para que la señal pueda ser leída por la tarjeta A/D debido a que las

deformaciones que se producen en el acelerómetro son pequeñas.

Es por este motivo que se incorporó un amplificador adicional. Un amplificador de termocuplas que se encontró a disposición satisfizo la necesidad. Este dispositivo cuenta con ganancias de 10, 25, 50, y 100 veces. Su rango de trabajo en cuanto a voltaje es de 0-2volt, lo cual significa que se está subutilizando la tarjeta A/D. De esta manera el rango de trabajo en valor digital es teóricamente de 0 - 102 bits.

Un esquema de la configuración del sistema se puede apreciar en la figura 4.4 .

. El nexo final entre todos estos equipos constituye el programa (software) de adquisición.

4.2.2 Descripción del programa (software) de adquisición

El programa de adquisición, sea cual sea el lenguaje de programación que se utilice debe

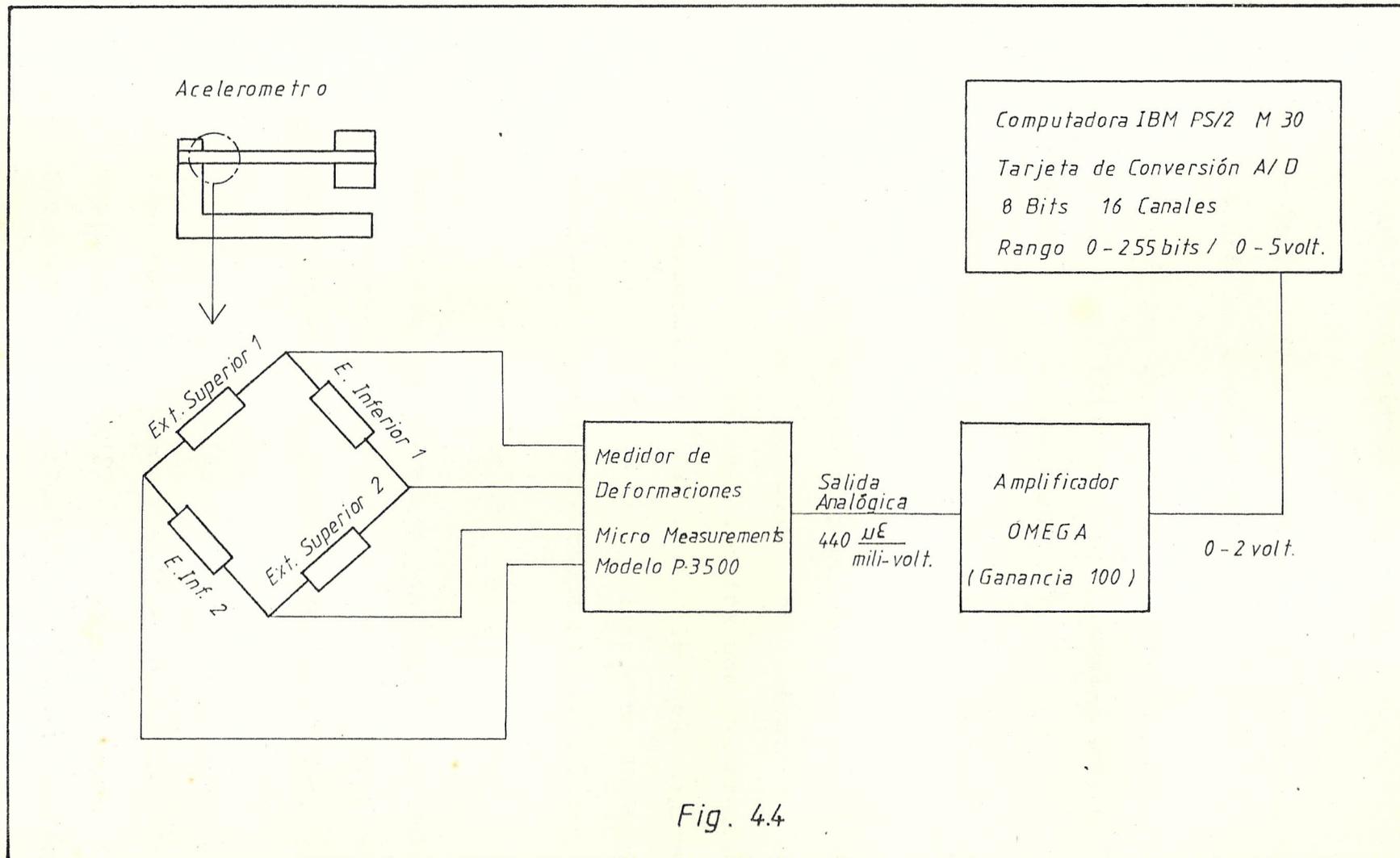


Fig. 4.4

cumplir con ciertos requisitos :

- Debe direccionar desde el programa la tarjeta de conversión A/D.

- Debe ser capaz de seleccionar el número de canales y fijar con cual o cuales se va a realizar la adquisición.

- Debe cumplir con el teorema de muestreo de Shannon.

- Por último debe proporcionar la lectura de la medición en bits en términos de aceleración. Lo cual implica una calibración de deformación [ϵ] vs. lectura digital [bits] (ref. 11). Esta calibración dió como resultado la siguiente recta de calibración :

$$\epsilon = - 44.38 + 1.56 [\text{bits}]$$

Esta curva fue lograda fijando el amplificador en una ganancia de 100. Los datos pueden ser verificados en el apéndice B.

El programa de adquisición de datos para el acelerómetro tipo viga en voladizo fue realizado en BASIC y luego compilado en QuickBasic con la finalidad de ganar rapidez

en la ejecución.

El programa tiene la finalidad de hacer que el prototipo funcione como un medidor de nivel de aceleración de vibraciones. Para este fin el programa realiza la adquisición de 5 paquetes de datos, cada paquete con un total de 2000 datos cada uno. Luego el programa selecciona el mayor valor de cada paquete, y finalmente los promedia. De esta forma se consigue un valor estable y representativo de la señal, ya que el ruido eléctrico que podría generarse en el prototipo, se magnifica también al pasar por el amplificador externo, lo cual crea cierta inestabilidad a la señal adquirida.

El programa cumple con el requisito del teorema de muestreo de Shannon. Una vez compilado la frecuencia de muestreo es de 500 hz, mientras que la frecuencia de trabajo máxima es 40 hz.

El programa denominado "ACELEROM.BAS" se lo realizó para poder ser ejecutado paso a paso.

En primer lugar se presenta un menú que ofrece diferentes tipos de opciones. La opción [INFORMACION] , explica en forma muy breve la idea del proyecto.

[INSTRUMENTACION] detalla los equipos usadas para la adquisición, así como también sus rangos de trabajo y observaciones adicionales. Una segunda pantalla ofrece una explicación acerca de los pasos a seguirse para la conexión de todo el sistema.

Finalmente [EJECUCION] presenta dos formas de trabajo. La primera [MODO NORMAL] en la cual se ejecuta la adquisición de datos, se los procesa y se muestra el valor pico de aceleración una sola vez. En la opción [MONITOREO] se ejecuta lo mismo que en modo normal, pero con la variante de que el sistema permanece adquiriendo siempre. Además se debe fijar al inicio un intervalo de tiempo, al final del cual se envía el resultado actual via impresora. De esta manera se puede llevar un seguimiento de como se encuentra operando una máquina. En el apéndice D se encuentran ciertos cuadros

donde se muestra las pantallas que presenta el programa.

El listado del programa puede verificarse en el apéndice D.

En la tabla D.1 se presenta una breve descripción de las líneas más significativas de la ejecución del programa.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Es indudable que el objetivo del diseño del prototipo, que es el de sensar aceleración, si se cumplió. Esto se corroboró finalmente graficando la señal en la computadora. Se lo puede observar en la foto 5 del apéndice A.
2. La sensibilidad real del acelerómetro es aproximadamente 40% mayor al valor teórico previsto para $\epsilon < 20 \mu\epsilon$. Para $\epsilon > 20 \mu\epsilon$ la sensibilidad es 380% mayor. Esto lleva a pensar en la posibilidad de que la base esté induciendo cierto efecto resonante sobre todo el instrumento. Para trabajos posteriores se recomienda mejorar el diseño de la base.
3. La resolución mínima posible para el sistema de adquisición de datos por computadora es de 1 bit cada $2 \mu\epsilon$. Esta se la obtuvo usando el amplificador OMEGA con una ganancia de 100. Cabe anotar que al usar ganancias inferiores, la resolución disminuye.
4. Como se mencionó anteriormente el rango teórico estimado en valor digital es de 0 - 102 [bits].

Sin embargo en la práctica se alcanzó un rango de 0-134 [bits]. Para aprovechar al máximo todo el rango positivo, se debe colocar el balance del medidor de deformaciones en - 45, partiendo del hecho de que la curva de calibración ϵ vs. bits presenta un intercepto de - 44.38.

5. Finalmente haciendo un análisis de las ventajas del acelerómetro tipo viga en voladizo frente a los acelerómetros ya existentes, los cuales en su mayor parte son del tipo piezoeléctricos, se puede mencionar la facilidad de construcción del mismo, y su bajo costo. Sin embargo frente a las características de los piezoeléctricos, tales como su limitado tamaño y poco peso, además de su gran rango dinámico, las aplicaciones del acelerómetro tipo viga en voladizo son limitadas.
6. El acelerómetro tal como se encuentra en la actualidad instrumentado, funciona adecuadamente como medidor de nivel de aceleración, pero con unas adecuadas modificaciones podría ser mucho más versátil.
7. Entre estas modificaciones se puede mencionar la implementación de un circuito electrónico capaz de poder filtrar las señales de ruido eléctrico que

tiende el propio sistema a producir, pudiendo llegar a obscurecer la señal verdadera en casos extremos. Este filtro debe colocarse antes del amplificador externo, ya que de lo contrario el ruido se amplifica en conjunto con la señal para luego mezclarse y aparentar como si fueran de un mismo tipo.

Se recomienda adicionalmente encaseter el instrumento y luego conectar la caseta a tierra. De esta manera se consigue una configuración tipo jaula de Faraday, cuyo fin es hacer que las corrientes parásitas fluyan hacia tierra.

8. La calibración que se realizó para este proyecto tuvo la inconveniencia de que el acelerómetro patrón no contaba con una buena resolución. Es por esto que se recomienda, una vez hecha las adecuaciones antes mencionadas, calibrarlo con un instrumento que otorgue una más alta resolución, tipo analizador de vibraciones.

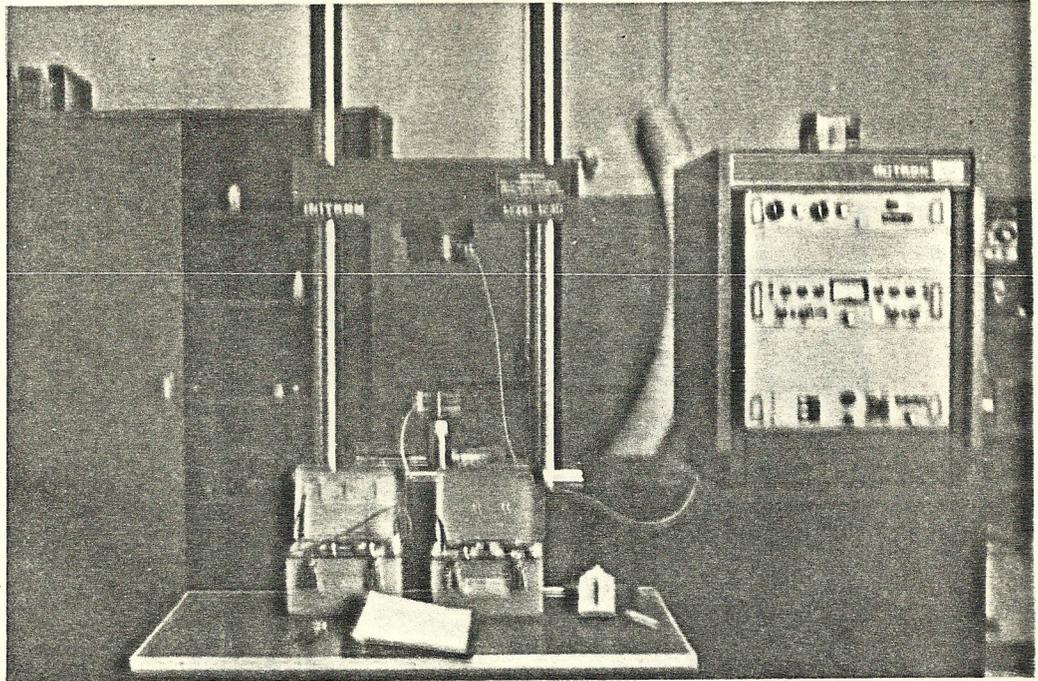
9. A través de un programa que procese la señal y ejecute la Transformada Discreta de Fourier, el sistema puede convertirse en una especie de analizador de vibraciones. Esto se trató de realizar, sin embargo no se obtuvo resultados

satisfactorios debido a que la señal de ruido causa cierta alteración. Sin embargo el listado del programa se encuentra en el apéndice D para cualquier trabajo de investigación posterior.

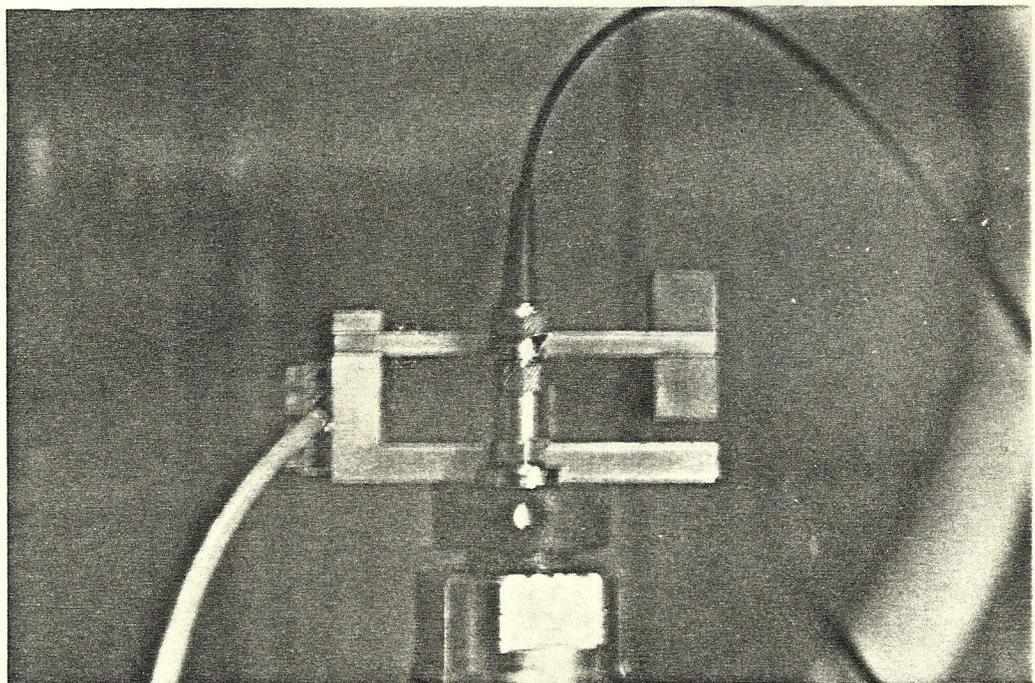
APENDICES

APENDICE A

FOTOGRAFIAS



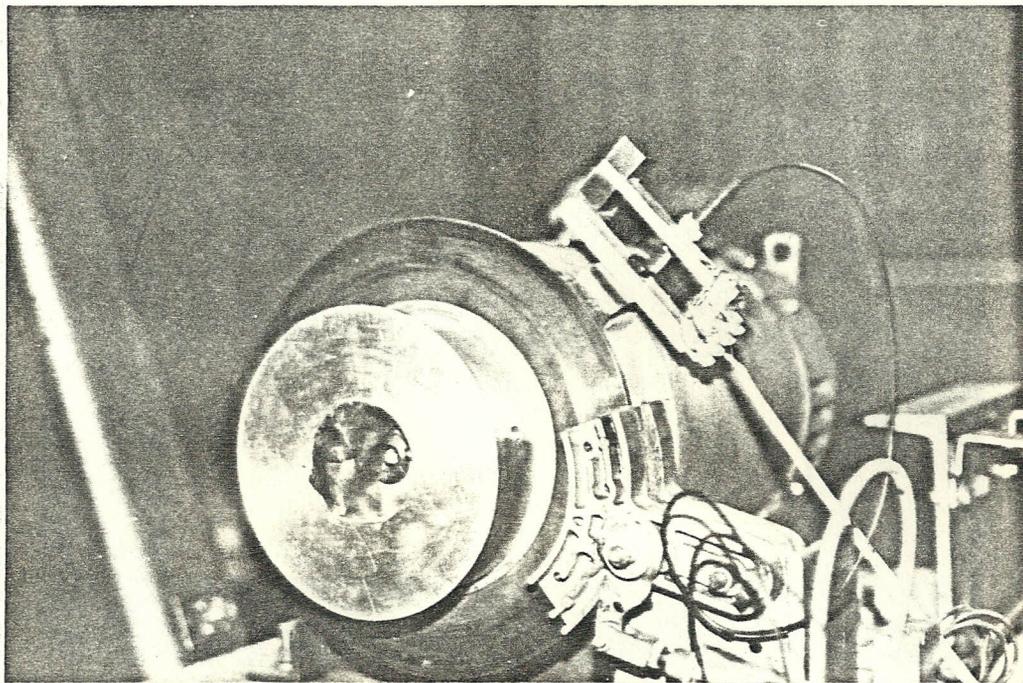
Fotografía 1. Calibración en Máquina de Ensayos Dinámicos INSTRON 1230



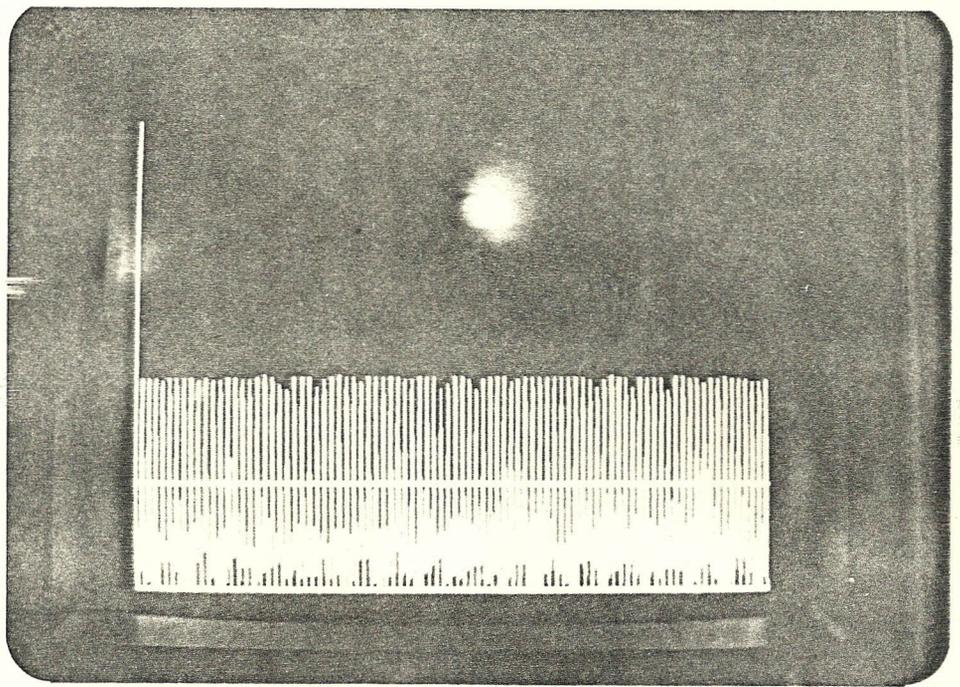
Fotografía 2. Acelerómetro tipo Viga en Voladizo y acelerómetro patrón sobre el pistón



Fotografía 3. Calibración por Desbalance Rotatorio en un motor de revolución variable



Fotografía 4. Disposición Radial del Acelerómetro tipo viga en voladizo y del acelerómetro patrón.



Fotografía 5. Señal de Aceleración en función del tiempo, graficado en la computadora.

APENDICE B

TABLAS DE RESULTADOS Y GRAFICAS DE CALIBRACION

TABLA B.1

CALIBRACION POR DESBALANCE ROTATORIO	
ACELERACION [mt/seg ²] A	DEFORMACION [με] ε
0	0
6	8
8.5	9
10	11
14	20
18	29
24	62
30	84
32.5	88
35	95
$A = 0.98 + 0.73 \epsilon \quad \epsilon < 20 \text{ mt/seg}^2 \quad R^2 = 0.93$	
$A = 9.63 + 0.25 \epsilon \quad \epsilon > 20 \text{ mt/seg}^2 \quad R^2 = 0.98$	

Curva de Calibración

ACELERACION VS. DEFORMACION

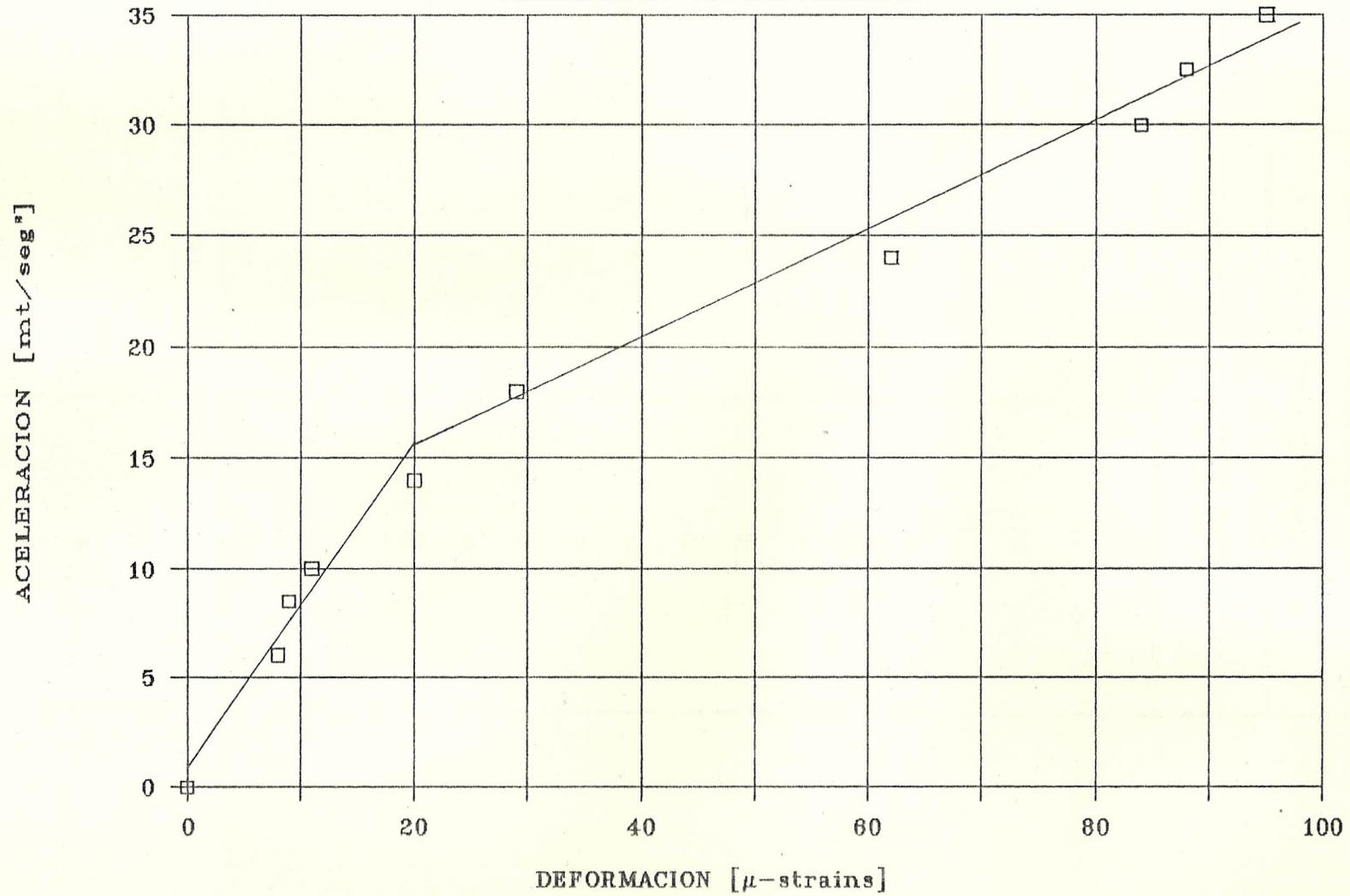


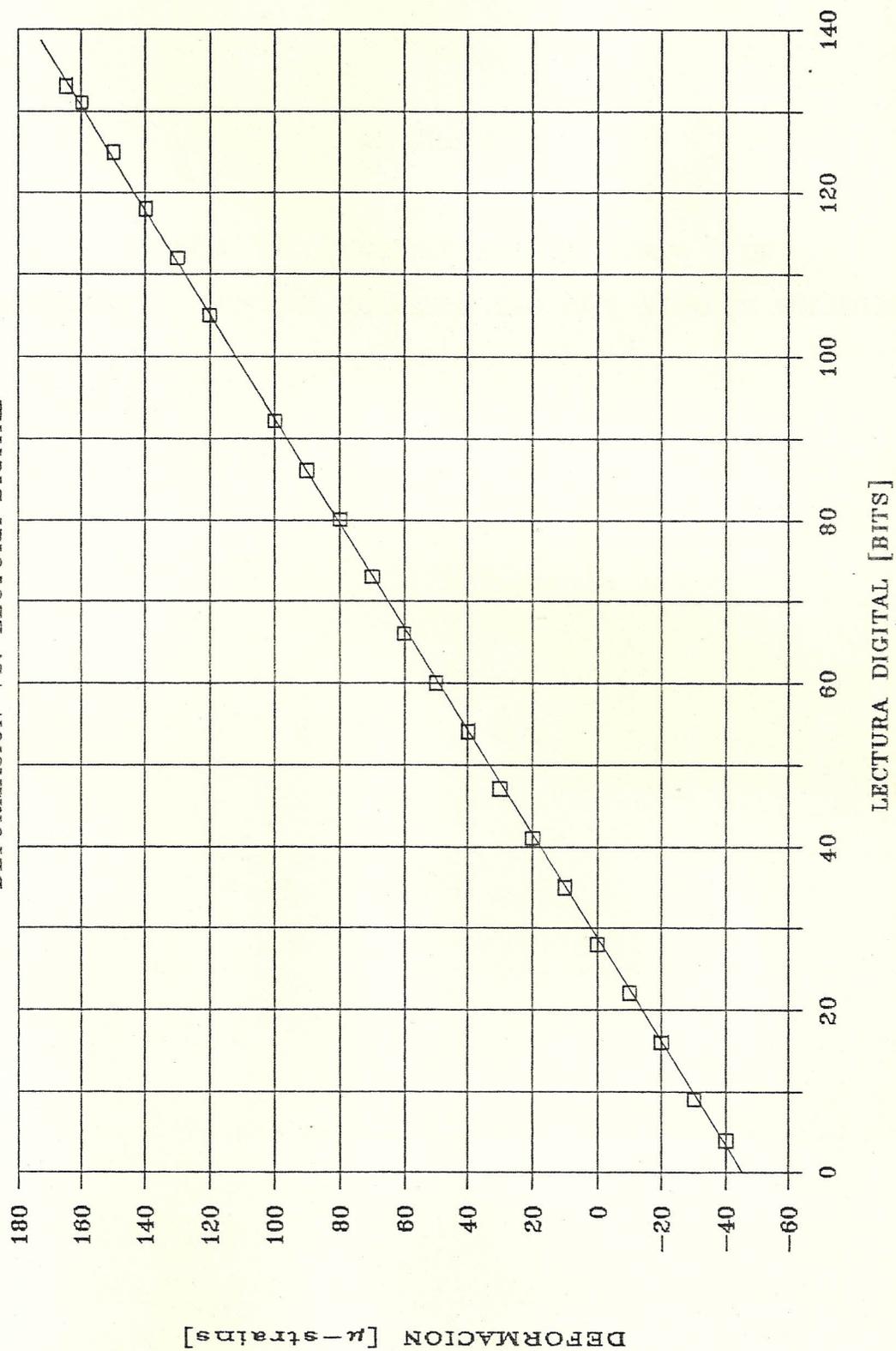
TABLA B.2

CALIBRACION DEFORMACION VS. LECTURA DIGITAL	
DEFORMACION [$\mu\epsilon$]	LECTURA DIGITAL [BITS]
165	133
160	131
150	125
140	118
130	112
120	105
100	92
90	86
80	80
70	73
60	66
50	60
40	54
30	47
20	41
10	35
0	28
-10	22
-20	16
-30	9
-40	4

$$\epsilon = - 44.38 + 1.56 [\text{BITS}]$$

Curva de Calibración

DEFORMACION VS. LECTURA DIGITAL

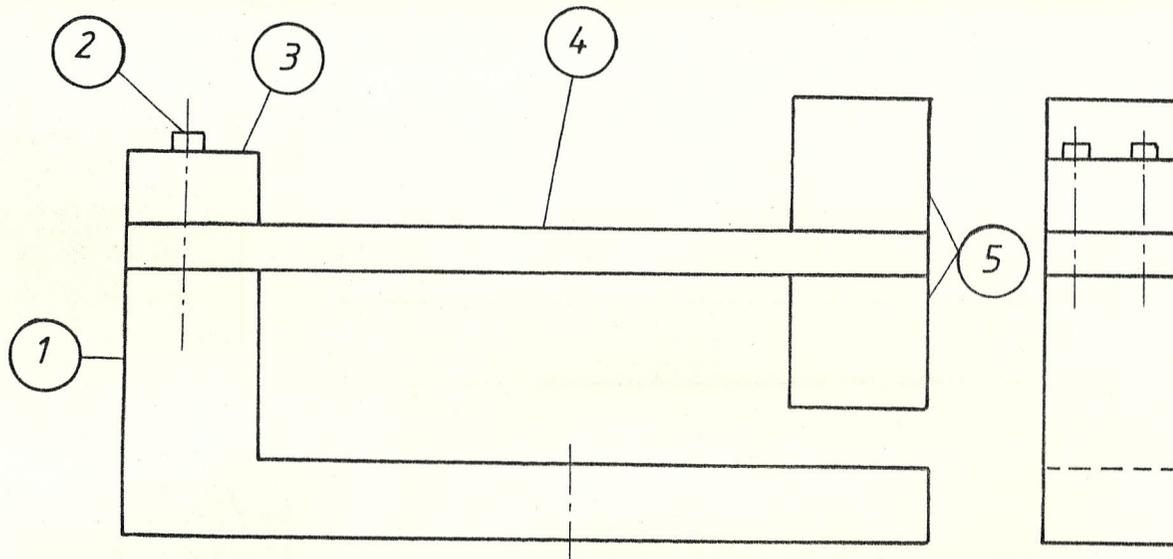


APENDICE C

PLANOS DE CONSTRUCCION Y CARTA DE
ESPECIFICACIONES DEL ACELEROMETRO TIPO VIGA EN VOLADIZO

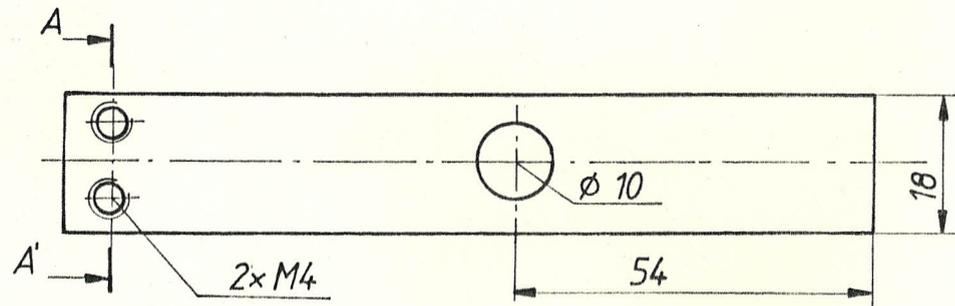
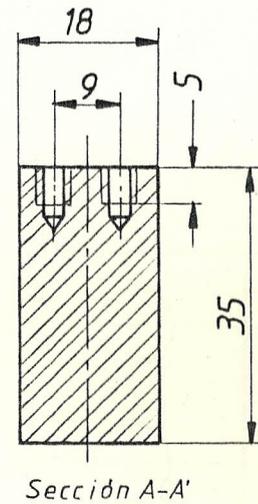
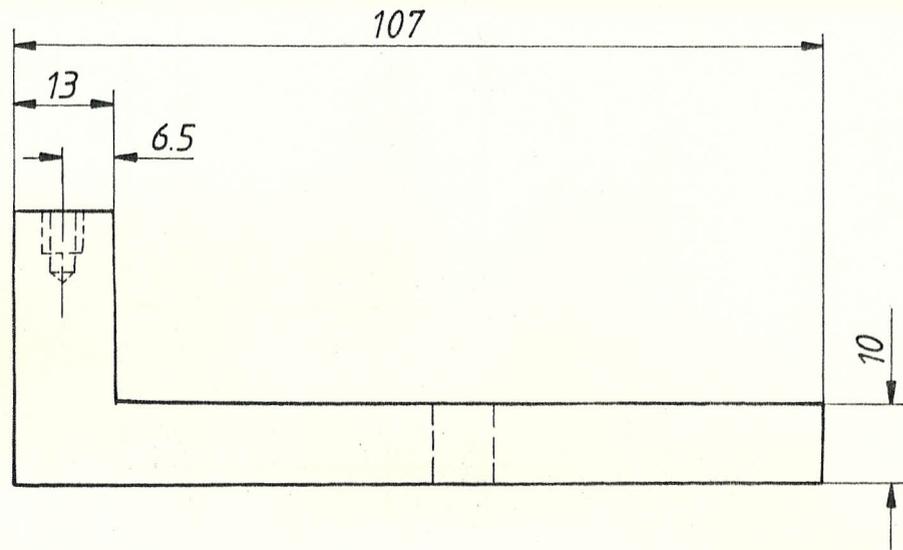
CARTA DE ESPECIFICACIONES DEL ACELEROMETRO TIPO VIGA EN
VOLADIZO

Sensibilidad	$\epsilon < 20 \mu\epsilon$ $\epsilon \geq 20 \mu\epsilon$	13.42 $\mu\epsilon/g$ 39.2 $\mu\epsilon/g$	
Rango Dinámico	0 - 77.42 g (758 mt/seg ²)		
Frecuencia Natural	202.73 hertz		
Peso	193 gramos		
Tamaño	150 x 20 x 55 mm		
Extensómetros utilizados: Micro Measurements			
Serie	EA - 06 - 060RZ - 120		
Resistencia	120 +/- 0.4% Ω		
Factor de celda	2.05 +/- 1%		

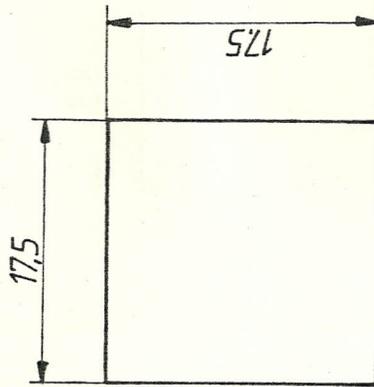
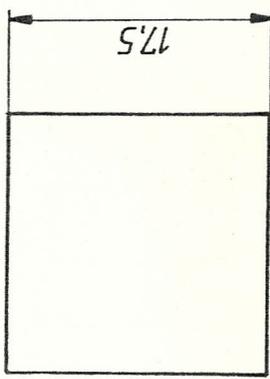


No.	Designacion	Cant.	Material
5	Masas	2	Acero A 36
4	Viga	1	Aluminio
3	Ajustador	1	Aluminio
2	Tornillo M4	2	Acero
1	Base	1	Aluminio
	Fecha	Nombre	Facultad de Ing. Mecanica
Dibujo	24.10.08	T.Mieles	
Reviso		G.Urquiza	
Compr.			
E:			Acelerometro tipo Viga en voladizo
	1:1		

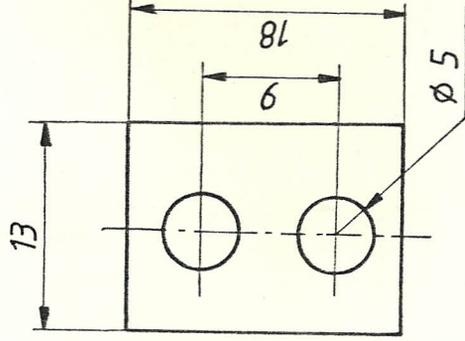
ESPOL



	Fecha	Nombre	Facultad de Ingenieria Mecánica	ESPOL
Dibujo	24.10.89	T.Mieles		
Reviso		G.Urquiza		
Compr.				
E:	(1) Base			
1:1				
				Material: Aluminio



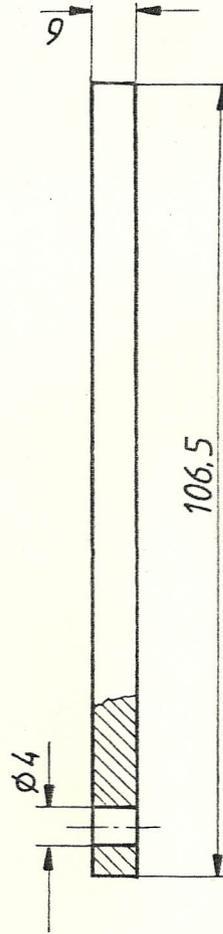
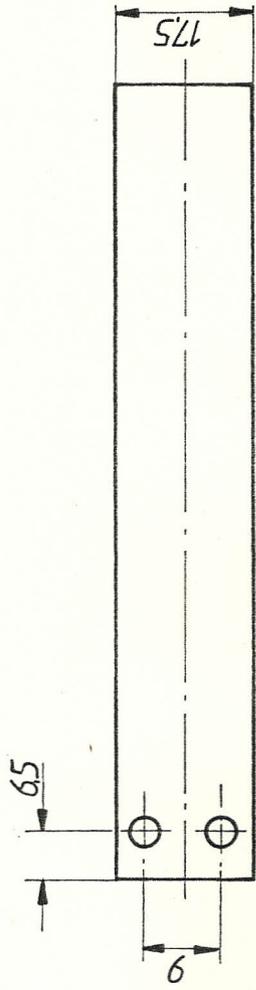
(5)



Espesor 6 mm

(3)

Dibujo	Fecha	Nombre		Facultad de Ing. Mecanica	ESPOL
	24/08/84	T. Mielles			
Reviso				(3) Ajustador (5) Masas	
Compr.					
E	1 : 1				
					Material (3) Aluminio (5) Acero A 36



Dibujo		Fecha	Nombre	Facultad de Ing. Mecanica	ESPOL
Reviso	Compr.		T. Mielles G. Urquiza		
E:		Viga (4)			
1:1					
Material: Aluminio					

APENDICE D

LISTADO DE PROGRAMAS DE ADQUISICION

Tabla D.1

LINEAS	SIGNIFICADO
1000-1020	Direcciona el adaptador de la interfase del puerto (PIA)8255
1030	Posiciona el puerto A como entrada y el resto como salida.
1120	Selecciona uno de los 16 canales a través del cual se hace la adquisición (canal 0).
1130	Se procede a leer los valores digitales a través del puerto A y se los almacena en un arreglo bidimensional $D(j,i)$.
1230-1300	Se procede a la búsqueda del mayor valor en cada paquete (5) y finalmente los promedia.
1310-1350	Utilizando las ecuaciones de calibración se tranforma los valores adquiridos a valores de deformación ,para luego pasar a transformarlos en cantidades de aceleración .

Listado del programa " ACELEROM.BAS "

```
10 REM:***** T O P I C O *****
20 REM----- FORMATO DE CARATULA -----
30 CLS:KEY OFF
40 SCREEN 0,1
50 COLOR 1,11,15
60 CLS
70 LOCATE 5,29:PRINT"TOPICO DE GRADUACION"
80 LOCATE 7,22:PRINT"ANALISIS EXPERIMENTAL DE ESFUERZOS"
90 LOCATE 11,19:PRINT"PROGRAMA DE ADQUISICION DE DATOS PARA"
100 LOCATE 12,15:PRINT"TRANSDUCTOR ACELEROMETRO TIPO VIGA EN VOLADIZO "
110 LOCATE 18,31:PRINT"TOMAS I. MIELES"
120 LOCATE 20,31:PRINT"SEPTIEMBRE 1989"
130 LOCATE 23,23:PRINT"PRESIONE UNA TECLA PARA CONTINUAR":W$=INKEY$:IF W$="" GOT
D 130
140 FOR K=1 TO 2
150 FOR J=3000 TO 400 STEP -300
160 SOUND J,1
170 NEXT J,K
180 CLS :REM-----MENU-----
190 LOCATE 6,35:PRINT"<< MENU >>"
200 LOCATE 10,31:PRINT "1. INFORMACION"
210 LOCATE 13,31:PRINT "2. INSTRUMENTACION"
220 LOCATE 16,31:PRINT "3. EJECUCION"
230 LOCATE 19,31:PRINT "4. SALIR"
240 A$=INKEY$:IF A$="" GOTO 240
250 IF A$="1" GOTO 290
260 IF A$="2" GOTO 700
270 IF A$="3" GOTO 570
280 IF A$="4" GOTO 1920 ELSE GOTO 240
290 REM----- INFO -----
300 CLS
310 LOCATE 6,31:PRINT"## INFORMACION ##"
320 LOCATE 8,5:PRINT" EL siguiente programa ha sido desarrollado con la final
idad de"
330 LOCATE 9,5:PRINT"registrar y procesar las senales emitidas por un aceleromet
ro tipo"
340 LOCATE 10,5:PRINT"viga en voladizo.Este tipo de transductor consiste de una
viga de"
350 LOCATE 11,5:PRINT"aluminio empotrada en un extremo,y sobre la cual se han
dispuesto"
360 LOCATE 12,5:PRINT"4 extensometro resistivos en configuracion puente completo
. La senal"
370 LOCATE 13,5:PRINT"es captada por un indicador de deformaciones puente de
Wheatstone"
380 LOCATE 14,5:PRINT"donde ella es preamplificada.Luego la senal pasa por u
n segundo"
390 LOCATE 15,5:PRINT"amplificador externo,antes de que sea llevada a la c
omputadora"
```

```

400 LOCATE 16,5:PRINT"La senal analogica es llevada a la computadora donde la t
arjeta de"
410 LOCATE 17,5:PRINT"conversion analogica-digital se encarga de acondicionar l
a senal"
420 LOCATE 18,5:PRINT"para su tratamiento posterior.
.
430 LOCATE 19,5:PRINT" Las opciones que presenta el menu son:
.
440 LOCATE 20,5:PRINT"[INSTRUMENTACION],en la cual se detallan el tipo de instru
mentos que"
450 LOCATE 21,5:PRINT"se ha utilizado,sus rangos de trabajo y observaciones a
dicionales."
460 LOCATE 24,11:PRINT"presione cualquier tecla para continuar ..."
470 B%=INKEY$: IF B%="" GOTO 470
480 CLS
490 LOCATE 7,5:PRINT"[EJECUCION],donde comienza la adquisicion de datos,y en la
cual se"
500 LOCATE 8,5:PRINT"registra el valor de aceleracion maxima pico (Pk) .
Ademas"
510 LOCATE 9,5:PRINT"esta opcion tiene la posibilidad de ejecutar la adquisicion
cada vez"
520 LOCATE 10,5:PRINT"que sea requerida o podra ser usada para monitorear algun
disposi-"
530 LOCATE 11,5:PRINT"tivo,enviando un reporte via impresora cada cierto tiempo.
.
540 LOCATE 23,11:PRINT"presione cualquier tecla para retornar a MENU..."
550 C%=INKEY$:IF C%="" GOTO 550
560 GOTO 180
570 CLS:REM----- EJECUCION -----
--
580 DIM D(5,2000),AK(20),BK(20),W(5),WHIN(5)
590 LOCATE 6,35:PRINT"<< EJECUCION >>"
600 LOCATE 10,33:PRINT"1.Mod0 Normal"
610 LOCATE 14,33:PRINT"2.Monitoreo"
620 T%=INKEY$:IF T%="" GOTO 620
630 IF T%="1" GOTO 650
640 IF T%="2" GOTO 1380 ELSE GOTO 620
650 GOSUB 950
660 LOCATE 23,20:PRINT"OTRA PRUEBA S/N ..."
670 D%=INKEY$:IF D%="" GOTO 670
680 IF D%="S" OR D%="s" GOTO 650
690 IF D%="N" OR D%="n" GOTO 180 ELSE GOTO 670
700 CLS:REM----- INSTRUMENTACION -----
710 LOCATE 3,30:PRINT"<< INSTRUMENTACION >>"
720 LOCATE 5,3:PRINT" INSTRUMENTO RANGO DE TRABAJO Y OBSER
VACIONES"
730 LOCATE 6,3:PRINT"-----
-----"
740 LOCATE 8,1:PRINT"MEDIDOR DE DEFORMACIONES +/- 19999 micro-str
ains P-3500 (MM) SALIDA ANALOGICA 40mili-
volt/mic-str."

```

```

750 LOCATE 12,1:PRINT"    AMPLIFICADOR          - 1.5/2.0 volt dc d
e salida          DE TERMOCUPLAS OMEGA          GANANCIAS DE 10/25/
50/100          "
760 LOCATE 16,1:PRINT"    COMPUTADORA IBM PS/30          0.....5.0 VD
LT          TARJETA A-D 16 CANALES Y 8 BITS          PROGRAMABLE A TRAVE
S DEL PID 8255          "
770 LOCATE 20,1:PRINT"ACELEROMETRO TIPO VIGA
          EN VOLADIZO          0 -758 mt/seg²"

780 LOCATE 23,20:PRINT"PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR"
790 E$=INKEY$:IF E$="" GOTO 790
800 CLS
810 LOCATE 6,25:PRINT"## INSTRUCCIONES DE CONECCION ##"
820 LOCATE 10,6:PRINT"1. Conecte el acelerometro al indicador de deformaciones e
n configura-"
830 LOCATE 11,6:PRINT"cion de puente completo (unir cada conector al respectivo
terminal del"
840 LOCATE 12,6:PRINT"del mismo color).Balancee el puente en -45.
          "
850 LOCATE 14,6:PRINT"2. Conecte la salida analogica del medidor de deformacione
s a la en-"
860 LOCATE 15,6:PRINT"trada del amplificador [OMEGA],y la salida de este ultimo
a la entra-"
870 LOCATE 16,6:PRINT"da de la tarjeta analogica-digital de la computadora.
          "
880 LOCATE 18,6:PRINT"3. Ajuste la ganancia del amplificador [OMEGA] a 100
          "
890 LOCATE 20,6:PRINT"4. Verifique la polaridad de las conexiones hacia el ampl
ificador y"
900 LOCATE 21,6:PRINT"y de este hacia la computadora.
          "
910 LOCATE 22,10:PRINT"
          "
920 LOCATE 23,10:PRINT" PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA RETORNAR A MENU..."
930 F$=INKEY$:IF F$="" GOTO 930
940 GOTO 180
950 SCREEN 0:COLOR 15,1
960 CLS
970 REM-----programa de adquisicion de datos-----
980 KEY OFF
990 REM
1000 S=&HDE0+3
1010 B=&HDE0+1
1020 A=&HDE0+0
1030 OUT S,12B+16
1040 FOR YU=1 TO 80 :LOCATE 8,YU:PRINT CHR$(219):NEXT YU
1050 FOR YU=1 TO 80 :LOCATE 12,YU:PRINT CHR$(219):NEXT YU
1060 LOCATE 10,13:PRINT "PULSE CUALQUIER TECLA PARA COMENZAR LA ADQUISICION DE D
ATOS"
1070 B$=INKEY$:IF B$="" THEN GOTO 1070
1080 BEEP

```

```

1090 T1=TIMER
1100 FOR J=1 TO 5
1110 FOR I=0 TO 2000
1120 OUT B,0
1130 X=INP(A):OUT B,0
1140 D(J,I)= X
1150 NEXT I:NEXT J :BEEP
1160 T2=TIMER
1170 CLS
1180 COLOR 14,1
1190 LOCATE 3,27:PRINT "ADQUISICION TERMINADA"
1200 FOR YU=1 TO 80 :LOCATE 1,YU :PRINT CHR$(219):NEXT YU
1210 FOR YU=1 TO 80 :LOCATE 5,YU :PRINT CHR$(219):NEXT YU
1220 REM----- programa para encontrar el valor maximo-----
1230 MAX=0
1240 FOR J=1 TO 5
1250 W(J)=0:WMIN(J)=D(J,0)
1260 FOR I=0 TO 2000
1270 IF D(J,I)>W(J) THEN W(J)=D(J,I)
1280 IF D(J,I)<WMIN(J) THEN WMIN(J)=D(J,I)
1290 NEXT I:MAX=W(J)+MAX:NEXT J
1300 MAX=MAX/5 :CLS
1310 REM ----- transformacion a aceleracion -----
1320 DEFO=(1.56*MAX)
1330 IF DEFO<=0 THEN ACEL=0
1340 IF DEFO<20 AND DEFO>0 THEN ACEL=(.73*DEFO)+.98
1350 IF DEFO>20 THEN ACEL=(.25*DEFO)+9.63
1360 LOCATE 6,16:PRINT "EL VALOR DE LA ACELERACION Pk MAXIMA ES ";ACEL;"m/seg2"
1370 RETURN
1380 CLS
1390 REM-----programa de adquisicion de datos-monitoreo-----
1400 KEY OFF
1410 REM
1420 S=&HDE0+3
1430 B=&HDE0+1
1440 A=&HDE0+0
1450 OUT S,128+16
1460 FOR YU=1 TO 80 :LOCATE 8,YU:PRINT CHR$(219):NEXT YU
1470 FOR YU=1 TO 80 :LOCATE 12,YU:PRINT CHR$(219):NEXT YU
1480 LOCATE 10,6:INPUT " INGRESE EL INTERVALO DE IMPRESION [seg]";IMF:AV=1
1490 LOCATE 10,2:PRINT "PULSE UNA TECLA PARA COMENZAR LA ADQUISICION DE DATOS Y
CONECTE SU IMPRESORA"
1500 B$=INKEY$:IF B$="" THEN GOTO 1500
1510 BEEP
1520 CLS
1530 LOCATE 23,14:PRINT" MONITOREANDO
1540 FOR J=1 TO 5
1550 FOR I=0 TO 2000

```

```

1560 OUT B,0
1570 X=INP(A):OUT B,0
1580 D(J,I)= X
1590 NEXT I:NEXT J
1600 REM T2=TIMER
1610 REM
1620 COLOR 14,1
1630 REM LOCATE 3,27:PRINT "ADQUISICION TERMINADA"
1640 REM FOR YU=1 TO 80 :LOCATE 1,YU :PRINT CHR$(219):NEXT YU
1650 REM FOR YU=1 TO 80 :LOCATE 5,YU :PRINT CHR$(219):NEXT YU
1660 REM----- programa para encontrar el valor maximo-----
1670 MAX=0
1680 FOR J=1 TO 5
1690 W(J)=0:WMIN(J)=D(J,0)
1700 FOR I=0 TO 2000
1710 IF D(J,I)>W(J) THEN W(J)=D(J,I)
1720 IF D(J,I)<WMIN(J) THEN WMIN(J)=D(J,I)
1730 NEXT I:MAX=W(J)+MAX:NEXT J
1740 MAX=MAX/5
1750 DEFO=1.56*MAX
1760 IF DEFO<=0 THEN ACEL=0
1770 IF DEFO<20 AND DEFO>0 THEN ACEL=(.73*DEFO)+.98
1780 IF DEFO>20 THEN ACEL=(.25*DEFO)+9.63
1790 LOCATE 12,20:PRINT "EL VALOR DE LA ACELERACION Pk MAXIMA ES "
1800 LOCATE 14,35:PRINT USING"###.##";ACEL
1810 IF AV=0 THEN 1830
1820 T1=TIMER:AV=0
1830 T2=TIMER
1840 IF T2-T1 > IMF THEN LPRINT"La aceleracion Pk maxima es :";ACEL
1850 IF T2-T1 > IMF THEN AV=1
1860 LOCATE 23,14:PRINT"Si desea parar pulse una tecla en los proximos 4 seg."
1870 Z1 = TIMER
1880 Z2 = TIMER
1890 IF Z2-Z1 >4 THEN 1530
1900 A#=INKEY$
1910 IF A#<>" " THEN 180
1920 GOTO 1880
1930 SCREEN 1
1940 COLOR 20,15:LOCATE 12,18:PRINT"F I N"
1950 FOR I=0 TO 10000:NEXT I
1960 SCREEN 2:SCREEN 0
1970 END

```

TOPICO DE GRADUACION

ANALISIS EXPERIMENTAL DE ESFUERZOS

PROGRAMA DE ADQUISICION DE DATOS PARA
TRANSDUCTOR ACELEROMETRO TIPO VIGA EN VOLADIZO

TOMAS I. MIELES

SEPTIEMBRE 1989

PRESIONE UNA TECLA PARA CONTINUAR

Pantalla 1. Presentación

<< MENU >>

1. INFORMACION

2. INSTRUMENTACION

3. EJECUCION

4. SALIR

Pantalla 2. Menú Principal

**** INFORMACION ****

El siguiente programa ha sido desarrollado con la finalidad de registrar y procesar las senales emitidas por un acelerometro tipo viga en voladizo. Este tipo de transductor consiste de una viga de aluminio empotrada en un extremo, y sobre la cual se han dispuesto 4 extensometros resistivos en configuracion puente completo. La senal es captada por un indicador de deformaciones puente de Wheatstone donde ella es preamplificada. Luego la senal pasa por un segundo amplificador externo, antes de que sea llevada a la computadora. La senal analogica es llevada a la computadora donde la tarjeta de conversion analogica-digital se encarga de acondicionar la senal para su tratamiento posterior.

Las opciones que presenta el menu son:
[INSTRUMENTACION], en la cual se detallan el tipo de instrumentos que se ha utilizado, sus rangos de trabajo y observaciones adicionales.

presione cualquier tecla para continuar ...

Pantalla 3. Menú Información

[EJECUCION], donde comienza la adquisicion de datos, y en la cual se registra el valor de aceleracion maxima pico (Pk). Ademas esta opcion tiene la posibilidad de ejecutar la adquisicion cada vez que sea requerida o podra ser usada para monitorear algun dispositivo, enviando un reporte via impresora cada cierto tiempo.

presione cualquier tecla para retornar a MENU...

**Pantalla 4. Continuación del Menú
Información**

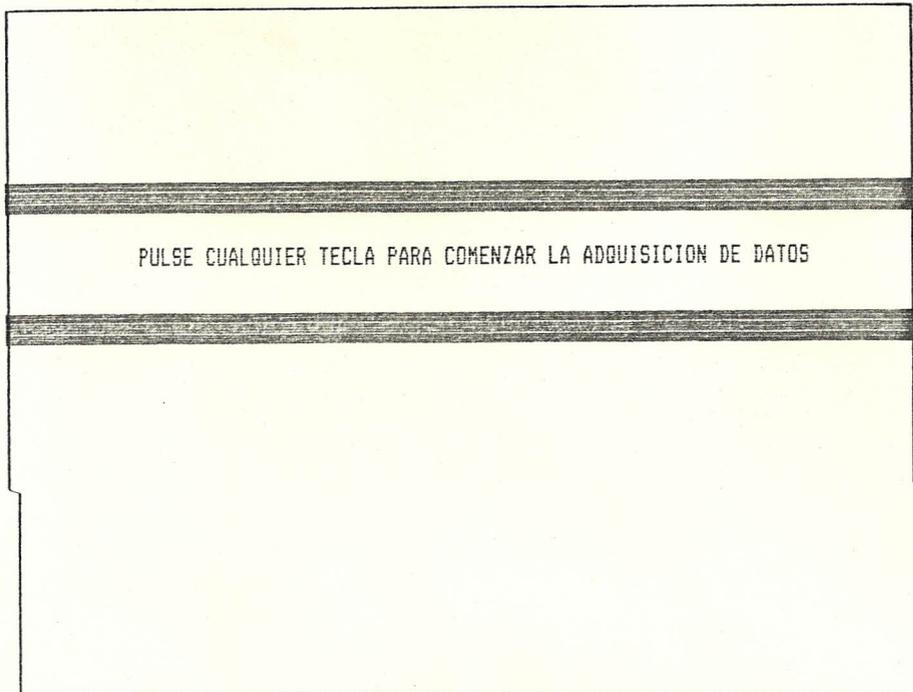
<< INSTRUMENTACION >>	
INSTRUMENTO	RANGO DE TRABAJO Y OBSERVACIONES

MEDIDOR DE DEFORMACIONES P-3500 (MM)	+/- 19999 micro-strains SALIDA ANALOGICA 440mili-volt/mic-str.
AMPLIFICADOR DE TERMOCUPLAS OMEGA	- 1.5/2.0 volt dc de salida GANANCIAS DE 10/25/50/100
COMPUTADORA IBM PS/30 TARJETA A-D 16 CANALES Y 8 BITS	0.....5.0 VOLT PROGRAMABLE A TRAVES DEL PIO 8255
ACELEROMETRO TIPO VIGA EN VOLADIZO	0 -758 mt/seg ²
PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA CONTINUAR	

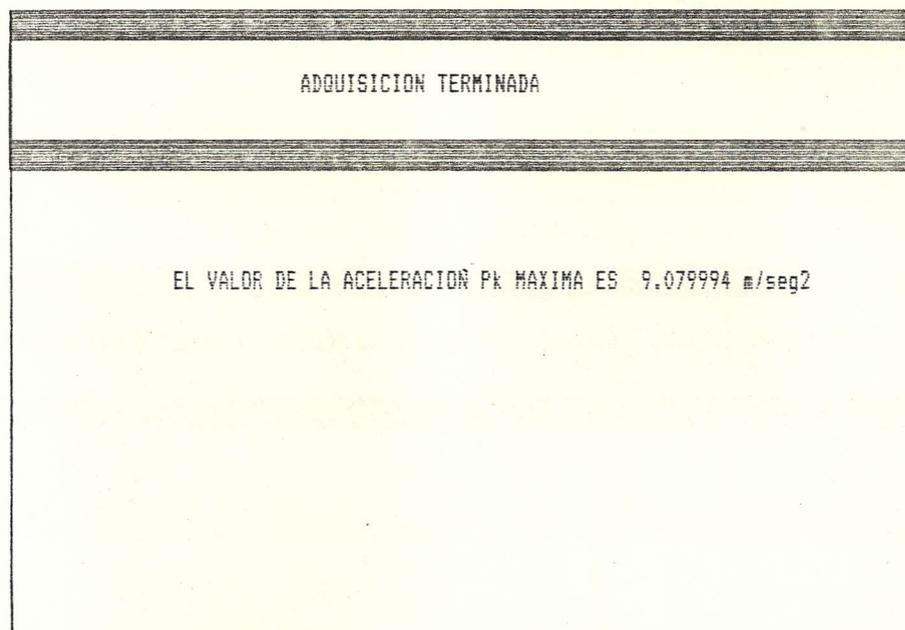
Pantalla 5. Menú Instrumentación

** INSTRUCCIONES DE CONECCION **
1. Conecte el acelerometro al indicador de deformaciones en configuracion de puente completo (unir cada conector al respectivo terminal del del mismo color). Balancee el puente en -45.
2. Conecte la salida analogica del medidor de deformaciones a la entrada del amplificador [OMEGA], y la salida de este ultimo a la entrada de la tarjeta analogica-digital de la computadora.
3. Ajuste la ganancia del amplificador [OMEGA] a 100
4. Verifique la polaridad de las conexiones hacia el amplificador y y de este hacia la computadora.
PRESIONE CUALQUIER TECLA PARA RETORNAR A MENU...

Pantalla 6. Menú Instrucciones de Conección



Pantalla 7. Menú Ejecución, Modo Normal



Pantalla 8. Presentación de resultado

INGRESE EL INTERVALO DE IMPRESION [seg]?

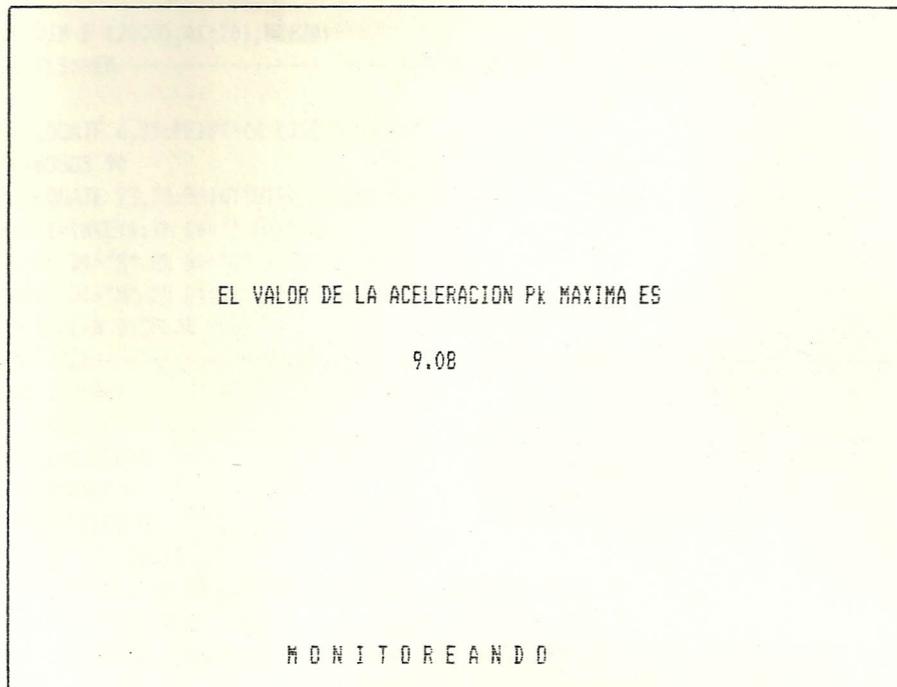
A rectangular terminal window with a black border. The text "INGRESE EL INTERVALO DE IMPRESION [seg]?" is centered in the middle. The window is divided into three horizontal sections by two thick, dark horizontal lines. The top and bottom sections are empty, while the middle section contains the text.

Pantalla 9. Menú Ejecución, Monitoreo
Ingresando el intervalo de
tiempo para la impresión

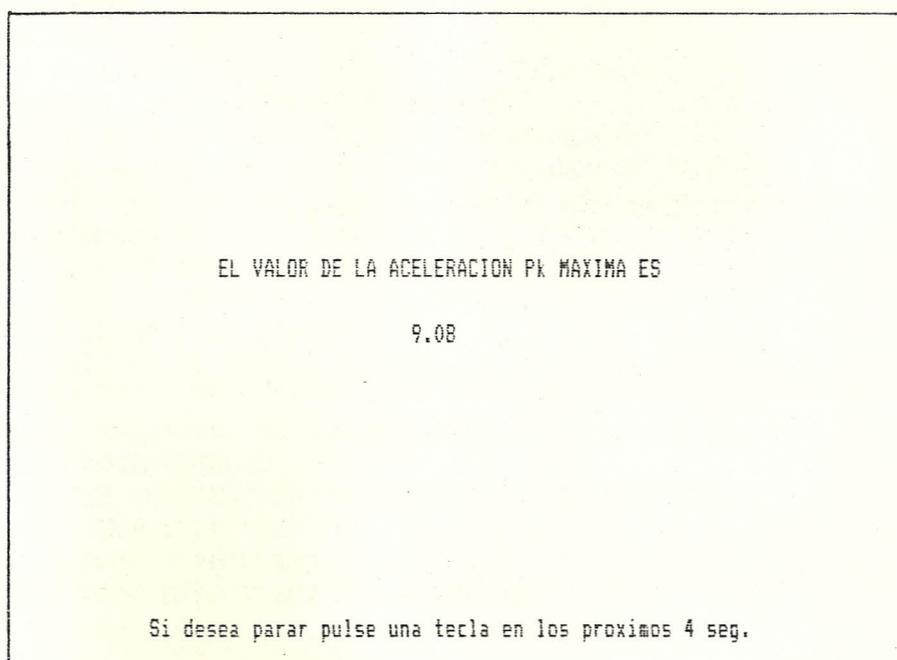
PULSE UNA TECLA PARA COMENZAR LA ADQUISICION DE DATOS Y CONECTE SU IMPRESORA

A rectangular terminal window with a black border. The text "PULSE UNA TECLA PARA COMENZAR LA ADQUISICION DE DATOS Y CONECTE SU IMPRESORA" is centered in the middle. The window is divided into three horizontal sections by two thick, dark horizontal lines. The top and bottom sections are empty, while the middle section contains the text.

Pantalla 10. Inicio del Monitoreo



Pantalla 11. Presentación del valor moni-
toreado.



Pantalla 12. Opción para detener la eje-
cución del Monitoreo.

Programa para la Transformada Discreta de Fourier

```
10 DIM D (2000),AK(20),BK(20)
20 CLS:REM----- EJECUCION -----
-
30 LOCATE 6,35:PRINT"<< EJECUCION >>"
40 BDSUB 90
50 LOCATE 23,20:PRINT"OTRA PRUEBA S/N ..."
60 D$=INKEY$:IF D$="" GOTO 60
70 IF D$="S" OR D$="s" GOTO 20
80 IF D$="N" OR D$="n" GOTO 910 ELSE GOTO 60
90 SCREEN 0:COLOR 15,1
100 REM-----programa de adquisicion de datos-----
110 KEY OFF
120 REM
130 S=&HDE0+3
140 B=&HDE0+1
150 A=&HDE0+0
160 OUT S,128+16
170 FOR YU=1 TO 80 :LOCATE 8,YU:PRINT CHR$(219):NEXT YU
180 FOR YU=1 TO 80 :LOCATE 12,YU:PRINT CHR$(219):NEXT YU
190 LOCATE 10,13:PRINT "PULSE CUALQUIER TECLA PARA COMENZAR LA ADQUISICION DE DA
TOS"
200 B$=INKEY$:IF B$="" THEN GOTO 200
210 BEEP
220 T1=TIMER
230 FOR I=0 TO 2000
240 OUT B,0
250 X=INP(A):OUT B,0
260 D(I)= X
270 NEXT I:BEEP
280 T2=TIMER
290 CLS
300 COLOR 14,1
310 LOCATE 3,27:PRINT "ADQUISICION TERMINADA"
320 FOR YU=1 TO 80 :LOCATE 1,YU :PRINT CHR$(219):NEXT YU
330 FOR YU=1 TO 80 :LOCATE 5,YU :PRINT CHR$(219):NEXT YU
340 REM----- programa para encontrar el valor maximo-----
350 W=0:WMIN=D(0)
360 FOR I=0 TO 2000
370 IF D(I)>W THEN W=D(I)
380 IF D(I)<WMIN THEN WMIN=D(I)
390 NEXT I
400 CLS
410 LOCATE 6,16:PRINT "EL VALOR DE LA ACELERACION Pk MAXIMA ES: "; W
420 WMED=INT((W+WMIN)/2)
430 LOCATE 10,16:PRINT"DESEA OBTENER LOS ARMONICOS S/N "
440 P$=INKEY$:IF P$="" GOTO 440
450 IF P$="n" OR P$="N" GOTO 900
460 IF P$="s" OR P$="S" GOTO 470 ELSE GOTO 440
```

```

470 LOCATE 10,8:INPUT "INGRESE EL VALOR DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL MAXIMA (Hz)
";FF
480 LOCATE 10,8:PRINT " EJECUTANDO ...
"
490 REM-----fijacion de la ventana de tiempo-----
500 TF=1/FF
510 TM=(T2-T1)/2001:FM=1/TM
520 NDAT=FIX(TF/TM)
530 FOR I=0 TO 1999
540 IF D(I)<WMED AND D(I+1)>WMED THEN VE=I
550 IF D(I)<WMED AND D(I+1)>WMED THEN GOTO 570
560 NEXT I
570 TAV=NDAT:VS=VE+(NDAT-1)
580 IF TAV=0 GOTO 20
590 REM----- analisis de fourier-----
600 REM NA.MAX DETERMINADO POR RELACION DE SHANNON
610 NA =FIX(FM/(2.5*FF))
620 FOR K=1 TO NA
630 A2=0
640 FOR I=VE TO VS-1
650 A1=(D(I)-WMED)*(COS(2*3.1416*K*(I-VE)/TAV))*2/TAV
660 A2=A1+A2
670 NEXT I
680 AK(K)=A2
690 NEXT K
700 FOR K=1 TO NA
710 B2=0
720 FOR I=VE TO VS-1
730 B1=(D(I)-WMED)*(SIN(2*3.1416*K*(I-VE)/TAV))*2/TAV
740 B2=B1+B2
750 NEXT I
760 BK(K)=B2
770 NEXT K
780 FOR K=1 TO NA
790 LOCATE (9+K),16:PRINT K;"armonico=";SQR(((AK(K))^2)+((BK(K))^2));"
"
800 NEXT K
810 V$=INKEY$:IF V$="" GOTO 810
820 SCREEN 2
830 WINDOW (0,0)-(2000,150)
840 LINE (0,0)-(0,150):LINE (0,0)-(2000,0):LINE(0,.5*WMED)-(2000,.5*WMED)
850 FOR I=0 TO 1999
860 REM PSET (I,D(I))
870 LINE (I,.5*D(I))-((I+1),.5*D(I+1))
880 NEXT I:REM PRINT VE,VS,TAV
890 D$=INKEY$:IF D$="" GOTO 900
900 RETURN
910 END

```

NOMENCLATURA

A = Area [metros²] o [mm ²]

A/D = Analógico a Digital

D/A = Digital a Analógico

E = Módulo de elasticidad o de Young [Newton/mt ²]

f_n = frecuencia natural [hz]

GF = "gage factor" o factor de celda

g = gravedad

p.e = peso específico [Newton/mt³]

LETRAS GRIEGAS

ε = deformación unitaria [με]

σ = esfuerzo [Newton/mt²]

ω_n = frecuencia natural angular [rad/seg]

με = micro strain [1 E-6 mm/mm]

ρ = densidad del material [kg/mt³]

ξ = relación de amortiguamiento

Ψ = amplitud de la onda de excitación

BIBLIOGRAFIA

- 1.- G. Ricci, Diseño, Construcción y Calibración de un Acelerómetro tipo viga en voladizo (Guayaquil, Ecuador: ESPOL, 1979)
- 2.- W.T.Thomson, Teoria de Vibraciones.Aplicaciones (N.J., USA : Prentice - Hall,1981), pp. 78 - 84.
- 3.- J.Trampe Broch,Mechanical Vibration & Shock Measurements (2a. edición; Dinamarca : Brüel & Kjaer, 1984),pp 97 - 105.
- 4.- C.Perry, The Strain Gage Primer (2a.edición; New York,USA :Mc.Graw-Hill,1962) pp. 17 - 27 , 55 -68.
- 5.- Institute of Nuclear Engineering & ND Testing, Vibration Analysis (Hannover, Germany,1989) pp. II.III.2 - II.III.19
- 6.- Hewlett-Packard,Manual:HP-41 CV Standard Applications (Corvallis,OR ,USA ,1982) pp. 42- 48
- 7.- Hewlett-Packard, Manual:HP-41 CV Math Pac (Corvallis,OR USA ,1982) pp. 42 - 48
- 8.- W.Sikonowitz, Introducción al IBM PC (Mexico:

Mc.Graw- Hill,1984)

- 9.- C.Rey, Periféricos interactivos para su ordenador
(Madrid, España : Ediciones Siglo Cultural, 1986)
pp 75 -77

- 10.- E.Orcés, Apuntes de clase del curso Mecánica de Sólidos Avanzados (Guayaquil, Ecuador 1989)

- 11.- Hans-Peter Löhrlein, Apuntes de clase del curso Adquisición de datos por Computadora (Guayaquil, Ecuador 1989)

- 12.- Measurements Group, Inc., Manual del medidor de picos, (Raleigh, North Carolina, USA 1983)