

**ADAPTACIÓN DE LA TEORÍA DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA
PARA LA CALIBRACIÓN DE TRANSDUCTORES DE PRESIÓN**

LUIS GERARDO CASTILLO ELSITDIÉ
Ingeniero Civil
Ecuador

Trabajo presentado en el Curso de Postgrado **Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural.**
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Cataluña
Barcelona-España.-1989

I N D I C E

1.- Resumen.....	2
2.- Introducción.....	2
3.- Equipo Utilizado.....	3
4.- Calibración Estática.....	3
5.- Calibración Dinámica.....	4
5.1.- Calibración con Función Tipo Salto.....	6
5.1.1.- Caso Continuo.....	6
5.1.2.- Caso Discreto.....	7
5.2.- Calibración con Función Tipo Rampa.....	10
6.- Análisis de los Ensayos y Conclusiones.....	12

GRAFICOS

Figura No.1	Tipología de Disipadores de Energía.....	13
Figura No.2	Esquema del Equipo.....	14
Figura No.3.1	Curva de Calibración Estática (T. Kistler).....	15
Figura No.3.2	Curva de Calibración Estática (T. Dynisco).....	15
Figura No.4	Función Tipo Rampa.....	16
Figura No.5	Derivada de la Función Tipo Rampa.....	16
Figura No.6	Respuesta del Transductor.....	17
Figura No.7	Derivada de la Respuesta del Transductor.....	17
Figura No.8	Suavizado de la Respuesta del Transductor.....	17
Figura No.9	Módulo de la Función de Transferencia.....	18
Figura No.10	Densidades Espectrales.....	18

BIBLIOGRAFIA.....	19
-------------------	----

1.- RESUMEN

En este trabajo se resume la metodología seguida en la Calibración Estática y Dinámica de los Transductores de Presión, que se utilizan en la Investigación de las "Acciones de las Fluctuaciones de Presión Macroturbulentas en los Disipadores de Energía Hidráulica a Pie de Presa" -. Concretamente, cómo se determinaron las curvas de "Calibración Estática" y qué procedimientos matemáticos se acoplaron a las condiciones de —equipo disponible—, en la comprobación de las "Funciones de Transferencia" de los Transductores.

2.- INTRODUCCIÓN

El estudio Hidráulico y Estructural de los dispositivos que se encuentran sometidos a fluctuaciones de presión turbulenta— como es el caso de los Disipadores de Energía Hidráulica de las Presas (figura 1), es uno de los problemas más complejos e interdisciplinarios de la Ingeniería Civil.

Las características del fenómeno de la turbulencia—aleatoriedad, anisotropía y no homogeneidad—, no permiten un tratamiento puramente analítico del problema, razón por la cual los parámetros fundamentales del fenómeno son obtenidos experimentalmente en Modelos Hidráulicos, que son construidos bajo las Leyes de Semejanza Dinámica.

Los Transductores de Presión son la instrumentación más idónea para la determinación de la Fluctuaciones de Presión; siendo por tanto imprescindible la comprobación de su funcionamiento, para garantizar de esta manera la fiabilidad de los resultados experimentales.

Los transductores existentes en el mercado están diseñados para usos específicos y por tanto la mayoría de ellos no sirven para la investigación presente. De los posibles tipos de transductores que pueden utilizarse, el seleccionar los más idóneos no es una tarea fácil. El criterio de selección (además del rango de presión a medir, tamaño, costo, etc,..) fue exigir que la relación Tensión Eléctrica — Presión, sea de tipo lineal.

Los Transductores seleccionados [4 de marca Kystler-(Suizos) y 1 de marca Dynisco-(Americano)] debieron aún ser adaptados. Así, se cambió el tipo de rosca americana a europea, con el fin de uniformizar las operaciones en el modelo; se cubrió con capuchones de-pvc—a las roscas de acero de los transductores, con el fin de evitar el desgaste por abrasión de la plancha de metacrilato del modelo, etc, etc,...

Por otra parte, la calibración dada por los fabricantes debe ser comprobada, porque en unos casos —costos bajos de venta— puede relacionarse con una mala calidad o, en otros casos, aún siendo de muy buena calidad en fábrica, pudieron haberse estropeado en el viaje de importación y/o distribución.

3.- EQUIPO UTILIZADO

Para la calibración estática y dinámica de los transductores de presión fue necesario construir un tubo de carga en metacrilato de 3.00m de altura y 0.10m de diámetro.

Como se indica en la figura ²X, junto al tubo de carga se instaló un piezómetro de 0.005m de diámetro, con el cual se controlaron los niveles del ensayo.

La interconexión entre tubo de carga, piezómetro y transductor se efectuó por medio de una electroválvula, la misma que registró una velocidad de apertura de 0.35s.

La adquisición de los datos se efectuó por medio de una tarjeta de conversión analógico-digital marca, "Data-Translation" y un computador personal "IBM System-II".

Para la operación fue necesario adaptar subrutinas gráficas, existentes en unos casos, y programar otras completamente; sobre todo en lo que se refiere al Tratamiento de los datos.

El esquema del equipo y su disposición general puede mirarse en la figura ²X.

4.- CALIBRACION ESTATICA

La calibración estática consistió en registrar los niveles de presión en (cm) de columna de agua y sus correspondientes valores de Tensión eléctrica en (mV). Esto se realizó para diferentes alturas, tanto en llenado como en vaciado del tubo de carga.

Los resultados se graficaron y se determinaron sus ecuaciones de regresión respectivas. Es importante anotar que por este procedimiento se eligieron los transductores de entre todos aquellos ofertados en el mercado; pues dentro de los requerimientos impuestos, además del rango dinámico de medición, costo, tamaño, etc., se consideró, la relación lineal entre Presión(cm)—Tensión(mV).

Unas curvas típicas de los resultado de la Calibración Estática, puede observarse en las figuras 3.1 y 3.2

Otro aspecto importante, es que estas curvas de calibración estáticas son las que incluidas en los programa de tratamiento, traducen los valores de Tensión en (mV) a valores de Presión en (cm). Por lo tanto, la precisión en la determinación de la pendiente de la curva, —así— como del valor de la ordenada al origen es fundamental.

En la toma de datos experimentales del modelo de la "Estructura de Disipación de Energía", lo que realmente se mantuvo constante para todos los casos fue la pendiente de la curva de calibración, ya que el valor de la ordenada al origen estuvo afectado por las condiciones de ruido presentes en cada día.

Un tema que complicó el problema aún más es que la amplificación de la señal se realiza en la tarjeta de adquisición de datos y no en los mismos transductores; por tanto se amplifica por igual la señal y el ruido.

Una solución inmediata al problema consiste en incorporar a los transductores filtros analógicos y multiplicadores diferenciales, pero que en la práctica por su costo se vuelven prohibitivos.

Después de intentar varias alternativas se llegó a la estrategia final para obviar el problema del ruido y fue —realizar la calibración de la ordenada al origen— en cada nuevo inicio de toma de muestras; pues de esta forma se comprobó que las desviaciones introducidos por el ruido aleatorio, quedaban neutralizadas. La media del ruido muestrado por cada transductor, corresponde a su valor de ordenada al origen de la curva de Calibración del día respectivo. Por lo tanto los programas generales de tratamiento se hicieron considerando esta corrección.

Estas calibraciones se realizaron simulando las mismas condiciones de ruido presentes en los ensayos, para lo cual se ponían en funcionamiento los equipos de bombeo, pero sin permitir la salida de agua al modelo; de esta forma se muestreaba con la misma frecuencia y duración que los ensayos normales con salida de agua.

5.- CALIBRACION DINAMICA

La calibración dinámica es más bien una comprobación de las Funciones de Transferencia de los Transductores de Presión.

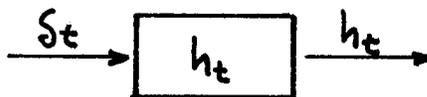
Se define la Función de Transferencia $-H(\omega)$ -de un Sistema, como la Transformada de Fourier de la Respuesta al Impulso $-h(t)$ -

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

La Respuesta al Impulso $-h(t)$ - de un Sistema, se obtiene aplicando a este sistema una Función Delta de Dirac $-\delta_t$ - de tal forma que:

$$\delta_t = \begin{cases} 0, & \text{si } t \neq t_r \\ 1, & \text{si } t = t_r \end{cases} \quad (2)$$

Donde t_r es el tiempo de referencia de la primera llegada del incremento de presión.

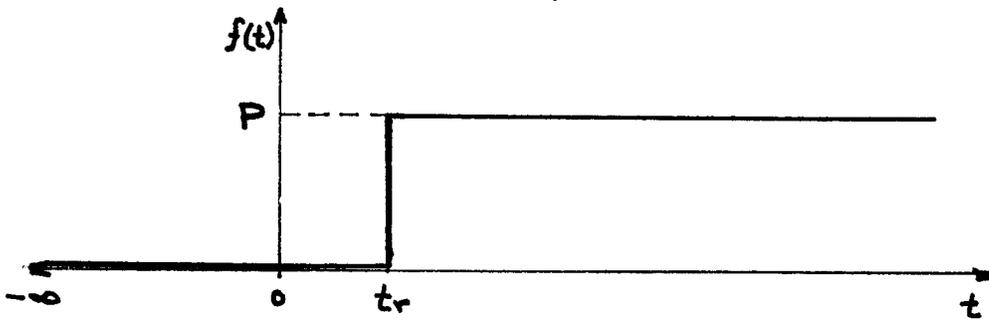


Para obtener la **Función Impulso** se usa el mismo equipo que se emplea en la calibración estática (Ver figura 1). Para esto, se intenta conseguir una **Función Salto o Escalón** $f(t)$, accionando la electroválvula; la misma que al abrirse provoca por **vasos comunicantes** un incremento de presión de p a P . Por lo tanto, la **Derivada de la Función Salto** nos da la **Función impulso** buscada ($h(t) = f'(t)$).

Es importante hacer notar que, la calibración dependerá del tipo de Función obtenida realmente en laboratorio, concretamente, por el tiempo de apertura de la electroválvula. Así, para **tiempos menores a 0.05s** la respuesta obtenida puede considerarse como una función salto; de lo contrario se obtendrá una función rampa.

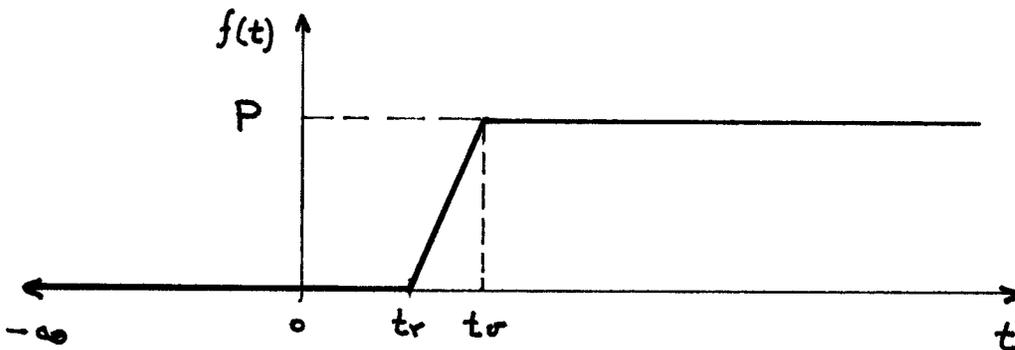
5.1.- Calibración con Función Salto.

$$f(t) = \begin{cases} 0, & \text{si } t \leq t_r \\ P, & \text{si } t \geq t_r \end{cases} \quad (3)$$



5.2.- Calibración con Función Rampa.

$$f(t) = \begin{cases} 0, & \text{si } t \leq t_r \\ t * (P/t_v), & \text{si } t_r \leq t \leq t_v \\ P, & \text{si } t \geq t_v \end{cases} \quad (4)$$



A continuación analizaremos estos dos tipos de calibración, deduciendo los algoritmos más adecuados para uno y otro caso.

5.1.- CALIBRACIÓN CON RESPUESTA DE FUNCIÓN TIPO SALTO

Como hemos visto anteriormente, la respuesta obtenida en laboratorio se puede considerar como una **Función Salto** cuando el tiempo de apertura de la electroválvula sea inferior a $t_v = 0.05s$.

Para obtener la **Función Impulso** necesitamos "derivar" numéricamente a la **Función Salto**.

En lo posible se debe evitar realizar cualquier derivación numérica, por lo tanto debemos encontrar una nueva relación entre la **Función Impulso** y la **Función Salto** $h_t = \varphi[f(t)]$.

Esta nueva relación la encontraremos, tanto para el caso de representación continua como discreta.

5.1.1.- Caso Continuo

Partiendo de la definición de **Función de Transferencia** (ecuación (1)) tenemos que:

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i\omega t} dt$$

y reemplazando $h(t) = f'(t)$ (derivada de la función salto), tenemos:

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f'(t)e^{-i\omega t} dt \quad (5)$$

Cambiando de variables e integrando por partes:

$$\begin{aligned} f'(t)dt &= du; \rightarrow u = f(t) \\ e^{-i\omega t} &= v; \rightarrow dv = -i\omega e^{-i\omega t} dt \end{aligned}$$

Obtenemos que:

$$H(\omega) = \left[f(t)e^{-i\omega t} \right]_{-\infty}^{\infty} - \int_{-\infty}^{\infty} -i\omega e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

El producto $f(t)e^{-i\omega t}]_{-\infty}^{\infty}$ es igual a cero, ya que reemplazando los límites correspondientes tenemos: cuando $(t \rightarrow \infty)$ el valor $(e^{-i\omega t} \rightarrow 0)$ y, cuando $(t \rightarrow -\infty)$ el valor de $(f(t) = 0)$.

Por lo tanto:

$$H(\omega) = i\omega \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (7)$$

La integral $\int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt = F(\omega)$, es la Transformada de Fourier de la Respuesta con función tipo Salto $f(t)$.

De esta forma, la **Función de Transferencia** se relaciona directamente con la **Función Salto** por medio del Producto Complejo:

$$H(\omega) = i\omega F(\omega) \quad (8)$$

La Ecuación (8) no es más que una confirmación de uno de los Teoremas de la Variable Compleja; 'la derivada temporal de una función $f(t)$, equivale en el campo complejo, a su Transformada de Fourier $F(\omega)$ multiplicada por la frecuencia compleja $(i\omega)$.'

5.1.2.- Caso Discreto

El análisis del caso continuo es más bien de tipo teórico, ya que la información que obtenemos de los ensayos es de tipo discreto. Escogiendo un **Período de Muestreo "T"**, el tiempo continuo se discretiza como $t = kT$.

Así, se define la **Transformada Discreta Finita de Fourier (TDFE)** de la Respuesta al Impulso $f(kT)$ como:

$$\hat{H}(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} f(kT)e^{-i\omega kT} \quad (9)$$

Donde "N" representa el número total de datos muestreados.

La derivada de la función Salto $f'(kT)$, podemos expresarla como una derivación numérica muy simple:

$$f'(kT) = \frac{f(kT + T) - f(kT)}{T} \quad (10)$$

Reemplazando la Ec.(10) en la Ec.(9), tenemos que:

$$\hat{H}_s(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{f(kT + T) - f(kT)}{T} e^{-i\omega kT} = \frac{1}{T} \left[\sum_{k=0}^{N-1} f(kT + T) e^{-i\omega kT} - \sum_{k=0}^{N-1} f(kT) e^{-i\omega kT} \right]$$

El segundo sumatorio del lado derecho representa la **Transformada Discreta Finita de Fourier (TDF)** de la Respuesta de función tipo Salto:

$$\sum_{k=0}^{N-1} f(kT)e^{-i\omega kT} = \hat{F}(\omega)$$

Si al primer sumatorio del lado derecho le multiplicamos y dividimos por $\left(\frac{e^{-i\omega T}}{e^{-i\omega T}}\right)$, obtenemos:

$$\sum_{k=0}^{N-1} f(kT + T)e^{-i\omega kT} \left(\frac{e^{-i\omega T}}{e^{-i\omega T}}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{f(kT + T)e^{-i\omega(kT+T)}}{e^{-i\omega T}}$$

Por lo tanto:

$$\sum_{k=0}^{N-1} f(kT + T)e^{-i\omega kT} = e^{i\omega T} \hat{F}(\omega)$$

Con lo cual:

$$\hat{H}_s(\omega) = \frac{1}{T} \left[e^{i\omega T} \hat{F}(\omega) - \hat{F}(\omega) \right] \quad (11)$$

Quedando finalmente la Función de Transferencia relacionada directamente con la Respuesta de función tipo Salto, por medio de un producto complejo:

$$\hat{H}_s(\omega) = \hat{F}(\omega) \left(\frac{e^{i\omega T} - 1}{T} \right) \quad (12.1)$$

Como cualquier valor complejo, la Función de Transferencia se puede expresar como la suma de su parte Real e Imaginaria:

$$\hat{H}_s(\omega) = A_s(\omega) + iB_s(\omega) \quad (12.2)$$

Donde:

A_s ... Parte Real de la Función de Transferencia

B_s ... Parte Imaginaria de la Función de Transferencia

Podemos expresar a la Función de Transferencia con Respuesta de función tipo Salto, por medio de su Módulo y Fase.

Módulo de la Función de Transferencia:

$$\left| \hat{H}_s(\omega) \right| = \left| \hat{F}(\omega) \left(\frac{e^{i\omega T} - 1}{T} \right) \right| \quad (12.3)$$

Fase de la Función de Transferencia:

$$\Psi_s = \text{Arctg} \left(\frac{B_s(\omega)}{A_s(\omega)} \right) \quad (12.4)$$

Donde:

T... Período de Muestreo

N... Número total de datos muestreados

Ψ_s ... Angulo de Fase de la Función de Transferencia con Respuesta

de función tipo Salto

$\left| H_s(\omega) \right| = \sqrt{A_s^2 + B_s^2}$... Módulo de la Función de Transferencia con Respuesta

de función tipo Salto

$\hat{F}(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} f(kT)e^{-i\omega kT}$... TDFE de la Respuesta de función tipo Salto.

A_s ... Parte Real de la Función de Transferencia con Respuesta de función tipo Salto

B_s ... Parte Imaginaria de la Función de Transferencia con Respuesta de función tipo Salto.

Nota: La TDFE—($\hat{F}(\omega)$)— se calcula con el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Esta subrutina de cálculo se incorporó a todos los programas de tratamiento.

5.2.- CALIBRACIÓN CON RESPUESTA DE FUNCIÓN TIPO RAMPA

Cuando el tiempo de apertura de la Electroválvula es $t_v \geq 0.05s$ lo que obtenemos es una Función tipo Rampa $r(t)$.

La derivada de una función rampa, corresponde a una función tipo bloque $m(t) = r'(t)$, con valores característicos:

$$m(t) = \begin{cases} 0, & \text{si } t \leq t_r \\ P, & \text{si } t_r \leq t \leq t_v \\ 0, & \text{si } t \geq t_v \end{cases} \quad (13)$$

La Transformada Discreta Finita de Fourier (TDF) de la Función Bloque es:

$$\hat{M}(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} m(kT)e^{-i\omega kT} \quad (14)$$

La misma que representa un **In-put** o entrada teórica al Sistema en el campo complejo.

La respuesta en el tiempo obtenida en el laboratorio $r(kT)$ se derivada numéricamente. Esta función deberá ser suavizada convenientemente para obtener la función $s(kT)$:

$$s(kT) = \frac{1}{2n+1} \sum_{j=-n}^n r'(kT+j) \quad (15)$$

Donde n representa el orden que define los puntos de suavizado [$n=1 \rightarrow 3$ - puntos - de - suavizado; $n=2 \rightarrow 5$ - puntos - de - suavizado...]

La Transformada Discreta Finita de Fourier de la Función suavizada $s(kT)$ es:

$$\hat{S}(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} s(kT)e^{-i\omega kT} \quad (16)$$

La cual representa el **out-put** o salida real del Sistema en el campo complejo.

La relación entre la salidas y entradas— (out-put/in-put)— del Sistema, nos define la Función de Transferencia — $\hat{H}_r(\omega)$ —.

En nuestro caso, será el cuociente entre las ecuaciones (16) y (14) , así:

$$\hat{H}_r(\omega) = \frac{S(\omega)}{M(\omega)} \quad (17.1)$$

Al igual que para la función —salto—, la Función de Transferencia se puede expresar en función de su Módulo y Fase:

$$\left| \hat{H}_r(\omega) \right| = \left| \frac{\hat{S}(\omega)}{\hat{M}(\omega)} \right| \quad (17.2)$$

$$\Psi_r = \text{Arctg} \left(\frac{B_r(\omega)}{A_r(\omega)} \right) \quad (17.3)$$

Donde:

T... Período de Muestreo

N... Número total de datos muestreados

Ψ_r ... Angulo de Fase de la Función de Transferencia con Respuesta tipo Rampa

$\left| \hat{H}_r(\omega) \right| = \sqrt{A_r^2 + B_r^2}$... Módulo de la Función de Transferencia con Respuesta

de función tipo Rampa

$\hat{M}(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} m(kT)e^{-i\omega kT}$... TDFF de la Derivada de la Función tipo Rampa

[Función Bloque (In-put)].

$\hat{S}(\omega) = \sum_{k=0}^{N-1} s(kT)e^{-i\omega kT}$... TDFF de la Derivada Suavizada de la Respuesta

de función tipo Rampa (out-put).

A_r ... Parte real de la Función de Transferencia con Respuesta de función tipo Rampa

B_r ... Parte Imaginaria de la Función de Transferencia con Respuesta de función tipo Rampa

6.- ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS Y CONCLUSIONES

Resumiendo lo tratado anteriormente, diremos que la **Calibración Estática** de los Transductores de Presión no conlleva mayor dificultad. Sin embargo, su determinación correcta es muy importante, pues además de ser un parámetro decisivo en la selección de compra (exigencia de linealidad entre Tensión—Presión), su curva de regresión nos da la transformación de los datos medidos, para su posterior tratamiento.

La **Calibración Dinámica** consiste en comprobar las **Funciones de Transferencia** de los Transductores. Su realización conlleva mayor complicación y el análisis de los datos medidos dependerá del tipo de la Función de Respuesta obtenida en el Laboratorio.

Así, hemos visto que para tiempos de apertura de la electroválvula ($t_v < 0.05s$), la Función de Transferencia puede analizarse como una Respuesta de función de tipo Escalón y su cálculo, realizarse directamente por medio de la fórmula (12.3).

Para tiempos de apertura de la electroválvula ($t_v \geq 0.05s$), como ha sido nuestro caso ($t_v \simeq 0.35s$), la Función de Transferencia debe analizarse como una Respuesta de función de tipo Rampa y su cálculo, realizarse por medio de la fórmula (17.2).

En la figura No.4 se indica la función tipo Rampa que se ajusta a los datos medidos. Debe notarse, que el tiempo de la primera llegada del incremento de presión es ($t_r = 0.5s$). El ensayo se ha realizado con una frecuencia de 200 muestras por segundo (lo que corresponde a una frecuencia de Nyquist de 100Hz), y con 1000 puntos de muestreo.

En la figura No.5 se indica la derivada de la función rampa y cuya Transformada Discreta Finita de Fourier (TDFF) se utiliza como —In-put—.

En las figuras 6 y 7 se indican las Respuesta del transductor y su derivada correspondiente.

En la figura No.8 se presenta la derivada de la Respuesta suavizada con 21 puntos y cuya Transformada Discreta Finita de Fourier (TDFF) es la salida del sistema—Out-put—.

En la figura No.9 se indica el Módulo de la Función de Transferencia del Transductor analizado. Se puede observar que ésta es sensiblemente —plana—hasta los 20Hz. A partir de esta frecuencia los datos obtenidos deberán ser tratados por medio de una corrección de la Función de Transferencia.

En las investigaciones de las **Fluctuaciones de Presión**, lo que nos interesa analizar son las **macroturbulencias**, las mismas que se encuentran muy por debajo de los 20Hz. Por lo tanto, los datos obtenidos no necesitan ser corregidos. Como afirmación de esto último, se presenta en la figura No.10 las **Densidades Espectrales** de estas Fluctuaciones de Presión, medidas para diferentes alturas de agua (colchones), del Disipador de Energía. Las máximas concentraciones de las fluctuaciones de presión macroturbulentas se encuentran por debajo de 1Hz.

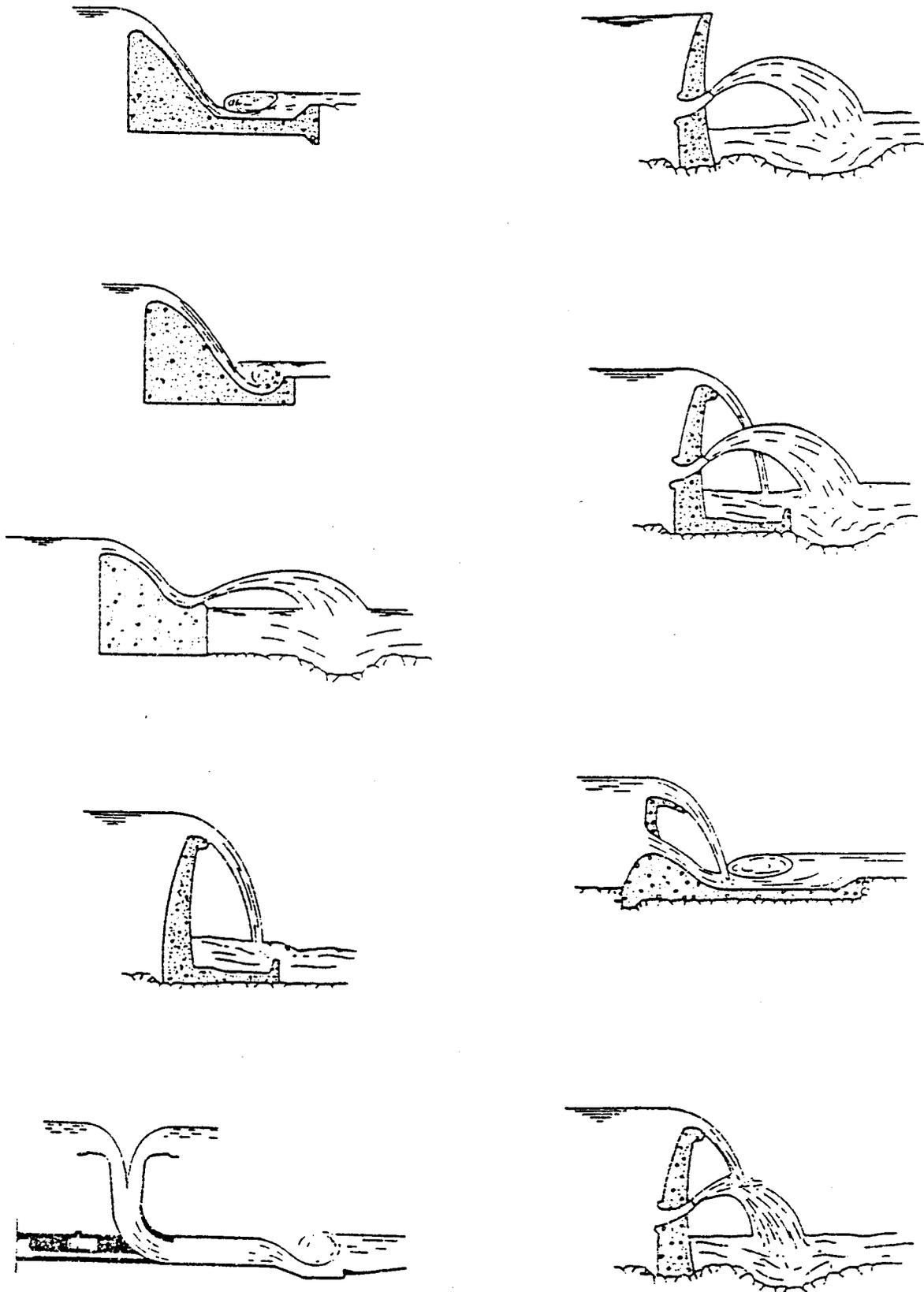


FIGURA No.1: Tipología de los Disipadores de Energía

ESQUEMA DEL EQUIPO

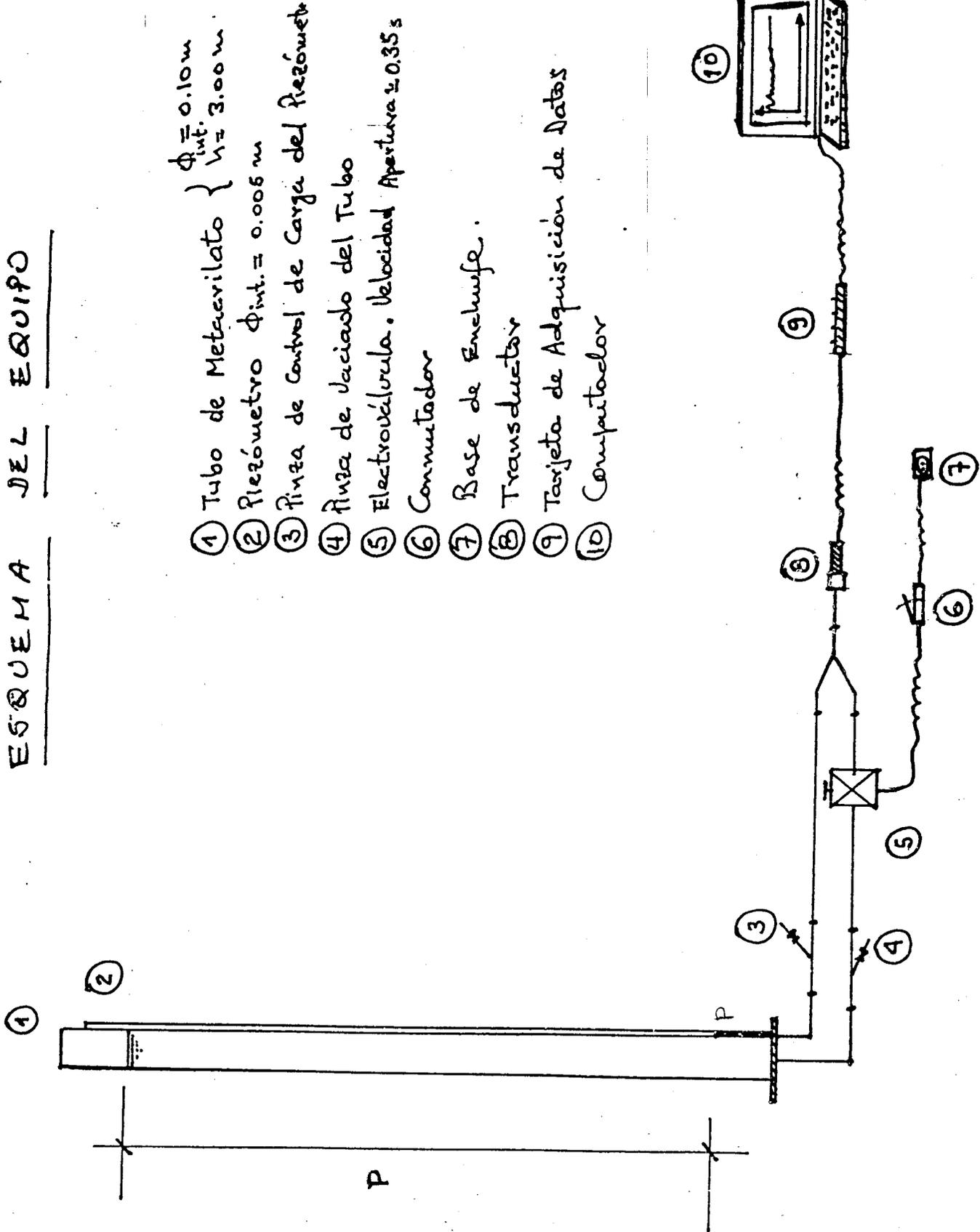
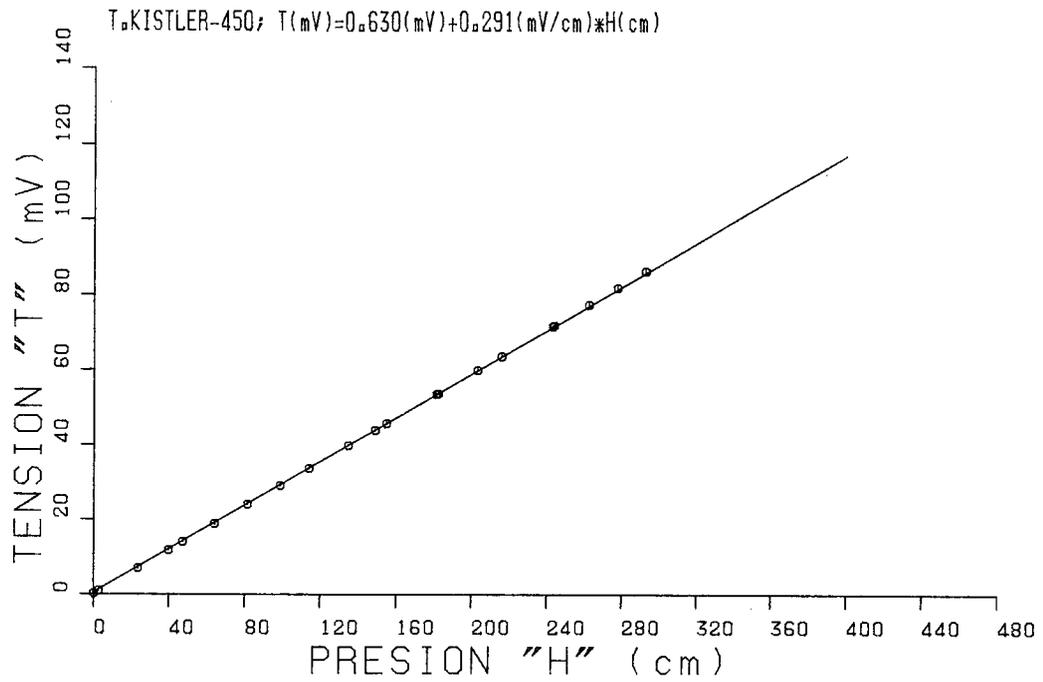
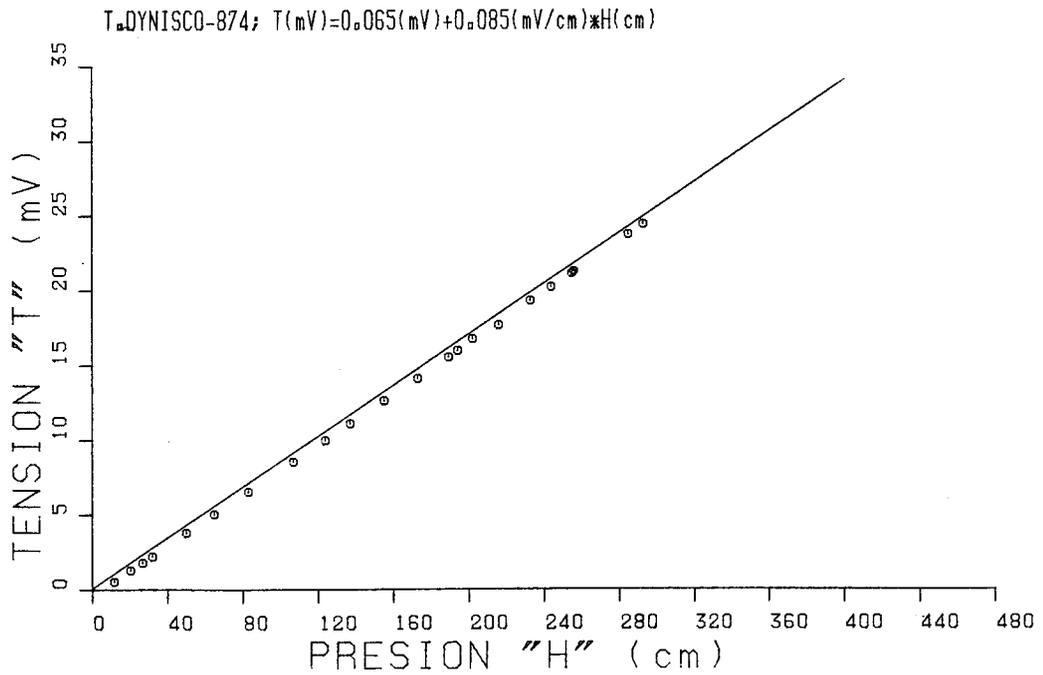


FIGURA N° 2



**FIGURA No. 3.1: Curva de Calibración Estática
Transductor Suizo Kistler**



**FIGURA No. 3.2: Curva de Calibración Estática
Transductor Americano Dynisco**

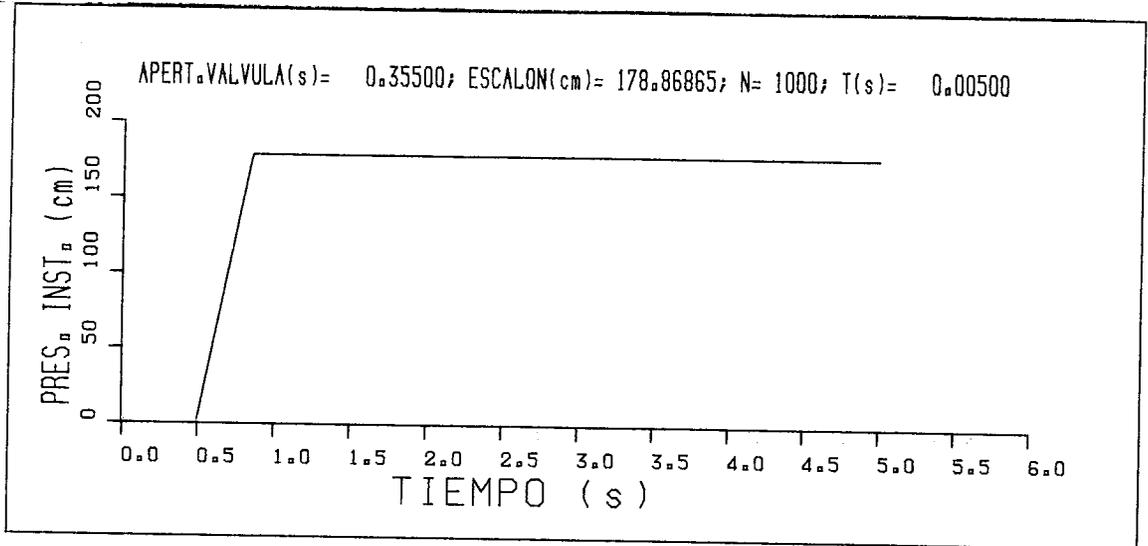


FIGURA No.4: Función Tipo Rampa

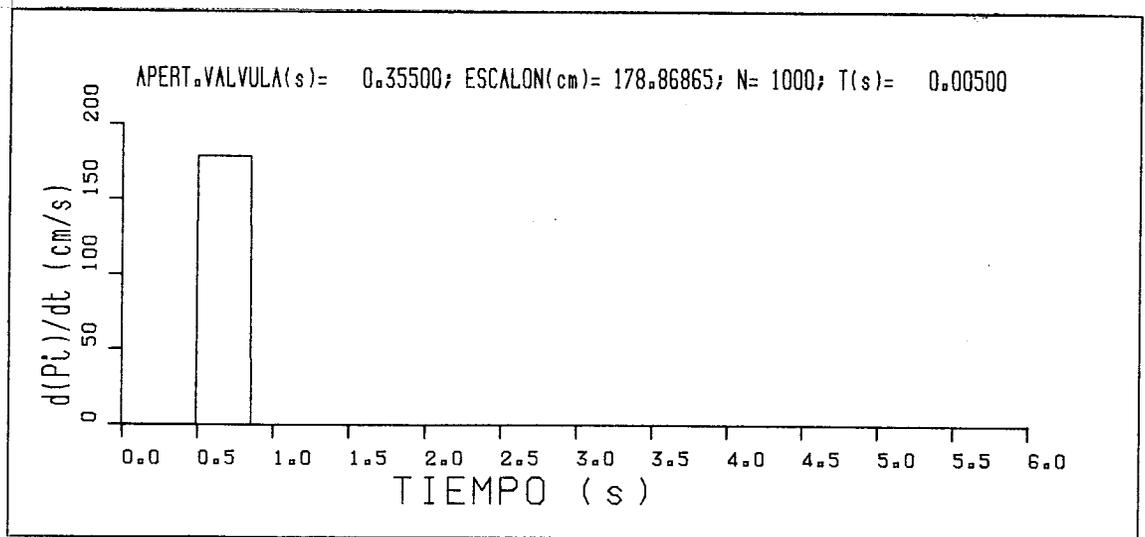


FIGURA No.5: Derivada de la Función Tipo Rampa

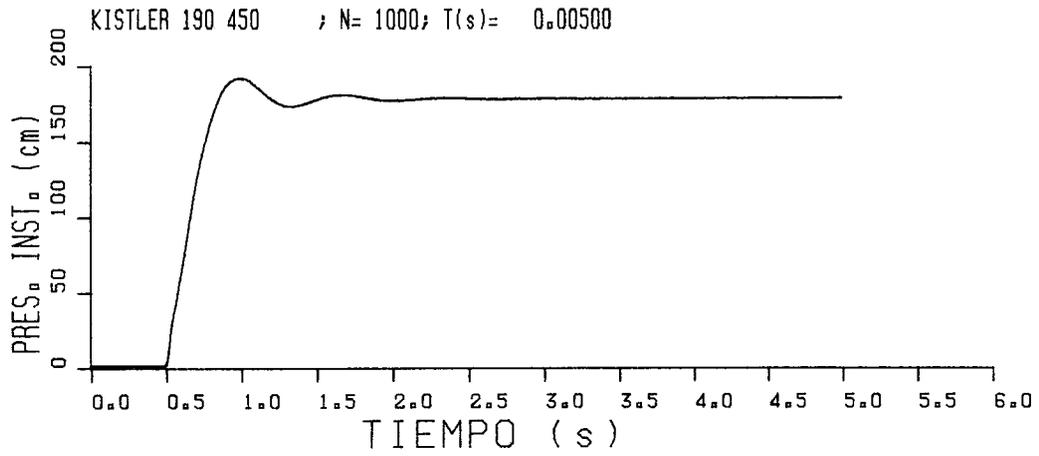


FIGURA No.6: Respuesta del Transductor

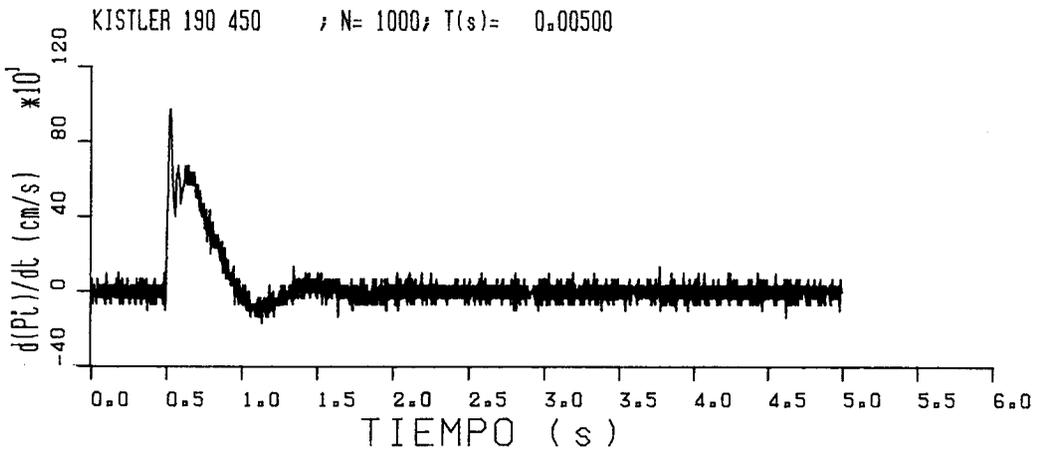


FIGURA No.7: Derivada de la Respuesta del Transductor

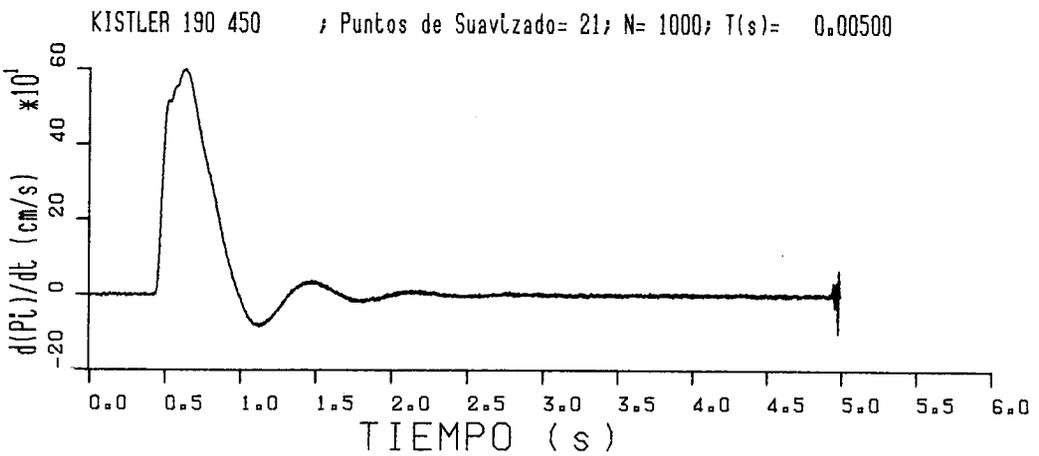


FIGURA No.8: Suavizado de la Respuesta del Transductor

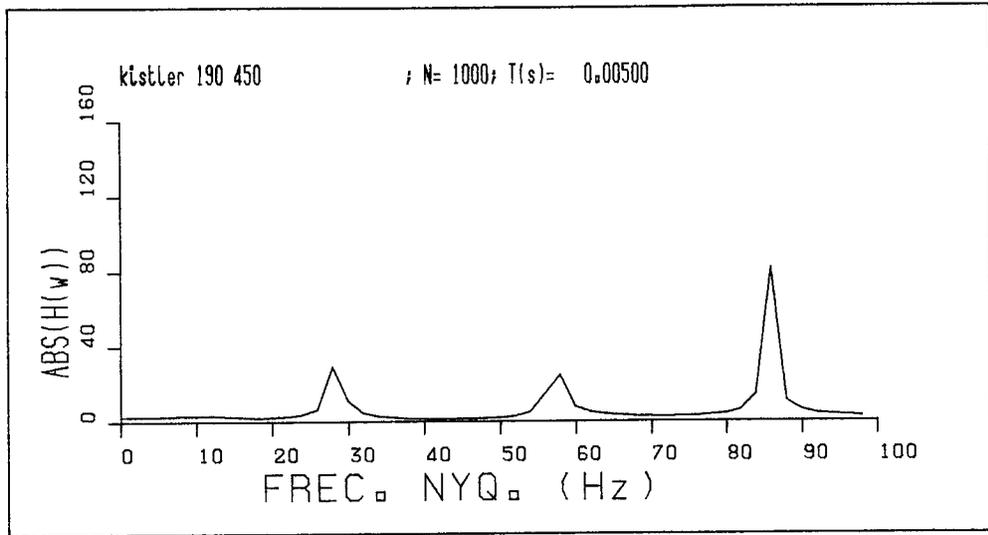


FIGURA No.9 Función de Transferencia
Frecuencia de Nyquist 100Hz.

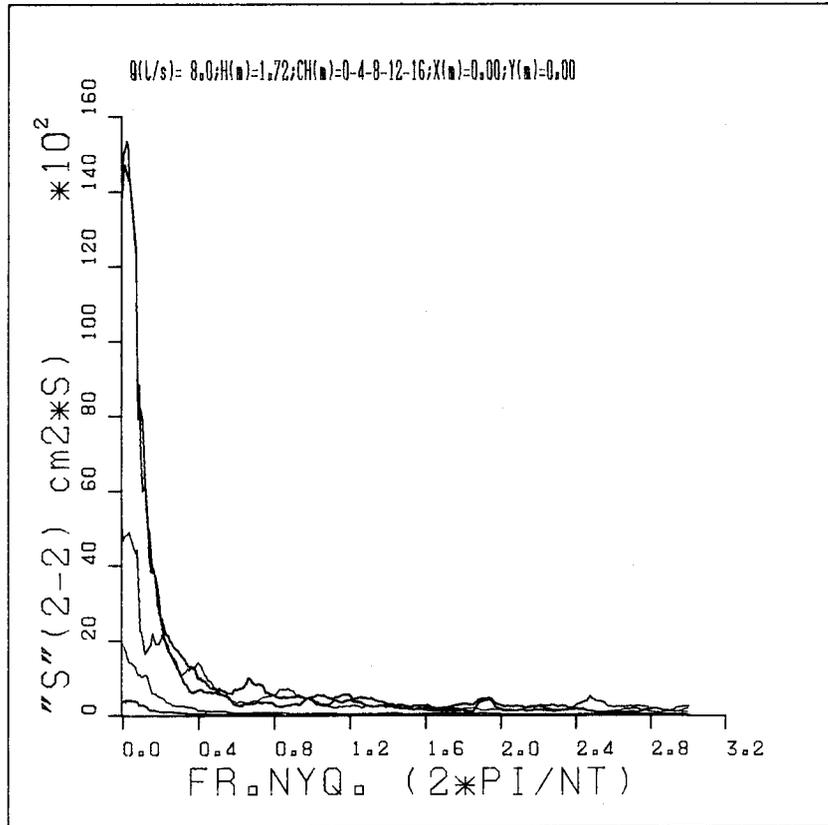


FIGURA No.10: Densidades Espectrales

BIBLIOGRAFIA

CASTILLO ELSITDIÉ LUIS GERARDO

Discusión sobre el Análisis Multiespectral con el Método Convencional

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona

Universidad Politécnica de Cataluña — 1989

CASTILLO ELSITDIÉ LUIS GERARDO.

Determinación de las Densidades Espectrales de las Fluctuaciones

Macroturbulentas con el Método del Periodograma

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona

Universidad Politécnica de Cataluña — 1988

CASTILLO ELSITDIÉ LUIS GERARDO.

Disipadores de Energía Hidráulica

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona

Universidad Politécnica de Cataluña — 1987

CASTILLO ELSITDIÉ LUIS GERARDO.

Diseño de Estructuras Disipadoras de Energía por Resalto Hidráulico

Revista Científica de la Facultad de Ingeniería — II Época

Universidad Central del Ecuador — 1985

KAY—MARPLE

Spectrum Analysis, a modern perspective.

IEEE Trans. Ac. Speech sp-31; 56-65; 1981

KOOPMANS, L.H.

The Spectral Analysis of time series.

Academic, 1974

OPPENHEIM—SCHAFFER

Digital Signal Processing

Prentice Hall, 1975

TRETTNER, S.A.

Introduction to Discrete-Time Signal Processing

John Wiley, 1976