



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA 28

110

CAMARAS DE OSCILACION, MEDIDAS  
EXPERIMENTALES Y SOLUCIONES NUMERICAS.

T E S I S

Que para obtener el Título de

I N G E N I E R O C I V I L

P r e s e n t a

LUIS FRANCISCO LEON VIZCAINO



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## I N D I C E

	Página
1.) INTRODUCCION	1
2.) TEORIA DE CAMARAS DE OSCILACION	4
2.1) Cámara de Oscilación Simple	5
2.2) Cámara de Oscilación Estrangulada	10
2.3) Cámara de Oscilación Diferencial	13
3.) DESCRIPCION DE LOS POZOS UTILIZADOS	17
3.1) Embalse	20
3.2) Conducción	24
3.3) Cámaras de Oscilación	27
3.4) Depósito de Aforo	29
4.) RESULTADOS EXPERIMENTALES	32
4.1) Proceso Experimental	34
4.2) Resultados	37
5.) RESULTADOS DE LOS METODOS NUMERICOS	50
5.1) Descripción de los métodos numéricos utilizados.	51
5.2) Resultados comparados con los experi- mentales.	56
6.) CONCLUSIONES	71
6.A) Apéndice (Listado de Programas)	75

## NOTACION UTILIZADA EN EL TRABAJO

- $A_o$  - Area del orificio.  
 $A_s$  - Area de la cámara.  
 $A_t$  - Area de la conducción o galería.  
 $a_x$  - Aceleración en la componente horizontal.  
 $B$  - Constante de pérdidas totales que toma en cuenta la variación de fricción.  
 $C_{di}$  - Coeficiente de descarga.  
 $D$  - Diámetro de la conducción.  
 $\Delta t$  - Incremento de tiempo.  
 $f$  - Coeficiente de fricción de Darcy.  
 $F_i$  - Fuerza subíndice (i).  
 $\gamma$  - Peso específico del flujo (en este caso agua).  
 $g$  - Aceleración de la acción de la gravedad.  
 $h_{cs}$  - Pérdida por cambio de sección.  
 $h_f$  - Pérdida por fricción.  
 $h_i$  - Pérdida por entrada a la conducción.  
 $h_{te}$  - Pérdida por cambio de dirección.  
 $h_v$  - Carga de velocidad.  
 $H$  - Carga total en el embalse.  
 $L$  - Longitud de la tubería.  
 $m$  - Masa.  
 $n$  - Coeficiente de Manning.  
 $P_m$  - Perimetro mojado.  
 $Q$  - Gasto en la conducción.  
 $Q_s$  - Gasto en la cámara de oscilación.  
 $Q_{tp}$  - Gasto de salida.  
 $R_h$  - Radio hidráulico.  
 $s_f$  - Pendiente de fricción.  
 $\tau_o$  - Esfuerzo cortante en la tubería.

## Continuación de la notación utilizada:

- V - Velocidad en la tubería.
- W - Peso del volumen del líquido en la tubería.
- $W_x$  - Componente horizontal del peso W.
- $W_y$  - Componente vertical del peso W.
- x - Distancia parcial horizontal.
- z - Variación del nivel del líquido en la cámara.
- $z_0$  - Pérdidas totales desde el embalse a la sección del pozo.

## LOCALIZACION DE FIGURAS, TABLAS, PLANOS Y GRAFICAS

No. de Figura	Nombre de figura	Página
CAPITULO 2		
Fig. 2.1	Tipos de cámaras de Oscilación.	6
Fig. 2.1.1	Cámara de Oscilación Simple.	7
Fig. 2.2.1	Cámara de Oscilación Estrangulada.	11
Fig. 2.3.1	Cámara de Oscilación Diferencial.	14
CAPITULO 3		
Plano 3.1	Ubicación de la Facultad de Ingeniería.	18
Plano 3.2	Ubicación del modelo de Pozos de Oscilación, en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería.	19
Plano 3.3	Modelo de Pozos de Oscilación.	21
Fig. 3.1.1	Vertedor de carga constante del modelo.	22
Fig. 3.2.1	Geometría de la entrada a la conducción.	25
Fig. 3.2.2	Análisis de pérdidas de energía.	26
Fig. 3.3.1	Cámaras de Oscilación del modelo.	28
Gráfica 3.4.1.g	Relación Experimental de carga contra gastos.	30
CAPITULO 4		
Fig. 4.1.1	Diagrama de bloques del proceso experimental.	35
Tabla 4.2.1	Comparación de valores experimentales del modelo y teóricos.	38
Tabla 4.2.2	Forma utilizada para la captura de las Oscilaciones experimentales.	39
Tabla 4.2.3	Longitudes del vector prueba.	40
Fig. de 4.2.4 a la 4.2.22	Oscilaciones experimentales para distintas condiciones de carga del embalse.	41

No. de Figura	Nombre de figura	Página
Fig. 4.2.24 y 4.2.25	Comparación de oscilaciones en el mismo pozo.	46
Gráfica 4.2.26.g	Relación de los primeros máximos y mínimos contra $z_0$ experimental.	47
Fig. 4.2.27 y 4.2.28	Oscilaciones experimentales con las mismas condiciones en distintos pozos.	48
Fig. 4.2.29 y 4.2.30	Oscilaciones experimentales con la misma $z_0$ y distinta carga en el mismo pozo de oscilación.	49
 CAPITULO 5		
Tabla 5.2.1	Valores del primer máximo y mínimo, a partir del análisis normalizado de Calame y Gaden.	57
Fig. de 5.2.2 a la 5.2.4	Comparación de valores normalizados contra resultados teóricos de los métodos de Scimemi y Runge-Kutta, variando el incremento de tiempo.	59
Tabla 5.2.5	Coefficientes de pérdidas para las distintas cámaras de oscilación.	62
Fig. de 5.2.6 a la 5.2.10	Resultados de Scimemi contra medidos en la cámara estrangulada.	64
Fig. de 5.2.11 a la 5.2.15	Resultados de Scimemi contra medidos en la cámara simple.	65
Fig. de 5.2.16 a la 5.2.20	Resultados de Runge-Kutta contra los medidos en la cámara estrangulada.	66
Fig. de 5.2.21 a la 5.2.25	Resultados de Runge-Kutta contra los medidos en la cámara simple.	67

No. de Figura	Nombre de figura	Página
Fig. de 5.2.26 a la 5.2.31	Comparación de los resultados de ambos métodos (Scimemi y Runge-Kutta) contra valores experimentales.	68
Tabla 5.2.32	Resultados numéricos y porcentajes de diferencia (valores MAXIMOS).	69
Tabla 5.2.33	Resultados numéricos y porcentajes de diferencia (valores MINIMOS).	70
CAPITULO 6 (6.A Apéndice)		
Prog. 6.1	Programa "CARGA" para la captura e interpolación de datos medidos.	76
Prog. 6.2	Programa "GRAFIC" para graficar los resultados.	77
Prog. 6.3	Programa "SCIMEM" para cálculo del método de Scimemi.	79
Prog. 6.4	Programa "RUNKUT" para cálculo del método de Runge-Kutta de 3er. Orden.	78



# 1

## □ INTRODUCCION

Una cámara de oscilación se puede definir como un pozo piezométrico de sección amplia, de forma cualquiera, conectado en su parte inferior a una galería de conducción, su objeto es disminuir los efectos del golpe de ariete, que se presenta ante cualquier maniobra, efectuada ésta en la salida de la conducción.

Una cámara de oscilación es frecuentemente usada en centrales de potencia y de bombeo, para controlar las fluctuaciones de presión debidas a cambios rápidos del flujo, este amortiguamiento se puede obtener en forma parcial por otros elementos como válvulas de alivio, de presión en turbinas o deflectores de chorro en ruedas Pelton. Estos dispositivos disminuyen el tiempo de cierre y son un alivio para la tubería de presión; pero no sustituyen a la Cámara de Oscilación en conducciones largas. La selección se basará en un balance económico entre el ahorro en la C. de O. y el gasto adicional para refuerzo de la tubería a presión.

En el presente trabajo se enfocará experimentalmente el funcionamiento de estas estructuras de oscilación, comparando los resultados obtenidos experimentalmente con los que se obtienen de los cálculos de distintos métodos numéricos.

En el segundo capítulo de este trabajo se presenta la teoría de las cámaras de oscilación, los diferentes tipos de cámaras, así como la derivación de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento dinámico de las oscilaciones de masa.

En el tercer capítulo se describen las instalaciones utilizadas durante la experimentación.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados experimentales, así como una breve descripción del procedimiento que se siguió para obtener estos datos.

El quinto capítulo contiene los resultados de los métodos numéricos utilizados para comparar las oscilaciones experimentales. Se presenta también un análisis teórico de los métodos numéricos, mediante una normalización de las ecuaciones que rigen el fenómeno. Los métodos numéricos de solución utilizados son los conocidos como método de Scimemi, trabajando con las ecuaciones en diferencias finitas; y el método de Runge-Kutta de 3er. orden, método de un solo paso donde no es necesario valuar ninguna derivada.

En el sexto capítulo se presentan las conclusiones obtenidas del presente estudio. Se discutirá en dicho capítulo el efecto que se presenta por la suposición de despreciar la masa en el pozo. Así mismo se anexan en un subcapítulo los programas, en forma de - listado en lenguaje BASIC, utilizados para la elaboración de este trabajo.

## 2 □ TEORIA DE CAMARAS DE OSCILACION

- 2.1) CAMARA DE OSCILACION SIMPLE
- 2.2) CAMARA DE OSCILACION ESTRANGULADA
- 2.3) CAMARA DE OSCILACION DIFERENCIAL

### 2.) TEORIA DE CAMARAS DE OSCILACION

En la mayoría de las maniobras de cierre o apertura, se generan ondas de presión que van desde la válvula hasta la cámara de oscilación, donde son reflejadas. Estas ondas de presión son tan rápidas que no afectan al nivel de la cámara, por lo que la oscilación en la misma se considera como fenómeno independiente.

Ante un cierre, el agua que fluye en la conducción es derivada hacia la cámara y el nivel en la misma sube; esta sobre-elevación genera un gradiente que frena el agua en la conducción,-- hasta invertir el sentido del flujo. El nivel en la cámara baja y el sentido del flujo vuelve a invertirse. Estas oscilaciones son amortiguadas por efectos de fricción hasta establecerse un nuevo nivel de equilibrio.

Al mismo tiempo la cámara de oscilación actúa como un almacenamiento que provee de agua ante una maniobra de apertura brusca.

Si no se instala una cámara de oscilación es necesario diseñar la conducción para soportar las sobrepresiones del golpe de ariete.

Resumiendo así las funciones principales de la cámara de oscilación, ya que el objetivo principal de este trabajo es comprobar experimentalmente los diferentes métodos numéricos para la solución del fenómeno transitorio en cuestión.

En el presente capítulo se derivan las ecuaciones fundamentales que rigen el transitorio en un sistema con cámara de oscilación; evitando al mismo tiempo deducciones muy detalladas.

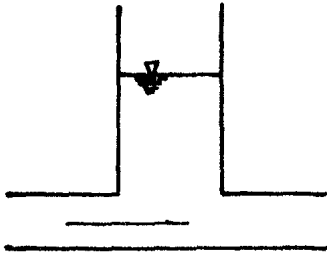
Las cámaras de oscilación pueden ser de distintos tipos en función a la capacidad que se requiera para disminuir los efectos del golpe de ariete, sobre todo en condiciones de conducción larga.

En la figura (2.1) se muestran los diferentes tipos de cámaras de oscilación y a continuación una breve explicación de cada una de ellas así como la derivación de sus ecuaciones.

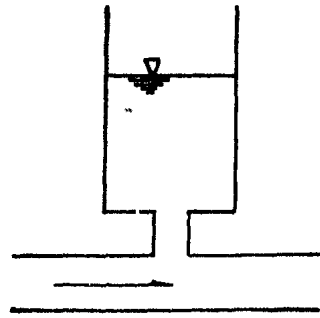
## 2.1) CAMARA DE OSCILACION SIMPLE.

La cámara cilíndrica de oscilación simple (C.O.S.) es solamente un tubo vertical conectado a la tubería de presión.

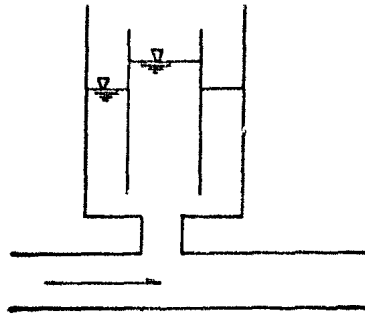
En la figura 2.1.1 se muestra un sistema típico de una C.O.S., así como la notación usada en las ecuaciones dinámica y de continuidad.



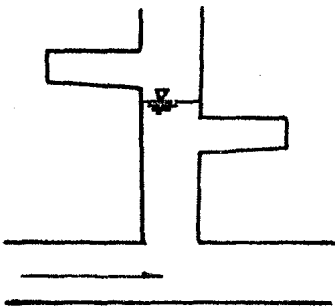
2.1.a. Cilíndrica Simple



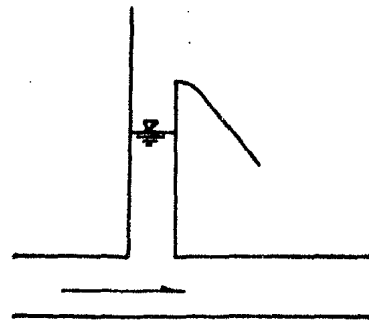
2.1.b. Estrangulada



2.1.c. Diferencial 6  
tipo Johnson



2.1.d. Con expansiones  
laterales

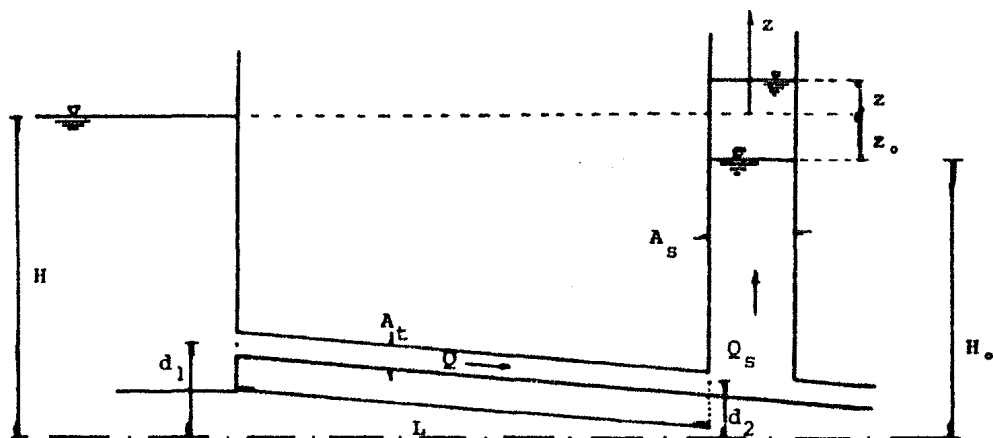


2.1.e. Cámara Vertedora

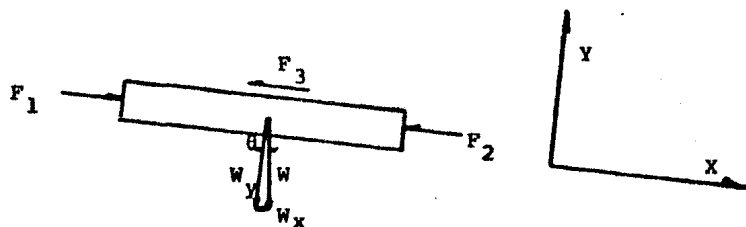
Figura 2.1. Tipos de Cámaras de Oscilación

Con la finalidad de simplificar la obtención de las ecuaciones que rigen el fenómeno, se hacen las siguientes suposiciones:

- 1.-) El líquido se considera incompresible y el material del conducto rígido.
- 2.-) El efecto se debe exclusivamente a la conducción ante un cierre instantáneo.
- 3.-) La inercia del líquido en la cámara es despreciable en comparación con la de la galería.
- 4.-) Cualquier fórmula para valuar las pérdidas por fricción es válida durante el transitorio.



(2.1.1.a.)



(2.1.1.b.)

Figura 2.1.1 Cámara de Oscilación Simple

• Ecuación Dinámica

En estas condiciones se efectuará el análisis, aplicando la ecuación de cantidad de movimiento, en el diagrama de cuerpo libre de la figura 2.1.1.b., obteniendo:

$$F_1 = \gamma(H - d_1)A_t \dots\dots\dots (a)$$

$$F_2 = \gamma(h - d_2)A_t \dots\dots\dots (b)$$

$$F_3 = \tau_0 P_m L \dots\dots\dots (c)$$

La fuerza  $F_3$  es la fuerza de fricción en la pared de la tubería.

En cuanto a los pesos, de la misma figura:

$$W = \gamma A_t L$$

Analizando la componente del peso en el eje "x"

$$\frac{W}{W_x} = \frac{L}{(d_1 - d_2)}$$

Por lo tanto, sustituyendo  $W$  y despejando  $W_x$

$$W_x = \frac{(d_1 - d_2)}{L} W = \gamma A_t (d_1 - d_2) \dots\dots\dots (d)$$

Por otro lado, aplicando la segunda Ley de Newton:

$$\Sigma F_x = m a_x \dots\dots\dots (2.1.1)$$

Tomando del segundo miembro la aceleración:

$$\vec{a} = \frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$$

Al ser la inercia del líquido despreciable; por la suposición 1:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial x} \frac{dx}{dt} + 0$$

Sustituyendo en la ecuación (2.1.1) las fuerzas expresadas en (a), (b), (c), (d) y la aceleración obtenida, tenemos simplificando:



$$H - h - \frac{\tau_0 L}{\gamma R_h} - \frac{L}{g} \frac{Dv}{Dt} = 0 \dots\dots\dots (2.1.2)$$

En la ecuación anterior, el término  $\tau_0$  es el cortante en la tubería y vale;  $\tau_0 = \gamma R_h s_f$  ; las pérdidas en el sistema establecido es la combinación de pérdidas de fricción  $h_f = s_f L$  , más las pérdidas por entrada en la conducción  $h_i = k_i V^2 / 2g$ . Las de fricción calculadas por cualquier fórmula para flujo uniforme, basándonos en la hipótesis de que son válidas durante el transitorio.

En resumen las pérdidas establecido el sistema son:

$$z_0 = \frac{fL}{D} \frac{V^2}{2g} + k_i \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots (2.1.3)$$

Regresando a la ecuación (2.1.2), como  $H - h = -z$ , y sustituyendo en ésta las ecuaciones arriba descritas tenemos:

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} = -z - z_0 \dots\dots\dots (2.1.4)$$

Como se observa de la expresión (2.1.3) las pérdidas  $z_0$  se pueden manejar como un factor de pérdidas por la velocidad al cuadrado, finalmente se puede expresar como:

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} = -z \pm F v^2 \dots\dots\dots (2.1.5)$$

Esta es la ecuación dinámica del transitorio, donde los signos +/- indican el sentido del flujo en movimiento, esto es; (+) si el flujo se dirige del vaso al pozo, (-) si va del pozo al vaso. La ecuación (2.1.5) se tratará más adelante al resolverla por el método numérico a utilizar.

\* Ecuación de Continuidad

La ecuación de continuidad se basa en el principio de conservación de masa:

$$Q = Q_s + Q_{tp}$$

También:

$$Q_s = A_s \frac{dz}{dt}$$

Por otro lado, al tratarse de cierre instantáneo, tenemos:

$$Q_{tp} = 0$$

Finalmente la ecuación de continuidad que se manejará es:

$$Q = Q_s = A_s \frac{dz}{dt} \dots \dots \dots (2.1.6)$$

2.2) CAMARA DE OSCILACION ESTRANGULADA

Este tipo de cámara presenta un orificio entre ésta y el tunel de conducción, por lo que recibe el nombre de Cámara de Oscilación estrangulada (C.O.E.). El orificio restringe el paso del flujo hacia dentro o hacia afuera de la cámara, al mismo tiempo - que la amplitud de las oscilaciones del nivel del líquido en la cámara es menor que en una COS equivalente; la aceleración o desaceleración en el tunel es más rápida comparándola con un sistema con cámara simple.

En la figura 2.2.1. se muestra un sistema de una COE, con las notaciones usadas en las ecuaciones dinámica y de continuidad. Debido al efecto retractor del orificio, el flujo de entrada o salida de la cámara es pequeño comparado con el de una COS, por lo que el tamaño de la cámara puede ser reducido.

Las ecuaciones básicas para este tipo de cámara son:

\* Ecuación Dinámica

Analizando, de la figura 2.2.1, las fuerzas actuantes sobre el líquido en la conducción:

$$F_1 = \gamma A_t (H - h_i - h_v)$$

$$F_2 = \gamma A_t (H + z + h_{te} + h_{cs})$$

$$F_3 = \gamma A_t (h_f)$$

Donde H es la carga estática total;  $h_v$  es la carga de velocidad a la entrada;  $h_i$  es la pérdida por entrada al conducto;  $h_{cs}$  es la pérdida por cambio de sección;  $h_{te}$  pérdida por cambio de dirección del flujo.

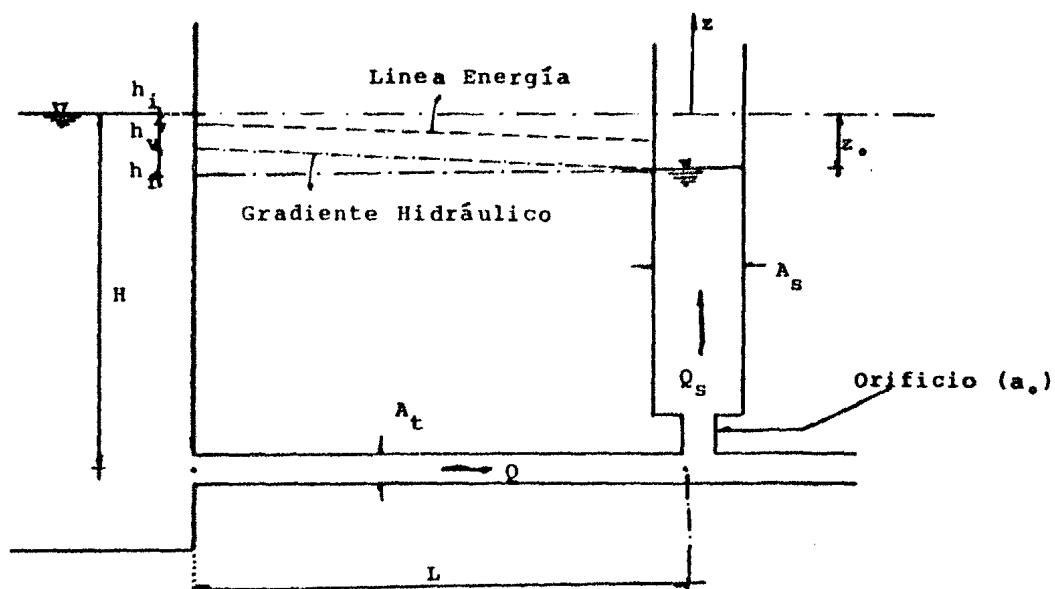


Figura 2.2.1 Cámara de oscilación estrangulada.

Sustituyendo estas ecuaciones en la segunda ley de Newton obtenemos:

$$\frac{\gamma L}{g} \frac{dQ}{dt} = \gamma A_t (-z + h_i - h_v + h_{te} + h_{cs} + h_f) \dots (2.2.1)$$

Las pérdidas  $h_{cs}, h_{te}, h_i$  y  $h_f$  se manejarán en un solo término debido a que cambian tanto de signo como de magnitud dependiendo del sentido del flujo, es decir cuando la dirección es del embalse al pozo se tomará el signo superior y en sentido inverso el signo inferior.

De condiciones establecidas tenemos que  $z_0$  es:

$$z_0 = h_i + h_v + h_f$$

En este caso  $h_f$  se define como las pérdidas de fricción calculadas por Darcy. Finalmente las ecuaciones dinámicas serán:

-Para el sentido del flujo del embalse al pozo:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{g A_t}{L} (-z - h_i - h_v - h_{te} - h_{cs} - h_f) \dots (2.2.2)$$

En este caso  $h_{cs}$  será pérdida por ampliación brusca.

-Para el sentido del flujo del pozo al embalse:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{g A_t}{L} (-z + h_i - h_v + h_{te} + h_{cs} + h_f) \dots (2.2.3)$$

Para esta dirección  $h_{cs}$  corresponderá a una reducción.

El manejo e intercambio de los valores de cargas se hará directamente en los programas, explicándose dentro del capítulo correspondiente.

Las ecuaciones (2.2.2) y (2.2.3) representan la forma dinámica del transitorio en un sistema con cámara estrangulada, su utilización es función del método numérico de solución por que se opte.

\* Ecuación de Continuidad

De la misma forma que para cámara simple, al tratarse de un cierre brusco e instantáneo,  $Q_{tp} = 0$  , por lo tanto:

$$Q_s = A_s \frac{dz}{dt} \dots \dots \dots (2.2.4)$$

2.3) CAMARA DE OSCILACION DIFERENCIAL

En una cámara de oscilación diferencial (C.O.D.) como la que se muestra en la figura 2.3.1, el tubo central o "riser", actúa como una COS, mientras que la cámara exterior funciona de la misma manera que una COE. En este arreglo, el desarrollo de la carga de aceleración o desaceleración, en la conducción es menor que en una COE pero mayor que en un sistema COS. Debido a esto, el área de la cámara exterior puede reducirse en comparación con el área equivalente de una COS, sin afectar la capacidad de regulación.

Se supone que el tiempo total del transitorio es generalmente grande, comparado con el del fenómeno del golpe de ariete, por lo que no se consideran los efectos de éste en el análisis de la cámara de oscilación. A continuación se describirán las ecuaciones fundamentales para este tipo de sistema.

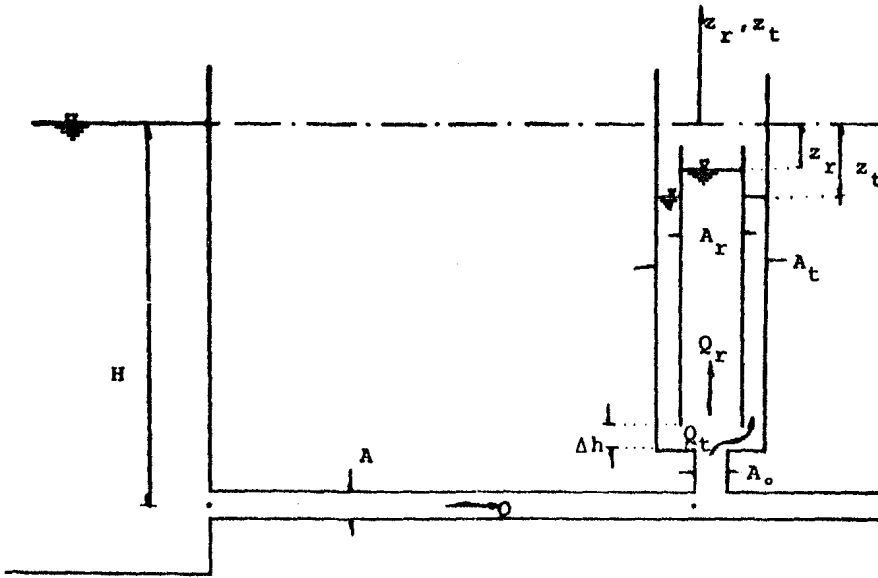


Figura 2.3.1 Cámara de Oscilación Diferencial

\* Ecuación Dinámica

Puede escribirse de la siguiente forma:

$$\frac{L}{A_t g} \frac{dQ}{dt} = -z_r - \frac{c}{A_t} Q |Q| \dots \dots \dots (2.3.1)$$

Las ecuaciones para la descarga de la cámara exterior y el tubo central están condicionadas como sigue:

- Si  $z_r > z_t$  y el vertedor (parte superior del tubo central) no está funcionando :

$$F \frac{dz_t}{dt} = C_{d1} A_o \sqrt{2g(z_r - z_t)} \dots \dots \dots (2.3.2)$$

Donde  $C_{d_1}$  es el coeficiente de descarga del tubo central hacia la cámara exterior y  $A_0$  es el área del orificio de comunicación.

- Si  $z_r > z_t$  y el vertedor está funcionando, entonces:

$$F \frac{dz_t}{dt} = C_{d_1} A_0 \sqrt{2g(z_r - z_t)} + Q_r \dots (2.3.3)$$

Donde  $Q_r$  es la descarga vertida del tubo central a la cámara exterior y está dada por la siguiente fórmula:

$$Q_r = \frac{2}{3} C_{d_v} \sqrt{2g} \pi d_v (z_r - z_v)^{3/2} \dots (2.3.4)$$

- Si  $z_t > z_r$  y el vertedor no está funcionando:

$$-F \frac{dz_t}{dt} = C_d A_0 \sqrt{2g(z_t - z_r)} \dots (2.3.5)$$

Donde  $C_d$  es el coeficiente de descarga de la cámara exterior hacia el tubo central.

\* Si  $z_t > z_r$  y el vertedor está funcionando:

$$-F \frac{dz_t}{dt} = C_d A_0 \sqrt{2g(z_t - z_r)} + Q_r \dots (2.3.6)$$

Donde  $Q_r$  es la descarga vertida, ahora de la cámara exterior al tubo central y está dada por:

$$Q_r = \frac{2}{3} C_{d_v} \sqrt{2g} \pi d_v (z_t - z_v)^{3/2} \dots (2.3.7)$$

Si el coeficiente de descarga del vertedor no se conoce, se puede suponer constante e igual a 0.5 para el flujo en cualquier dirección (de la cámara exterior al tubo central o viceversa).

Además, si  $z_r > z_t$  para cierre brusco:

$$A_r \frac{dz_r}{dt} + C_{d_1} A_0 \sqrt{2g(z_r - z_t)} + Q_r = Q_t \dots (2.3.8)$$

Considerando de la última ecuación, dos alternativas:

- Si  $z_t > z_r$  :

$$Q_t - A_r \frac{dz_r}{dt} + C_d A_o \sqrt{2g(z_t - z_r)} + Q_r = 0 \dots (2.3.9)$$

- Si  $z_r > z_v$  y  $z_r = z_t$  :

$$\frac{dz_r}{dt} = \frac{dz_t}{dt} = \frac{Q}{(F+A_r)} \dots (2.3.10)$$

Entonces, las ecuaciones (2.3.1) a (2.3.10) deben ser resueltas - para determinar las variables desconocidas  $Q, z_r$  y  $z_t$  en función del tiempo.



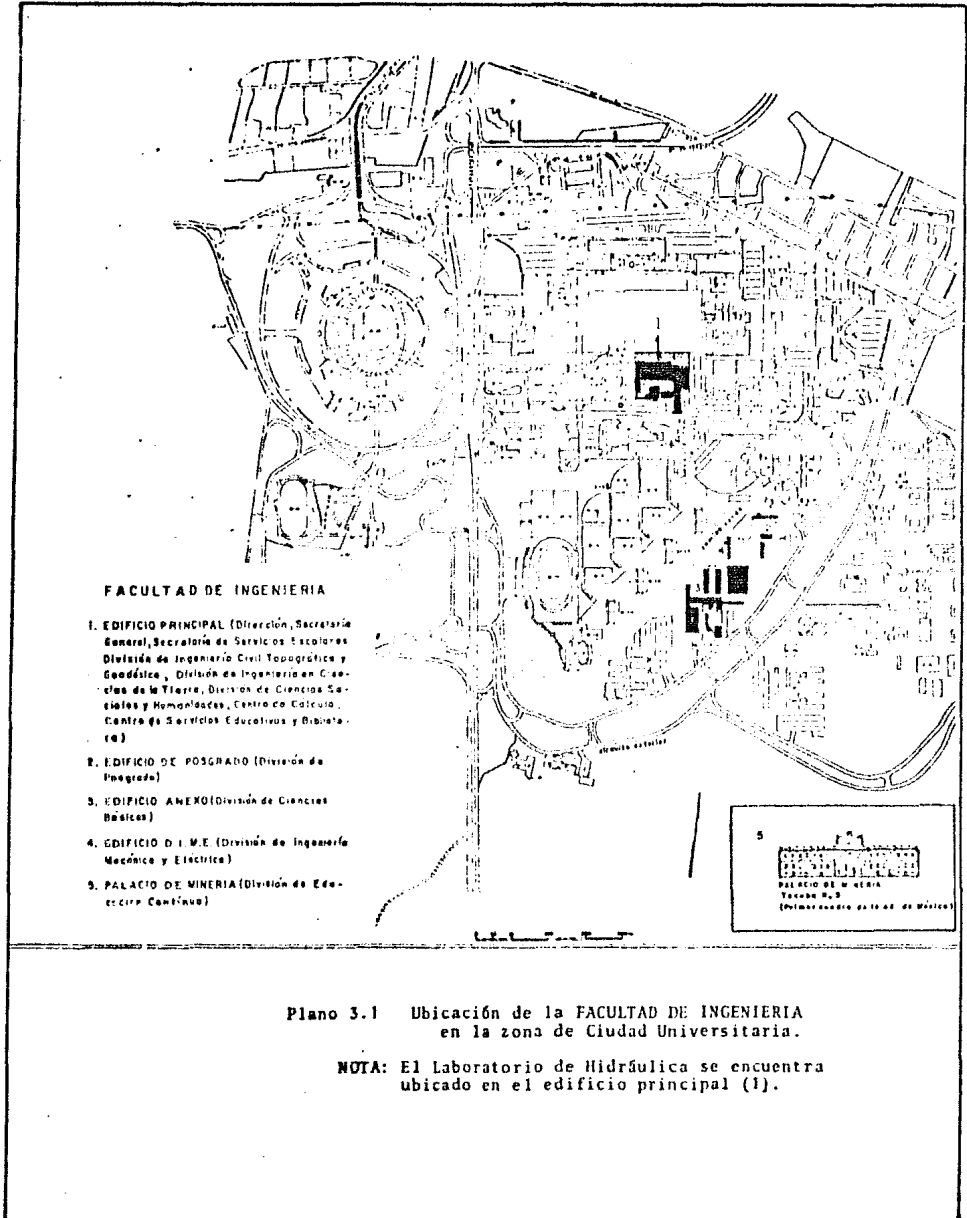
### 3 DESCRIPCION DE LOS POZOS UTILIZADOS

- 3.1) EMBALSE
- 3.2) CONDUCCION
- 3.3) CAMARAS DE OSCILACION
- 3.4) DEPOSITO DE AFORO

#### 3.) DESCRIPCION DE LOS POZOS UTILIZADOS

En el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se construyó un modelo de Cámaras de Oscilación (Ver planos 3.1 y 3.2), con un doble propósito. El primero será la comprobación experimental de distintos métodos numéricos para la solución del fenómeno transitorio y la cual es objeto del presente trabajo. La segunda y como objetivo a corto plazo, será implementar prácticas de apoyo académico para las materias de Hidráulica.

Con este doble objetivo, se construyó el modelo, el cual a continuación se describe en todas sus partes, así como la función y el porqué de estas.



Zona cubierta

EDIFICIO DEL LABORATORIO  
DE MATERIALES

- 1.- CANAL DE REHBOCK
- 2.- MODELO FONDO MOVIL
- 3.- VERTEDEDOR TRIANGULAR
- 4.- CANAL DE OLAS
- 5.- MODELO MARITIMO
- 6.- CANAL DE OLAS II
- 7.- VERTEDEDOR CRESTA RECTA
- 8.- TRANSITO AVENIDAS
- 9.- VERTEDEDOR DE ABANICO
- 10.- ESTACION CLIMATOLOGICA
- 11.- CANAL COLECTOR
- 12.- MODELO HIDROLOGICO
- 13.- POZOS DE OSCILACION
- 14.- MODELO DRENAJE PROFUNDO

ESCALA 1:75  
Cotas en m.

LABORATORIO DE HIDRAULICA	
FACULTAD DE INGENIERIA	
PLANO 3.2.- Distribucion de modelos.	
LEON VICIAGO LUIS F.	UNAM
TESIS: Paises de Oculacion	
	Mayo 84.

El modelo se puede llamar "Pozos de Oscilación" y así subdividirlo en partes, de acuerdo a la secuencia del flujo en el modelo, de la siguiente manera:

- i) Embalse o tanque de carga constante
- ii) Conducción
- iii) Cámaras de Oscilación
- iv) Depósito de aforo

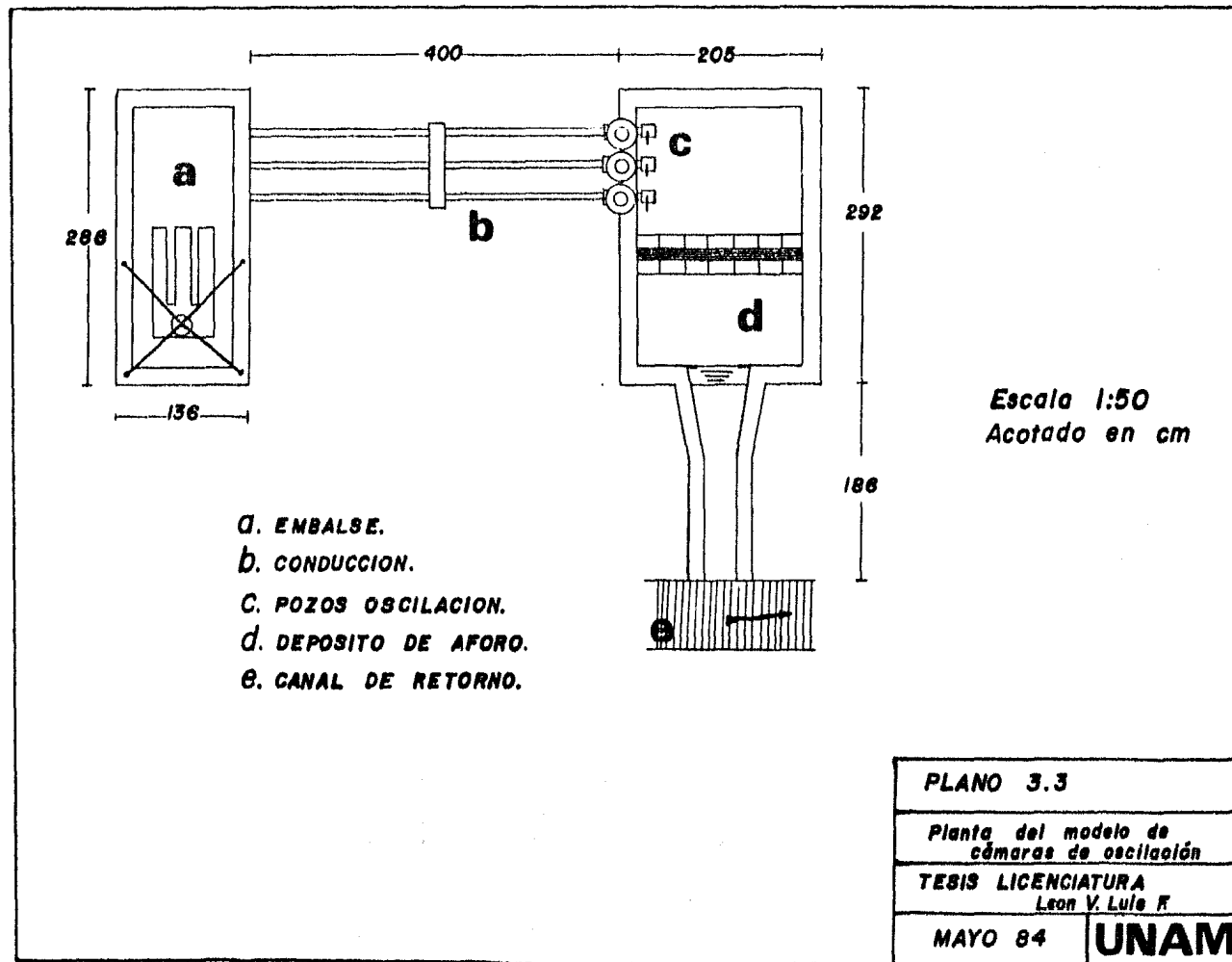
En el plano 3.3 se presenta el modelo de Pozos de Oscilación donde se identifican cada una de sus partes. A continuación se describirá cada sección por separado.

Cabe hacer la aclaración que se denomina modelo, por el hecho de ser instalación experimental, pero no porque simule la escala de algún prototipo, por lo que para su construcción no se tomaron en cuenta las leyes de similitud (geométrica, cinemática o dinámica), sino que se trató como obra hidráulica de dimensiones reducidas e independiente.

### 3.1) EMBALSE

Está simulado por un depósito de 2.70 x 1.20 m con una altura de 1.62m que proporciona una carga neta máxima de 1.14m, pudiendo variar dicha elevación, ya que cuenta con un vertedor de carga constante de altura variable, con una longitud de vertido de 6.73m.

El depósito está alimentado por una tubería de 4" de diámetro conectada al sistema circulatorio del laboratorio, controlando el paso del agua con una válvula de compuerta. La alimentación se considera siempre constante, debido a que proviene del tanque de carga



constante del laboratorio.

Se cuenta dentro del mismo depósito, con un vertedor de carga constante como ya se mencionó, de elevación variable, ver figura - 3.1.1, que nos permitirá desalojar el excedente del flujo y mantener una carga constante, aún cuando: se modifique el gasto en las tuberías o se maniobre un cierre brusco en la salida.

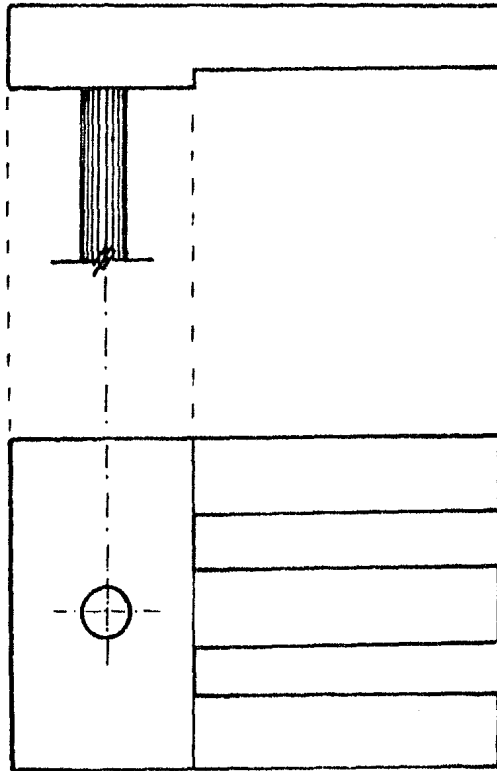


Figura 3.1.1 Vertedor de carga constante del modelo de pozos de oscilación.

Debido a las características del vertedor de carga constante, puede absorber las variaciones del gasto del modelo, durante las maniobras de experimentación, esto es:

Siendo el gasto de un vertedor de cresta recta:

$$Q = c L h_v^{3/2}$$

Donde "c" es el coeficiente de descarga y es función de la geometría y de la contracción de la lámina vertiente y vale, para el sistema MKS:

$$c = 2.952 \mu$$

Donde "μ" según la tabla 7.1 de la referencia 6, se puede calcular con la fórmula de Hamilton-Smith:

$$\mu = 0.616 \left( 1 - \frac{b}{10B} \right)$$

Que para nuestro caso, en toda la periferia del vertedor de carga constante  $b=B$ , por lo que  $\mu=0.554$  y por lo tanto  $c=1.64$ . Con estas consideraciones y como L es grande con valor de  $L=6.73m$ , para cualquier incremento o decremento de gasto en el depósito, hace variar la carga en:

$$h_v = \left( \frac{Q}{11.03} \right)^{2/3}$$

Si hablamos de un gasto máximo en el modelo, de 10 l/s, la carga total en este variará en +/- 1 mm ante una variación total del gasto, es decir, un cierre total brusco. Si tenemos una carga total de 1.14 m, la modificación de carga de 1 mm se puede despreciar ya que no representa ni el 1% de dicha carga.

### 3.2) CONDUCCION

Hablaremos de conducción como la parte del modelo que transporta al flujo desde el embalse hasta las cámaras de oscilación.

La entrada a la conducción produce una pérdida local por efecto de contracción de la vena líquida y la formación de zonas de separación. Su magnitud se expresa como una fracción de la carga de velocidad, inmediatamente después de la entrada, se expresará entonces:

$$h_i = k_i \frac{v^2}{2g} \dots \dots \dots (3.2.1)$$

Donde  $h_i$  será la pérdida de energía por entrada, en m; el coeficiente  $k_i$  depende principalmente de la brusquedad con que se efectúa la contracción del chorro a la entrada.

La entrada elíptica es la que produce el mínimo de pérdidas, ( $k_e$  - variará de 0.04 a 0.10 para tubo circular). En nuestro caso la sección es circular, la ecuación de la elipse de entrada es:

$$\frac{x^2}{(0.5d)^2} + \frac{y^2}{(0.15d)^2} = 1 \dots \dots \dots (3.2.2)$$

La ecuación (3.2.2) se graficó a escala natural en el modelo, tomando el diámetro del tubo como partida de los ejes cartesianos, (ver figura 3.2.1), de ahí se procedió a construir una "tarraja" a escala 1:1, como ayuda para la elaboración física de la entrada.

Se tomará para el cálculo de la pérdida local el valor más desfavorable del coeficiente ( $k_i = 0.10$ ).



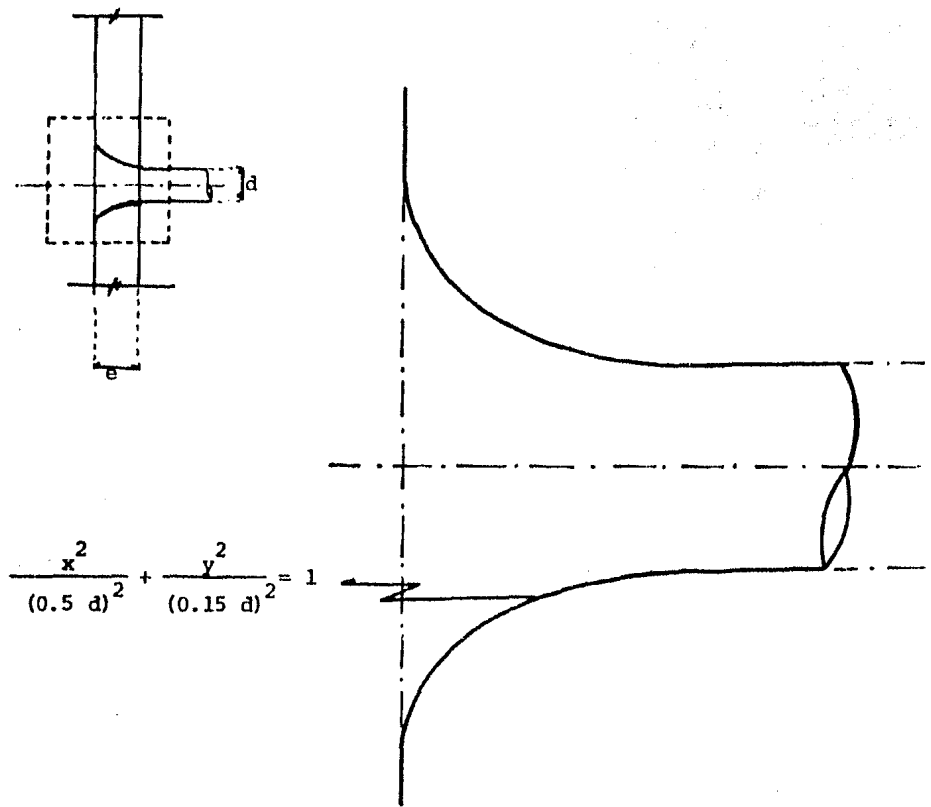


Figura 3.2.1 Geometría de la entrada a la conducción.

La conducción se hará a través de 3 tuberías de cobre de 2 1/2" de diámetro cada una. Como se ve en el plano del modelo, cada tubería conduce independientemente a una cámara de oscilación.

Están reguladas en la salida por válvulas de cierre rápido o brusco; éstas controlarán la experimentación para simular el cierre instantáneo que provoque las oscilaciones en el pozo a tratar.

Trabajando independientemente con la tubería, el flujo circula confinado trabajando a presión. Al estar establecido el flujo, la diferencia entre el nivel del embalse y el nivel estático en la cámara ( $z_o$ ), es la suma de pérdidas desde la entrada hasta la cámara. Estas pérdidas son la suma de fricción y locales, se aplica la ecuación de la energía entre el embalse y la cámara de la siguiente forma:

$$H_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \Sigma h_r \dots \dots \dots (3.2.3)$$

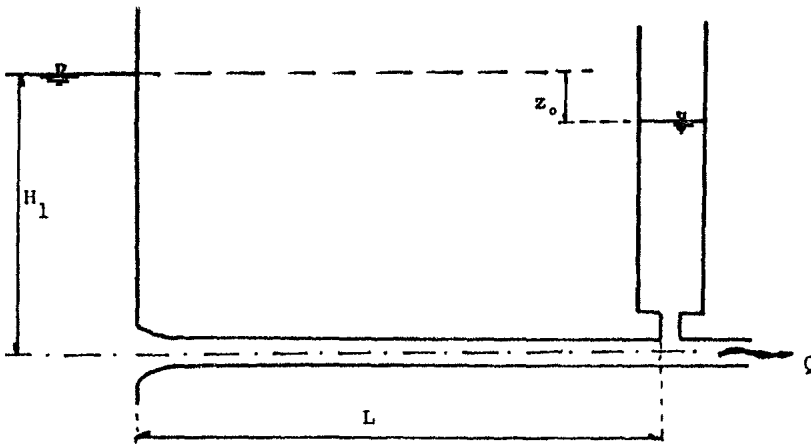


Figura 3.2.2 Análisis de pérdidas de energía.

Por otra parte:

$$z_o = H_1 - \frac{p_2}{\gamma}$$

Y de la ecuación (3.2.3) se puede escribir que:

$$z_o = \frac{V_2^2}{2g} + \Sigma h_r$$

Expresando las pérdidas en función de la carga de velocidad y factorizando, tenemos:

$$z_o = \frac{V^2}{2g} ( 1 + k_i + f \frac{L}{D} ) \dots \dots \dots (3.2.4)$$

En un primer paso se considerará despreciable la variación del coeficiente "f" de fricción, que es función del número de Reynolds y del parámetro de rugosidad relativa, obteniéndose su valor del diagrama universal de Moody (fig. 8.3 de la referencia 6).

En el transcurso del trabajo de experimentación se intentará encontrar la relación que existe entre el coeficiente de fricción y el fenómeno del transitorio, ya que varía tanto la magnitud como la distribución de velocidades. De ser posible se introducirá esta variación dentro del programa del método numérico a utilizar, ya que el propósito de la presente investigación, es analizar los métodos de solución numérica del transitorio y comparar los resultados con las oscilaciones que se presentan en la realidad.

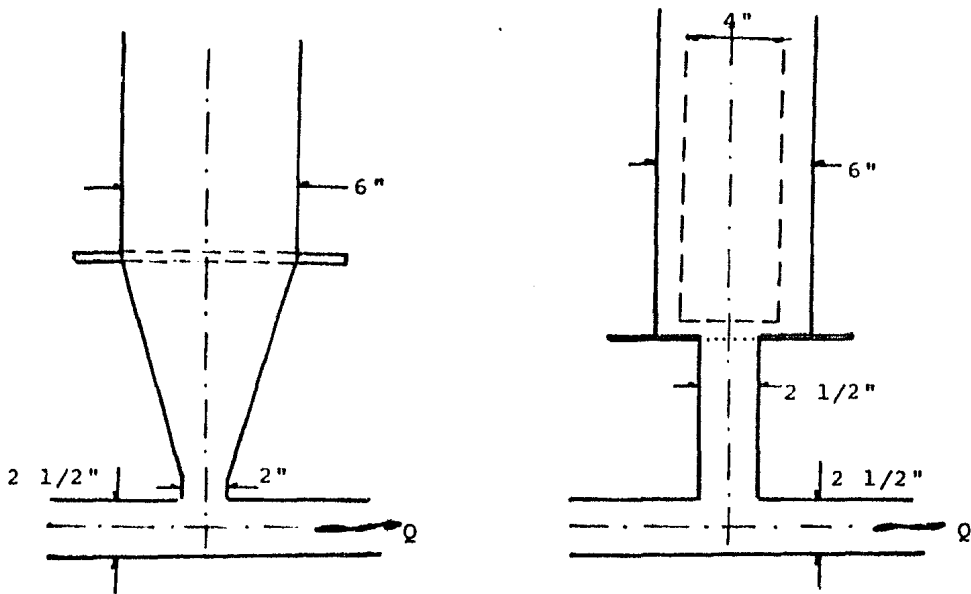
### 3.3) CAMARAS DE OSCILACION

Están simuladas por tubos de lucita transparente y forman según su construcción distintos tipos de pozos de oscilación, así tenemos la posibilidad de reproducir 3 diferentes tipos: simple con transición gradual, cámara estrangulada y diferencial o Johnson. (esta última no se probará dentro de este trabajo dada la dificultad para obtener resultados experimentales).

En el primer caso el cilindro que representa a la cámara de oscilación simple, tiene una transición gradual para poder hacer física-

mente la unión entre la tubería de conducción de  $2\frac{1}{2}$ " de diámetro a la cámara que tiene un diámetro de 6" (ver figura 3.3.1.a).

Para el 2o. y 3er. caso, la unión de la conducción a la cámara se efectúa con un estrangulamiento del mismo diámetro que el de la conducción, hasta llegar al diámetro de la cámara de 6", mediante una ampliación brusca (ver figura 3.3.1.b)



3.3.1.a Cámara simple

3.3.1.b Estrangulada y Johnson

Figura 3.3.1 Cámaras de oscilación del modelo.

Se introduce, con el objeto de simular la tipo Johnson (con fines de observarla únicamente), un tubo de acrílico de 4" de diámetro, colocado a una altura  $\Delta h$  del orificio, que se puede variar en función del gasto circulante.

En el caso de retirar este tubo central o riser, se tendrá el caso de una cámara de oscilación con orificio o estrangulada, ver la figura 3.3.1.b.

#### 3.4) DEPOSITO DE AFORO

En la descarga de las tuberías se tiene un depósito como se indica en el plano 3.3, al inicio del capítulo. El objetivo de este tanque y su tranquilizador, a base de ladrillos y grava, es el de determinar el caudal con que se está trabajando en el modelo.

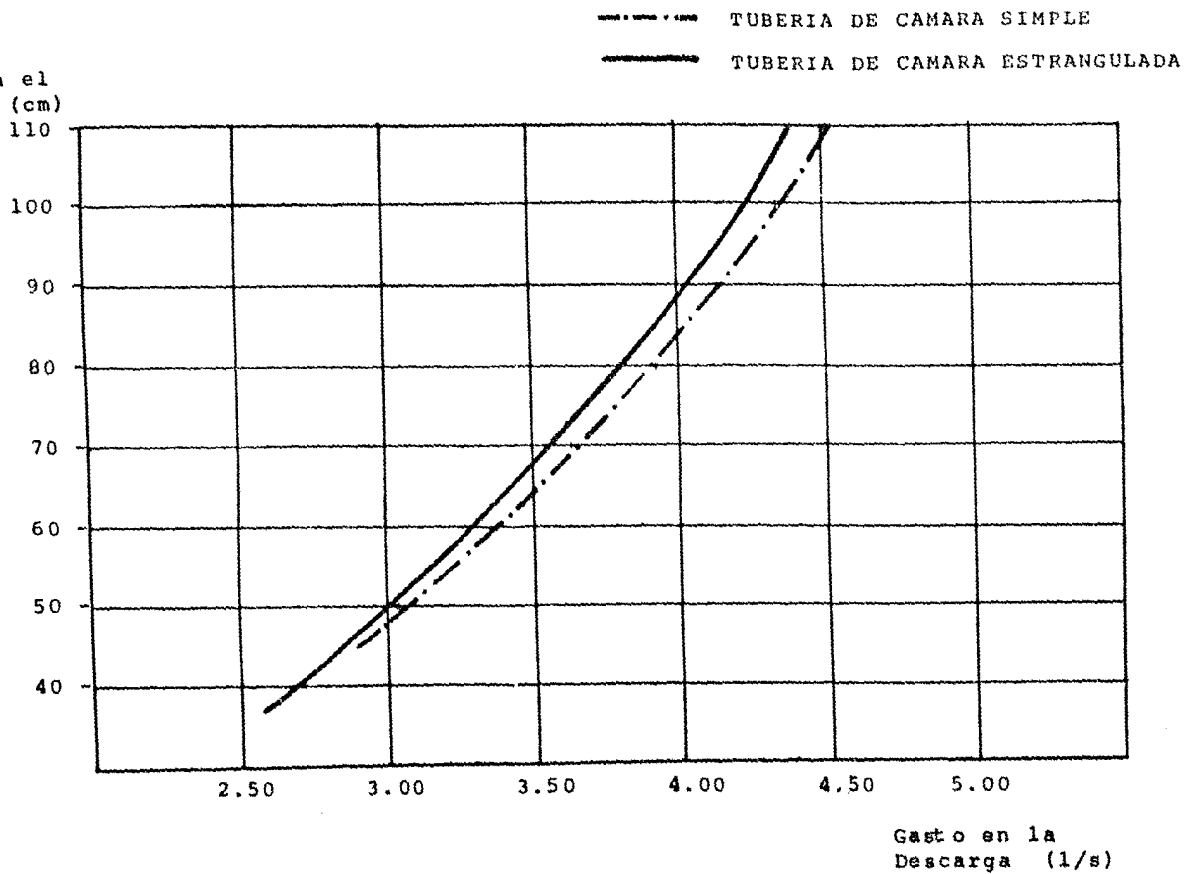
El depósito cuenta para su aforo, con un vertedor rectangular de pared delgada de 40 cm de longitud de cresta, el diseño de dicho vertedor se llevó a cabo con la finalidad de cumplir con las restricciones que se indican en la referencia 6.

Ya dentro de la experimentación, se detectaron deficiencias en las medidas del gasto y se concluyó que para pequeñas cargas (alrededor de 3 a 4 cm), se presentan problemas de succión de la vena y se registran variaciones en las cargas sobre el vertedor, provocando una salida mayor del caudal, comparado con el que proporciona el valor calculado con la fórmula para vertedores rectangulares de pared delgada.

Debido a esto se optó por aforar volumetricamente, es decir, se reprodujeron las condiciones de experimentación, se midió el gasto que pasa por cada tubo para diferentes cargas en el embalse.

Los resultados experimentales de carga en el embalse contra gasto se presentan en la gráfica 3.4.1.g. Esta gráfica se obtuvo

Carga en el  
Embalse (cm)



Gráfica 3.4.1.g. Relación experimental de Cargas contra Gastos.

experimentalmente, fijando distintas cargas en el embalse, dentro del rango de la experimentación y con la válvula de salida totalmente abierta y midiendo la elevación del nivel del agua en el tanque de aforo en cierto tiempo y calculando el gasto aplicando el concepto de caudal:

$$Q = \frac{A_e \Delta h}{t}$$

Donde  $A_e$  es el área efectiva del tanque, que multiplicada por  $\Delta h$ , que es el incremento en el nivel del agua, nos da el volumen, y si dividimos entre  $t$ , tiempo en que se presentó el incremento, nos da el gasto en unidades de volumen entre tiempo.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 4.1) PROCESO EXPERIMENTAL

### 4.2) RESULTADOS

### 4.) RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el presente capítulo se expondrá brevemente el procedimiento seguido durante la experimentación, se incluirán así mismo los resultados arrojados y las condiciones que rigieron cada una de las pruebas.

Se realizaron en total 19 pruebas; las ocho primeras llevadas a cabo en la cámara de oscilación estrangulada, las siguientes siete en la cámara simple. Todas ellas para distintas cargas en el embalse y en todos los casos de válvula totalmente abierta a totalmente cerrada, mediante cierre rápido o brusco.

Las últimas cuatro pruebas se destinaron a una comparación en cuanto a magnitudes de oscilaciones para las mismas condiciones iniciales  $z_0$ , pero con distinta carga en el embalse para el mismo pozo, así mismo se comparó el amortiguamiento que presenta un pozo con relación al otro para las mismas condiciones, tanto de  $z_0$  como de carga y caudal.



Cabe aclarar que por simplificar el procedimiento de experimentación y debido a las restricciones en cuanto a equipo, solo se enfocará el estudio de las cámaras simple y estrangulada.

En cualquier caso de prueba, la regulación del gasto fué relación únicamente de la carga en el embalse. Se optó por este control del caudal, dado que las válvulas de salida, como ya se mencionó con anterioridad, son de un solo paso para poder provocar cierre brusco o instantáneo, dificultando controlar el caudal en el modelo mediante dichas válvulas.

Es importante mencionar que los nombres que se les dió a las cámaras, simple y estrangulada, obedecen únicamente a la finalidad de permitir una identificación, por similitud a la teoría en cuanto a forma, entre cada una de las pruebas.

Es decir, aunque el nombre utilizado de cámara simple, identifique a una de las cámaras; dentro del análisis para su cálculo, se deben tomar en cuenta los valores de pérdidas locales que se tienen en el estrangulamiento de unión, ya que la "Te" cambia de diámetro de 2 1/2" a 2", así como la pérdida por expansión o contracción, dependiendo del sentido del flujo, aunque ésta sea gradual y minimíze este efecto. Más adelante se verá que para el caso de funcionar como contracción presenta efectos considerables de pérdidas.

En el caso de la cámara estrangulada, por la forma de unión, realmente no presenta orificio de estrangulamiento, sino únicamente la ampliación brusca de 2" a 6" de diámetro; en el subcapítulo de resultados se presentarán los valores de los coeficientes locales de pérdidas, así como las referencias de donde fueron obtenidos.

#### 4.1) PROCESO EXPERIMENTAL

Antes de entrar en el detalle del desarrollo paso a paso del proceso seguido durante la experimentación, es necesario aclarar que en todo manejo de modelos se está sujeto a errores previos a las pruebas, así como a los ajustes de calibración que se tienen que llevar a cabo durante la experimentación. Este tipo de actividades no se tomarán en cuenta como proceso de rutina.

En la figura 4.1.1. se presenta un diagrama de bloques que ilustra el proceso experimental desarrollado en el presente trabajo, y a continuación se explicará en que consiste cada paso.

Desglosando las actividades que se llevan a cabo en cada bloque del diagrama, podemos definir una cierta secuencia que se expone a continuación:

- Selección del tipo de cámara.- Como su propio nombre lo indica es el escoger el pozo a probar, esto fija la conducción a tratar, así como el criterio, según la unión de la tubería con el pozo, para la evaluación de las pérdidas locales. Es conveniente tener cerradas las demás válvulas y preparar la escala de medición en la parte posterior de la cámara seleccionada.
- Selección de la condición de prueba.- Propicia el colocar la condición de carga en el embalse que se desec, así mismo se mide el nivel establecido en la cámara al tener fluyendo el sistema, con la válvula totalmente abierta. La diferencia entre la carga en el embalse y este nivel es la condición inicial  $z_0$ .

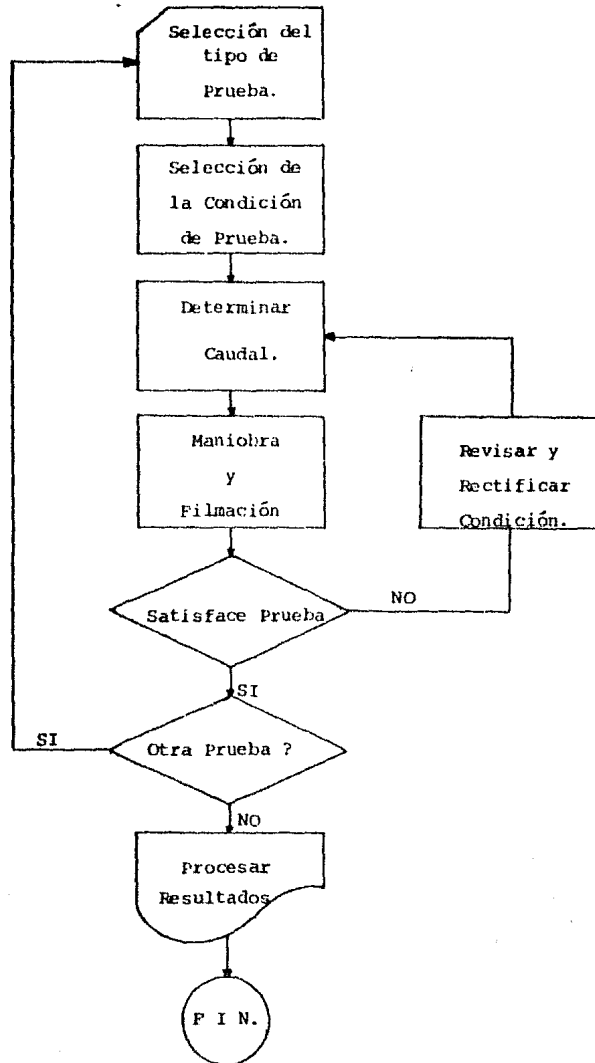


Figura 4.1.1. Diagrama de bloques del proceso experimental.

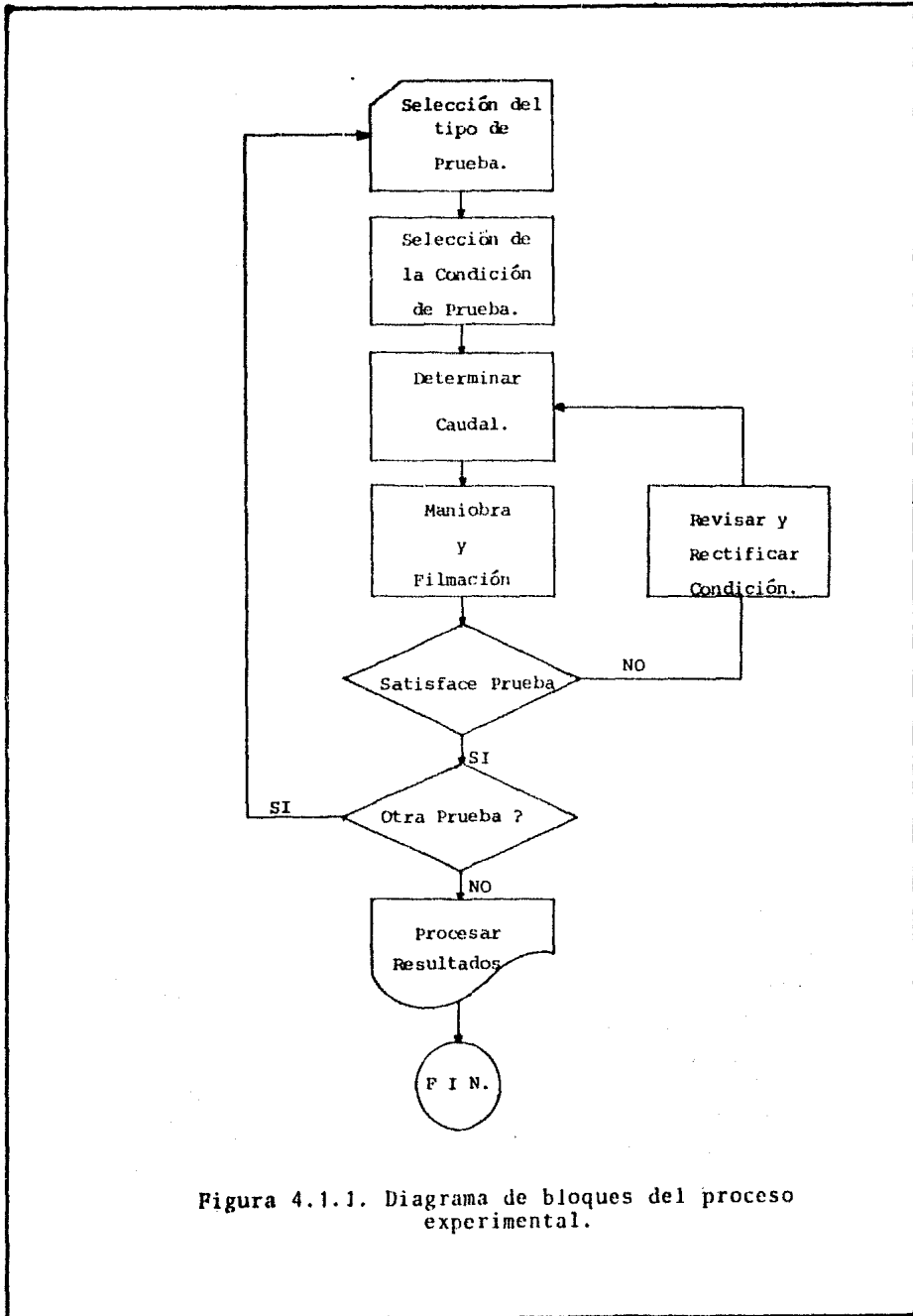


Figura 4.1.1. Diagrama de bloques del proceso experimental.

- Determinación del Caudal o Gasto.- Al fijar la carga en el embalse que se desea probar, y con ayuda de la gráfica 3.4.1.g., en donde se presenta el gasto en función de la carga en el embalse para cada tubería, se obtiene el gasto que circulará en dicha prueba.

- Maniobra y filmación.- Al establecerse las condiciones deseadas, se está en condición de efectuar la maniobra de cierre brusco y en ese momento comienza la medición del fenómeno transitorio.

Esta medición, por la forma del fenómeno oscilatorio en el tiempo, se filmó con ayuda de una cámara para Videocassettes; Hitachi (VT-6005, sistema VHS). El tiempo aproximado de cada prueba completa - es de 35 a 40 segundos. (Tiempo de filmación aproximado = 70 seg.).

- Revisión.- En la misma cámara utilizada para filmar es posible reproducir lo que se captó; gracias a esta ayuda, se revisa que la prueba fué satisfactoriamente filmada. En caso de algún defecto o error, se revisan las condiciones de prueba y se repite. En caso contrario se cambian las condiciones y se realiza otra prueba, hasta terminar con la experimentación.

- Procesamiento de resultados.- Una vez que las pruebas han sido captadas satisfactoriamente, se reproducirá el videocassette filmado en un monitor, en el cual es posible detener la imagen cuadro por cuadro de amplitud aproximada de un dieciseisavo de segundo, es decir, que se pueden obtener más o menos 16 imágenes secuenciales por segundo. Esto permitió observar y medir el fenómeno, con ayuda de la escala métrica colocada detrás de cada pozo y el cronómetro captado al nivel de la oscilación para cada prueba.

#### 4.2) RESULTADOS

En esta parte se presentan tanto las tablas de resultados, así como las gráficas que se obtuvieron del fenómeno transitorio, para las distintas condiciones de prueba.

La tabla 4.2.1. muestra la verificación del cálculo de pérdidas  $z_0$  con las medidas en el modelo. Se presentan también los gastos para cada prueba en función de la carga en el embalse con la cual se efectuó la condición escogida; el cálculo de  $z_0$  se hizo con la ecuación (3.2.5) presentada anteriormente.

Como ejemplo de la forma en que se capturaron los datos experimentales, se presenta la tabla 4.2.2 que representa la forma utilizada para la captura de todos los datos experimentales del monitor. En dicha tabla se presentan, a manera de ejemplo, los datos obtenidos para los primeros 10 segundos de la prueba número 6, realizada en la cámara estrangulada con un gasto de 4.048 litros por segundo, con una carga en el embalse de 90 centímetros. Los valores que aparecen como datos en los marcos superiores, son auxiliares para identificar la prueba. En la margen derecha de la tabla se indica el número de hoja, en este caso la primera de tres. En la parte medular de la tabla se encuentran por columnas, el tiempo, el número de la imagen en el monitor y el valor de la cota  $z$  obtenida con el nivel del agua en la cámara, auxiliándonos con la escala métrica filmada detrás del pozo.

De la misma forma, se tienen capturados todos los valores para las 19 distintas pruebas. Cada prueba consta aproximadamente de 400 valores que cubren los 30 ó 35 segundos de oscilación.

TIPO DE CAMARA	No. de PRUEBA	CARGA EN EMBALSE	GASTO (l/s)	z. Medida (cm)	z. Calculada (cm)	f Teórica	f Calculada
COE	1	60	3.297	18	14.38	0.020	0.028
	2	50	2.961	15	11.60	0.020	0.030
	3	40	2.712	13	9.90	0.021	0.032
	4	70	3.546	20	16.42	0.019	0.027
	5	80	3.819	23.5	19.96	0.019	0.026
	6	90	4.048	25.3	22.34	0.019	0.026
	7	100	4.269	28	24.12	0.018	0.026
	8	107	4.351	30	25.71	0.018	0.025
COS	9	50	3.031	13	13.28	0.022	0.022
	10	60	3.375	15.5	15.75	0.021	0.022
	11	70	3.629	18	18.26	0.020	0.021
	12	80	3.920	20	20.38	0.020	0.020
	13	90	4.120	22	22.21	0.019	0.019
	14	100	4.385	24.8	25.01	0.019	0.019
	15	110	4.524	27	27.36	0.018	0.018
COS	16	110	1.748	4	4.04	0.020	0.021
	17	50	1.638	4	3.66	0.021	0.022
COE	18	50	1.398	4	2.58	0.020	0.026
	19	110	1.579	4	3.35	0.021	0.028

TABLA 4.2.1 Comparación valores experimentales del modelo y teóricos.

TESIS "CAMARAS DE OSCILACION"

LABORATORIO DE HIDRAULICA

U.N.A.M.

FECHA: 3 FEB 84

PRUEBA: 6

$$H_{omb} = \frac{9.0 \text{ cm}}{1.0} \quad Q = 0.048 \text{ l/s}$$

$$h_1 = \frac{18.33}{1.0} \quad 3.37 \quad h_f = \frac{11.96}{1.0}$$

$$T_1 = \frac{1.0}{1.0} \quad \text{TARA} \quad T_f = \frac{1.36}{1.0}$$

$$Z_0 = \frac{25.30}{2} = 1 \text{ Cota Estab.}$$

$$Z_0 = \frac{Q \cdot \text{EST} \cdot C \cdot \text{IRC}}{2} = \frac{1}{2} \text{ Cota Estab.}$$

CAMARA: (COE) ESTRANGULADA  
 CONDICION DE PRUEBA: CIERRE BRUSCO A GASTO MAXIMO (VALVULA ABIERTA)  
 TUBO #: 3

OBSERVACIONES: DURACION TOTAL DE LA OSCILACION  
 28.5 seg.

At (soq)	# imag	cota (cm)	At (soq)	# imag	cota (cm)	At (soq)	# imag	cota (cm)	At (soq)	# imag	cota (cm)	At (soq)	# imag	cota (cm)	At (soq)	# imag	cota (cm)
0	1	30.0	1	1	30.0	01	10.7	01	10.7	01	10.7	101	10.7	101	10.7	101	10.7
	2	30.0	2	2	30.0	02	10.7	02	10.7	02	10.7	102	10.7	102	10.7	102	10.7
	3	30.0	3	3	30.0	03	10.7	03	10.7	03	10.7	103	10.7	103	10.7	103	10.7
	4	30.0	4	4	30.0	04	10.7	04	10.7	04	10.7	104	10.7	104	10.7	104	10.7
	5	30.0	5	5	30.0	05	10.7	05	10.7	05	10.7	105	10.7	105	10.7	105	10.7
	6	30.0	6	6	30.0	06	10.7	06	10.7	06	10.7	106	10.7	106	10.7	106	10.7
	7	30.0	7	7	30.0	07	10.7	07	10.7	07	10.7	107	10.7	107	10.7	107	10.7
	8	30.0	8	8	30.0	08	10.7	08	10.7	08	10.7	108	10.7	108	10.7	108	10.7
	9	30.0	9	9	30.0	09	10.7	09	10.7	09	10.7	109	10.7	109	10.7	109	10.7
	10	30.0	10	10	30.0	10	10.7	10	10.7	10	10.7	110	10.7	110	10.7	110	10.7
1.6	11	30.0	11	11	30.0	11	10.7	11	10.7	11	10.7	111	10.7	111	10.7	111	10.7
	12	30.0	12	12	30.0	12	10.7	12	10.7	12	10.7	112	10.7	112	10.7	112	10.7
	13	30.0	13	13	30.0	13	10.7	13	10.7	13	10.7	113	10.7	113	10.7	113	10.7
	14	30.0	14	14	30.0	14	10.7	14	10.7	14	10.7	114	10.7	114	10.7	114	10.7
	15	30.0	15	15	30.0	15	10.7	15	10.7	15	10.7	115	10.7	115	10.7	115	10.7
	16	30.0	16	16	30.0	16	10.7	16	10.7	16	10.7	116	10.7	116	10.7	116	10.7
	17	30.0	17	17	30.0	17	10.7	17	10.7	17	10.7	117	10.7	117	10.7	117	10.7
	18	30.0	18	18	30.0	18	10.7	18	10.7	18	10.7	118	10.7	118	10.7	118	10.7
	19	30.0	19	19	30.0	19	10.7	19	10.7	19	10.7	119	10.7	119	10.7	119	10.7
	20	30.0	20	20	30.0	20	10.7	20	10.7	20	10.7	120	10.7	120	10.7	120	10.7

H  
O  
J  
A  
I  
D  
E  
5

Tabla 4.2.2 Forma utilizada para la captura de las Oscilaciones experimentales.



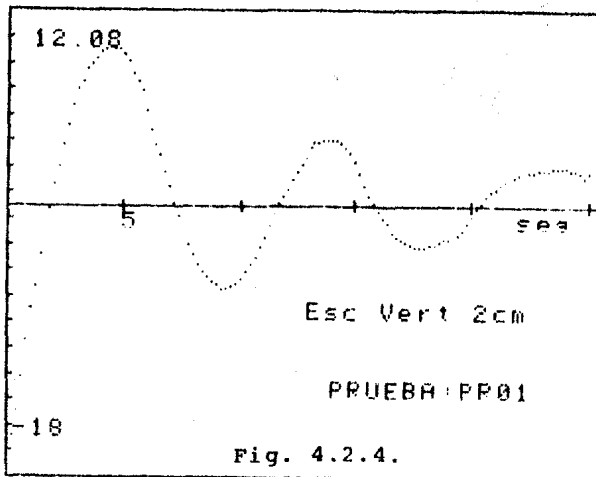
En el proceso de resultados se utilizó como herramienta un programa para microcomputadora, que más adelante se expondrá el porqué de la utilización de máquinas. Este programa llamado -- CARGA (Programa 6.1 del Apéndice), permite la fácil captura de los datos experimentales y genera, mediante interpolación con un incremento de tiempo constante e igual a 0.2 segundos, un vector; el cual llamaremos PR##, siendo ## el número de la prueba en cuestión. Este vector se archivará en soporte de cassette de la microcomputadora HP-85 que se utilizó como ayuda para la elaboración de este trabajo. El número de vectores corresponde al número de pruebas realizadas y la dimensión, en cuanto al valor de datos por cada vector, se presenta en la tabla 4.2.3 que se lista a continuación, como ayuda para tener acceso a los valores capturados.

Tabla 4.2.3 Dimensiones del vector prueba.

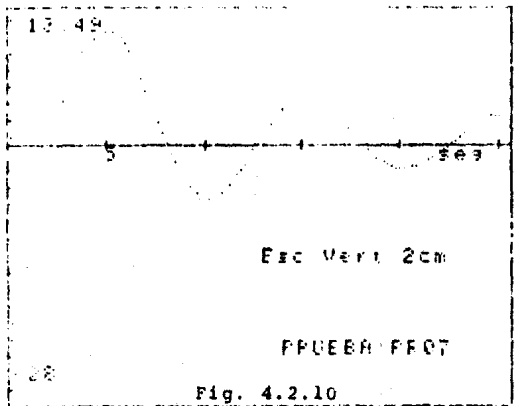
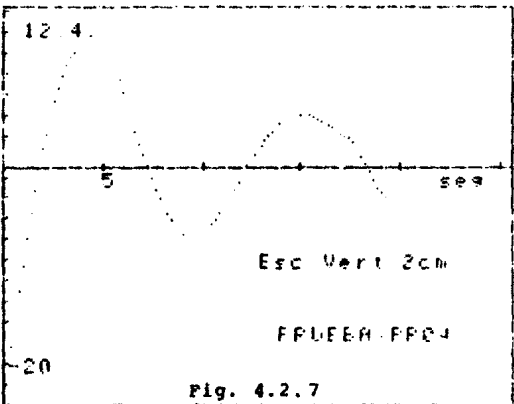
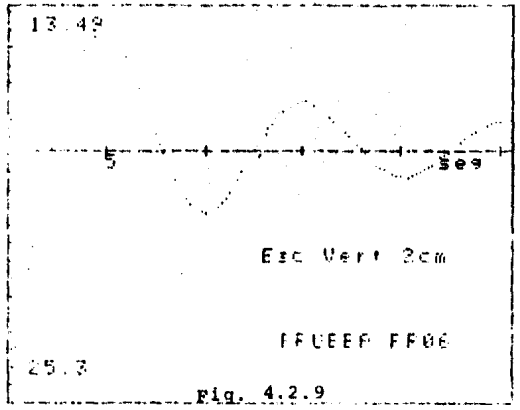
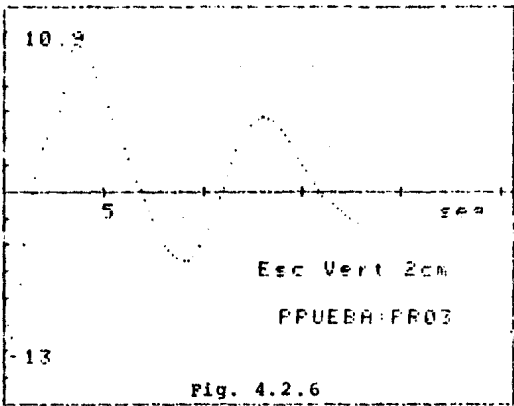
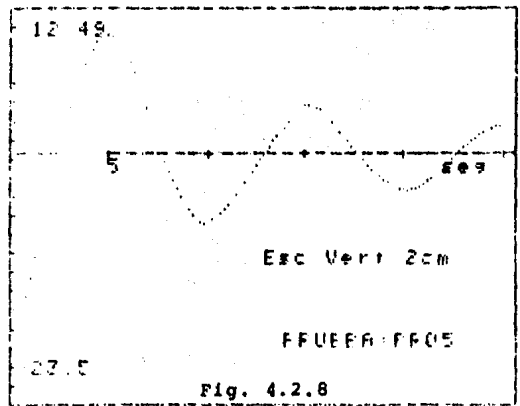
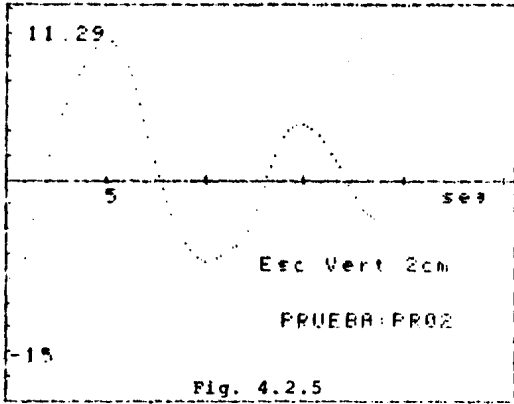
Cámara Probada	Prueba	Dimensión del Vector
COE	PR01	132
	PR02	95
	PR03	89
	PR04	96
	PR05	125
	PR06	124
	PR07	125
	PR08	123
COS	PR09	92
	PR10	109
	PR11	110
	PR12	111
	PR13	120
	PR14	118
	PR15	119
Variando Z.		
COS	PR16	87
	PR17	81
COE	PR18	88
	PR19	90

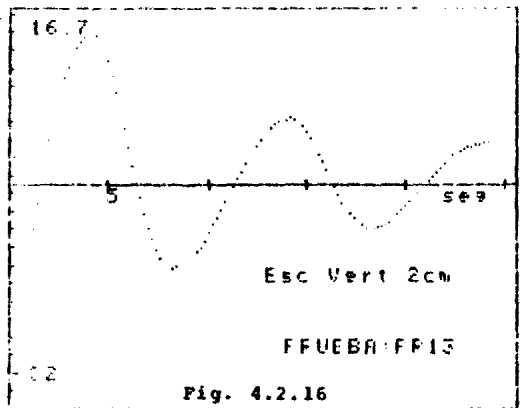
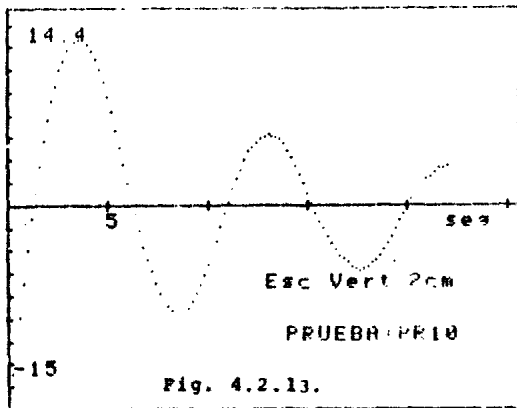
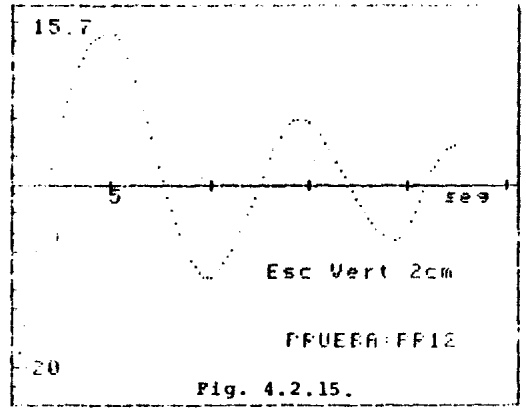
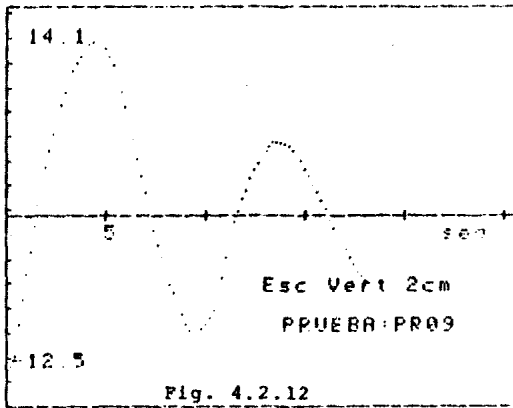
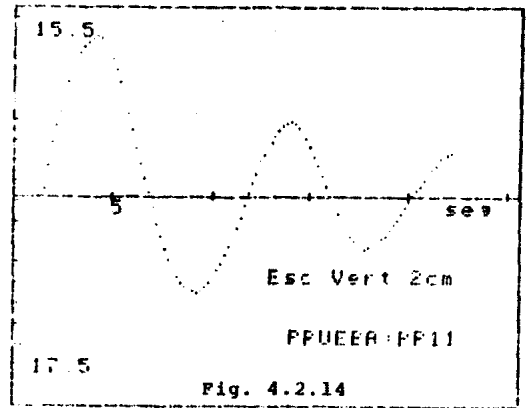
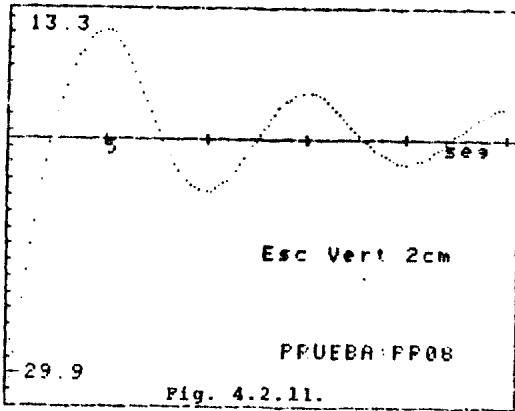
Una vez cargados los datos experimentales, se procedió a presentarlos de una forma gráfica mediante la ayuda de un programa - llamado GRAFIC (Programa 6.2 del Apéndice), que lee el vector de prueba y lo grafica en función del tiempo con un incremento de tiempo constante de 0.2 segundos. Esta impresión gráfica se desarrolla primero en "display" o pantalla y posteriormente se copia a papel térmico.

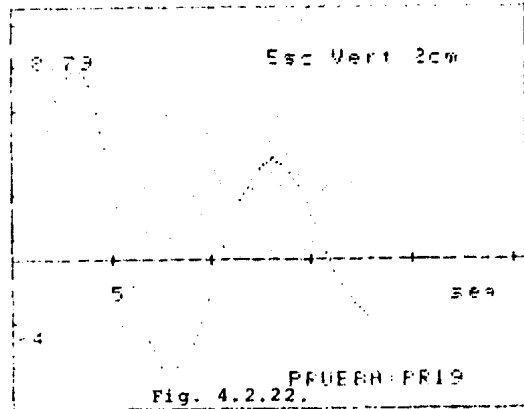
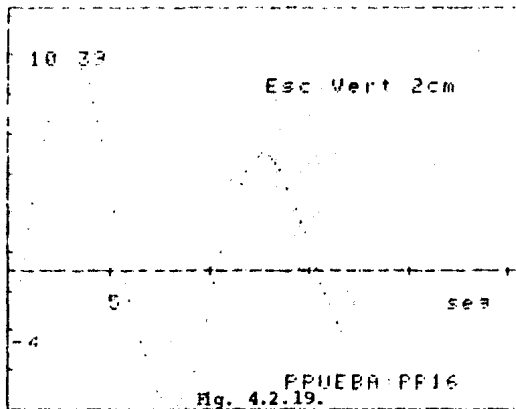
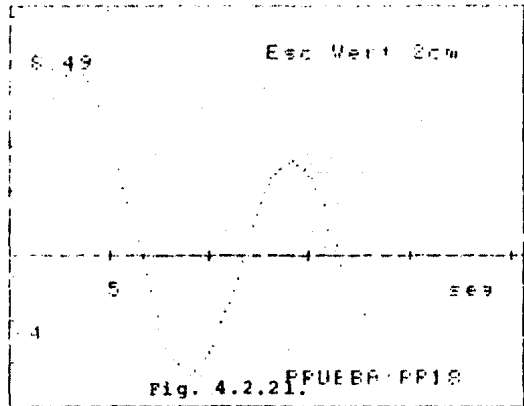
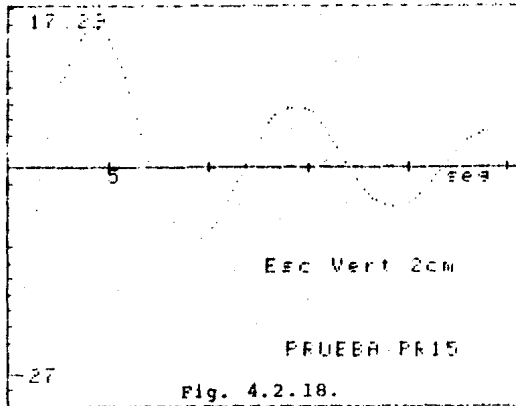
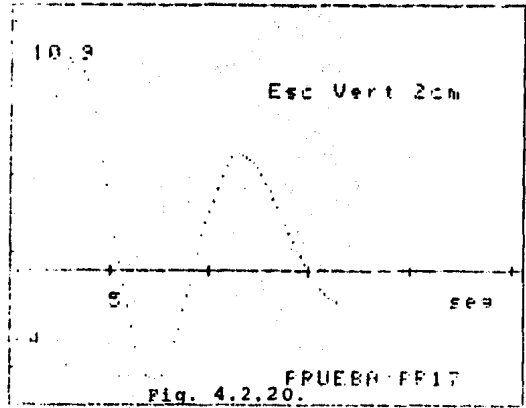
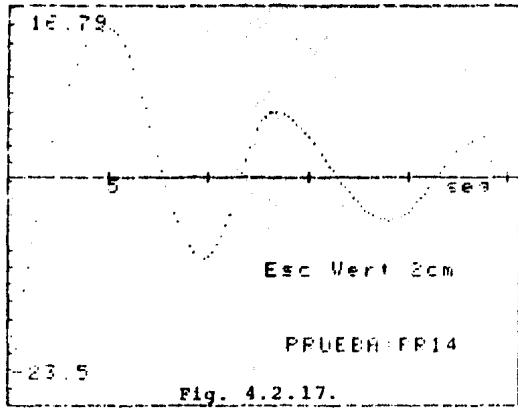
Estas gráficas de resultados se presentan a continuación en la serie de figuras de la 4.2.4. a la 4.2.23. En cada gráfica se indica la prueba que representa así como la escala, tanto vertical (z) como la horizontal (t).



Figuras de la 4.2.4. a la 4.2.23. Oscilaciones experimentales para distintas condiciones de carga en el embalse.







Con la finalidad de mostrar la variación de las oscilaciones en función del gasto, que a fin de cuentas es relación de la carga en el embalse, se presentan las figuras 4.2.24 y 4.2.25 que muestran para el mismo pozo, la variación en sus oscilaciones.

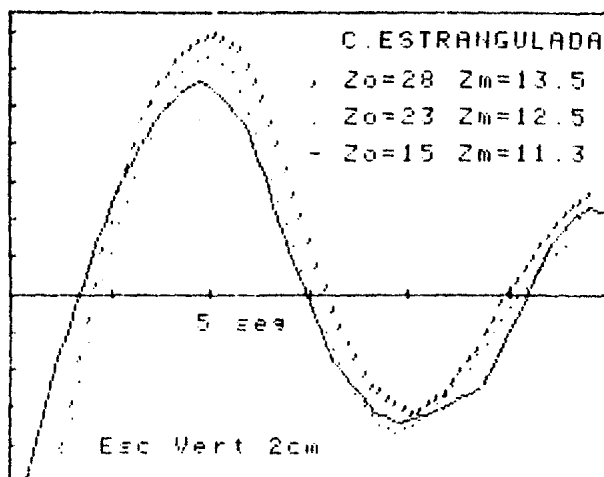
Al variar el gasto, se modifica el valor de  $z_0$ ; es por esta razón por lo que las figuras mencionadas se presentan comparando  $z_0$  y  $z_{\max}$  en la misma cámara.

Con los valores del 1er. máximo y 1er. mínimo de cada una de las pruebas medidas, se procedió a graficar estos valores contra el valor de  $z_0$  de la misma prueba. Esta gráfica 4.2.26 g. se presenta a continuación y se propone como tema de una futura investigación para intentar establecer algún criterio que relacione la funcionalidad de  $z_{\max}$  y  $z_{\min}$  contra caudales ó  $z_0$  como parámetros.

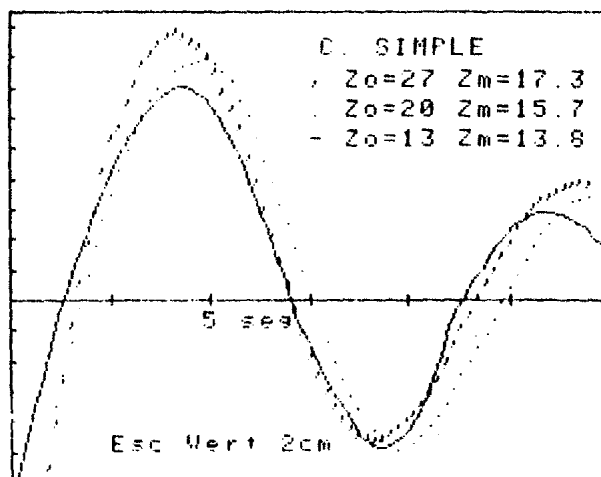
Como se mencionó al principio del capítulo, se realizaron 4 - pruebas (16 a 19) con el objeto de comparar las oscilaciones para las mismas condiciones de gasto y  $Z_0$ , variando la magnitud de carga en el embalse.

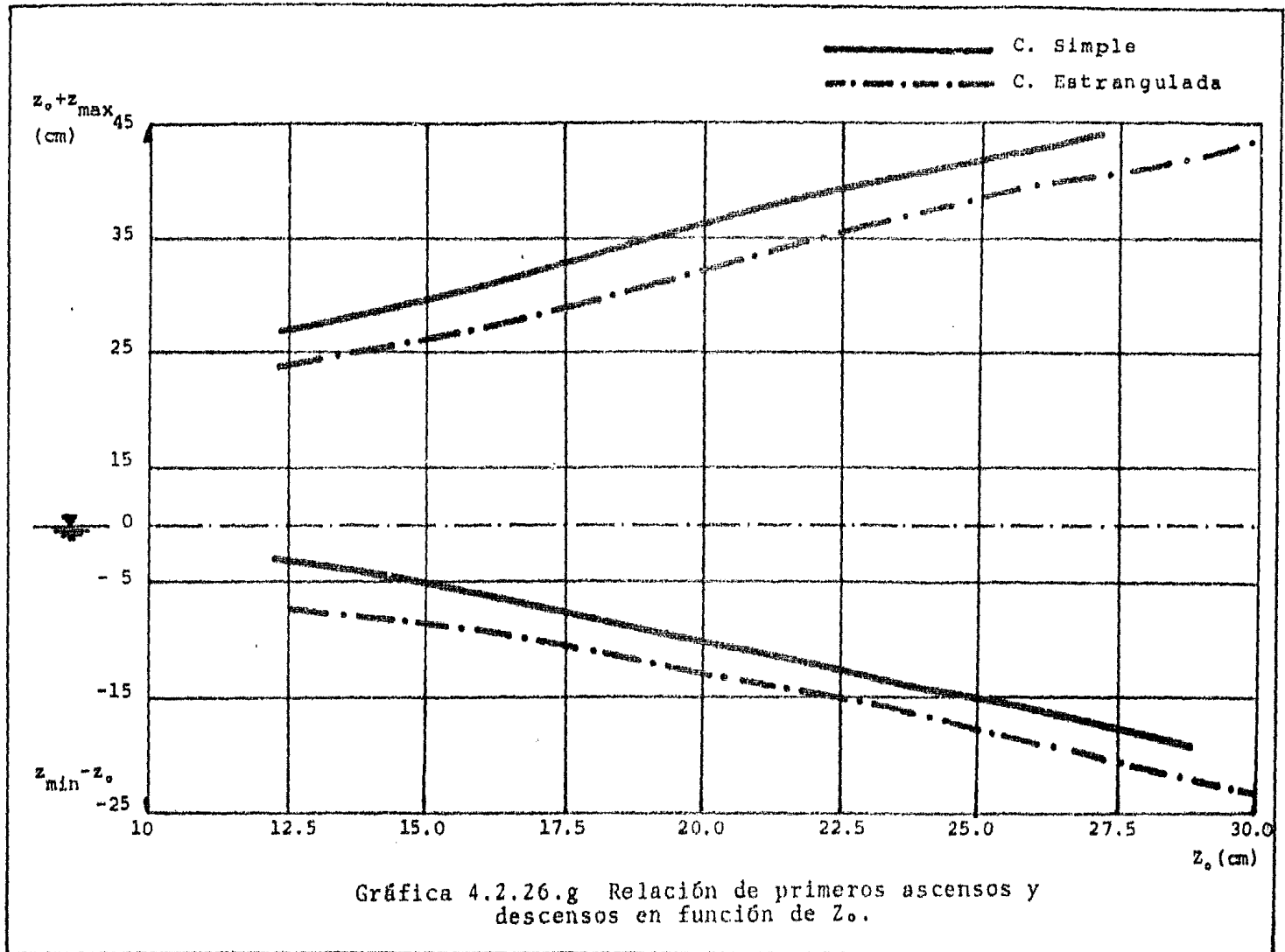
En estas pruebas se logró fijar las mismas  $Z_0$  para distintas cargas y se presentan los resultados en las figuras de la 4.2.27 a la 4.2.30.

En las dos primeras se observa la comparación para las mismas condiciones en distintos pozos y en las otras dos, se compara la misma condición inicial  $Z_0$  con distintas cargas en el embalse para la misma cámara de oscilación.

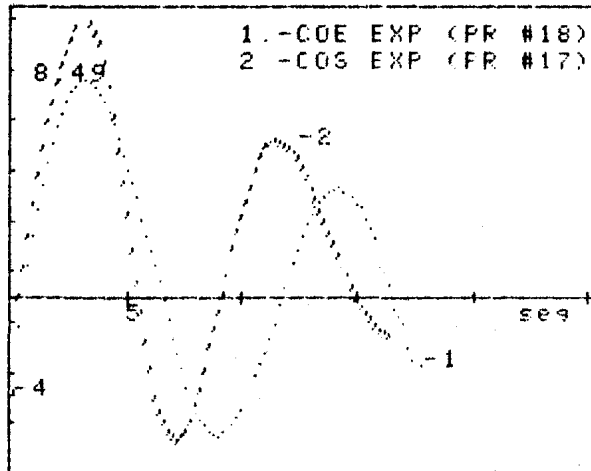
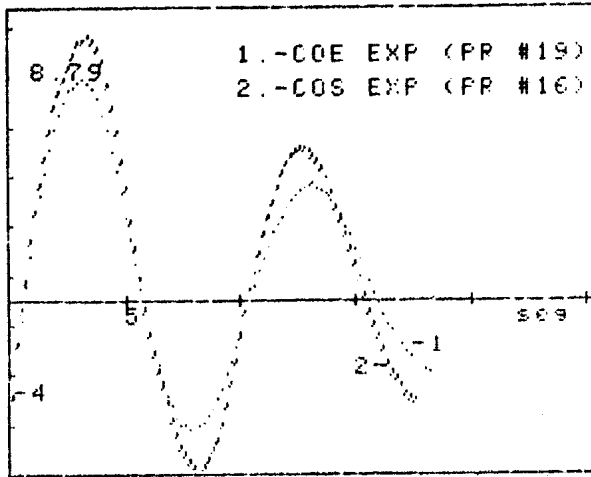


Figuras 4.2.24 y 4.2.25. Comparación de oscilaciones en el mismo pozo.

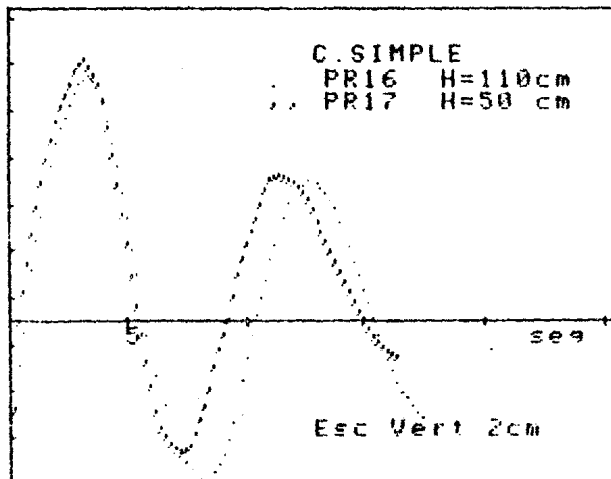
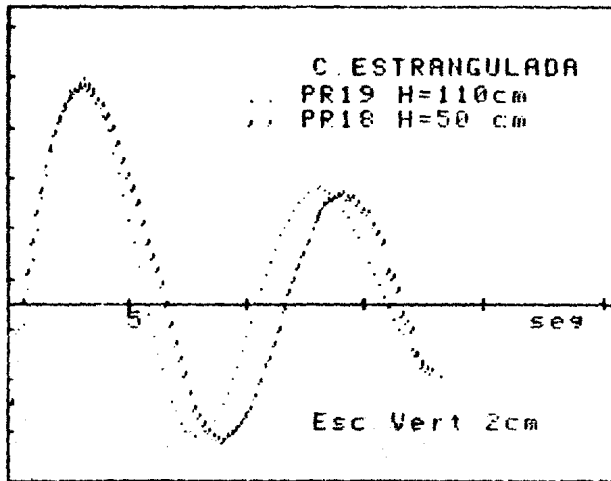








Figuras 4.2.27. y 4.2.28 Oscilaciones experimentales con las mismas condiciones en distintos pozos.



Figuras 4.2.29. y 4.2.30 Oscilaciones experimentales en el mismo pozo, misma  $z_0$  y distintas cargas.

## 5 RESULTADOS DE LOS METODOS NUMERICOS

5.1) DESCRIPCION DE LOS METODOS NUMERICOS UTILIZADOS

5.2) RESULTADOS COMPARADOS CON LOS EXPERIMENTALES

5.) RESULTADOS DE LOS METODOS NUMERICOS

En una forma muy general se puede definir a un método numérico como la secuencia de procesos que intentan resolver numericamente - el planteamiento de un modelo matemático que a su vez representa, generalmente, un fenómeno de la naturaleza.

Debido al gran auge que actualmente están teniendo las microcomputadoras y su relativa fácil adquisición y utilización, se presenta la opción de realizar trabajos con el auxilio de estas máquinas y por lo tanto la factibilidad de utilizar métodos numéricos, que de otra manera sería engorroso utilizar. Dado lo anterior se presenta en este trabajo la solución del fenómeno transitorio mediante métodos numéricos (se explicarán más adelante), y utilizando como herramienta una microcomputadora Hewlett-Packard HP-85.

El lenguaje a utilizar, dado su sencillez y campo de acción, es el BASIC (Beginers All purpose Symbolic Instruction Code).

## 5.1) DESCRIPCION DE LOS METODOS NUMERICOS UTILIZADOS

En el capítulo que ahora tratamos, se enfoca a describir los métodos de solución del transitorio. Las ecuaciones que rigen el fenómeno son, como ya se dedujeron en el capítulo 2, - dos ecuaciones diferenciales ordinarias que deben resolverse en forma simultánea, siendo una de ellas la que representa la dinámica del fenómeno y la otra la de continuidad, ambas en relación al tiempo.

Los métodos numéricos utilizados en este trabajo son:

- Método de Scimemi y
- Método de Runge-Kutta de 3er. Orden.

El análisis de los métodos numéricos se dividió en dos partes. La primera tratará de analizar las bondades de cada método por separado, comparándolos en relación a valores teóricos obtenidos con parámetros adimensionales que permitan obtener, un primer máximo y un primer mínimo, para poder así comparar si los métodos por sí -- solos presentan estabilidad y no generan amortiguamientos al cambiar el incremento de tiempo al valuar el fenómeno.

La otra parte se destinará a comparar las oscilaciones obtenidas experimentalmente con los resultados que generen los métodos numéricos de solución a las oscilaciones de masa. (Se tratará de - comparar, tanto amplitud como periodo).

A continuación se describirá cada método y se presentarán los valores teóricos a comparar con las posibles variaciones al modificar el incremento de tiempo, obteniendo una idea preliminar de la estabilidad y bondad del método.

\* Ecuaciones a resolver.

Independientemente del método numérico a utilizar, las ecuaciones generales a resolver son, en forma general:

- Ecuación dinámica (deducida en el capítulo 2):

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{gAt}{L} (-z - h_v \bar{r} (h_i + h_{te} + h_{cs} + h_f)) \dots (5.1.1)$$

Esta ecuación se puede escribir en función de cargas de velocidad, ya que realizando el análisis de cada carga  $h_{"j"}$ , se puede escribir como la carga de presión total, en función de la carga de velocidad en la conducción, esto es:

$$h_{"j"} = \frac{p_a - p_b}{\gamma} + \frac{V_a^2 - V_b^2}{2g} = k_{"j"} \frac{V_b^2}{2g}$$

Donde  $k_{"j"}$  es el valor del coeficiente de pérdida local transportado a la carga de velocidad en la conducción. Los valores de estos coeficientes se presentarán en la tabla 5.2.2 de resultados.

La ecuación 5.1.1 se puede escribir entonces como:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{gAt}{L} (-z + (-1 \mp (\Sigma k + f \frac{L}{D})) \frac{V^2}{2g}) \dots (5.1.2)$$

Donde en la ecuación 5.1.2., la  $\sum k$  es la sumatoria de los - valores de coeficientes de pérdidas locales arriba descritos, el  $f \frac{L}{D}$  es el coeficiente de pérdida por fricción.

Finalmente se puede escribir como:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{g A_t}{L} (-z + B \frac{V^2}{2g}) \dots \dots \dots (5.1.3)$$

Donde  $B = -1 \mp (\sum k + f \frac{L}{D})$  y tomará distinto valor y signo en -- función del sentido del flujo (-) del embalse a la cámara y (+) a la inversa. Su valor dependerá del tipo de pérdidas locales.

Transformando por continuidad a la ecuación anterior:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{g}{L} (-z + B \frac{V^2}{2g}) \dots \dots \dots (5.1.4)$$

- Ecuación de continuidad:

Esta se presenta sin modificar, directamente del capítulo 2:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{A_t}{A_c} V \dots \dots \dots (5.1.5)$$

Así, las ecuaciones 5.1.4. y 5.1.5. representan el fenómeno de - oscilación de masa. Como se puede ver son dos ecuaciones diferenciales ordinarias y simultáneas. Para resolver este tipo de ecuaciones es necesaria la utilización de algún método numérico. A - continuación se presentan los dos utilizados en el presente trabajo.

\* Método de Scimemi.

Trabajando las ecuaciones (5.1.4) y (5.1.5) como incrementos de velocidad o nivel a intervalos de tiempo  $\Delta t$ , se puede despejar de la siguiente manera:

$$\Delta V = \frac{g \Delta t}{L} \left( -z + B \frac{V^2}{2g} \right)$$

$$\Delta z = \frac{\Delta t A_t}{A_c} V$$

Partiendo de condiciones iniciales  $-z_0$  y  $V_0=Q/A_t$ , se calculan los incrementos de velocidad y nivel, obteniendo para el -- siguiente instante  $t$  de tiempo, los valores  $V_{i+1}$  y  $z_{i+1}$  como:

$$V_{i+1} = V_i + \Delta V$$

$$z_{i+1} = z_i + \Delta z$$

En el apéndice se presenta el listado del programa 6.3 SCIMEM, que se utilizó para obtener los resultados por el método de Scimemi. El programa está preparado para graficar los resultados, pero con ligeras modificaciones de impresión se obtienen los demás resultados de interés en este trabajo.

\* Método de Runge-Kutta de 3er. Orden.

Las ecuaciones que ataca el método son las mismas arriba descritas, lo que varía es el valor promedio con que se obtienen los incrementos de velocidad y de nivel, para un cierto intervalo de tiempo.

El método de Runge-Kutta se basa en aplicar la siguiente fórmula de recurrencia:

$$Z_{n+1} = Z_n + \Delta t \phi(t_n, V_n, Z_n)$$

Donde la función  $\phi$  será evaluando la ecuación diferencial, en este caso para los valores  $t_n, V_n$  y  $Z_n$ . Las características más comunes de este método son:

- Es un método de un paso; para determinar el siguiente valor en el tiempo se necesita conocer únicamente los valores anteriores y
- No requiere evaluar ninguna derivada, sino únicamente valores de la función dada, para un cierto valor anterior.

Un método de Runge-Kutta para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden con error  $O(h^4)$ , es el conocido como método de Runge-Kutta de tercer orden, en donde la función a evaluar  $\phi(x, y)$  está dada por la expresión:

$$\phi(x, y) = \frac{1}{4}k_1 + \frac{3}{4}k_3$$

Donde:

$$k_1 = h f(x, y)$$

$$k_2 = h f(x + \frac{1}{3}h, y + \frac{1}{3}k_1)$$

$$k_3 = h f(x + \frac{2}{3}h, y + \frac{2}{3}k_2)$$

En este caso  $h$  representa el incremento de tiempo para el cual se desea conocer, para esta nomenclatura,  $y_{n+1}$  valuando:

$$y_{n+1} = y_n + \phi(x, y)$$



En el programa llamado RUNKUT, (programa 6.4. del apéndice) se presenta el listado del programa que se utilizó para obtener los resultados numéricos que a continuación se presentan.

## 5.2) RESULTADOS COMPARADOS CON LOS EXPERIMENTALES

En una primera parte y analizando a los métodos numéricos - independientemente a los efectos de dispersión que puedan provocar los valores de pérdidas, se efectuará un análisis, con ayuda de - los parámetros de Calame y Gaden (referencia #5), con el objeto de obtener los valores del primer máximo y del primer mínimo teóricos, para compararlos con los valores que arrojen los métodos de Scimemi y Runge-Kutta de 3er. orden, para distintos incrementos de tiempo, con la finalidad de observar un amortiguamiento en los resultados por inestabilidad propia del método, en caso de que - ésta exista.

En la referencia antes citada, se efectúa un análisis de manera adimensional de las ecuaciones que rigen a las oscilaciones de masa a partir de las normalizaciones de Calame y Gaden.

Se introducen, con objeto de transformación a un sistema de análisis gráfico los siguientes parámetros:

$$z_* = V_o \sqrt{(L/g) (A_t/A_c)}$$

$$Fr_o = \frac{F V_o^2}{z_*} = \frac{z_o}{z_*}$$

Con estos valores y auxiliándonos de la figura 3 de la misma referencia, que se presenta en el artículo, es posible obtener los valores del primer máximo o ascenso y del primer mínimo o descenso.

La tabla 5.2.1. muestra los valores obtenidos de dicho análisis para 6 condiciones distintas, tomadas de pruebas medidas -- durante la experimentación, con la única finalidad de tener un gasto y velocidad reales.

PRUEBA #	$z_0$ (m)	$V_0$ (m/s)	$z_*$	$Fr_0$	$z_{max.}$ (m)	$z_{min}$ (m)
02	-0.15	0.9349	0.248	0.6029	0.1600	-0.1010
03	-0.13	0.8563	0.228	0.5706	0.1501	-0.1001
04	-0.20	1.1196	0.297	0.6713	0.1820	-0.1132
05	-0.235	1.2061	0.321	0.7322	0.1874	-0.1151
06	-0.253	1.2782	0.340	0.7439	0.1968	-0.1202
07	-0.28	1.3481	0.358	0.7806	0.2020	-0.1251

Tabla 5.2.1 Valores del 1er. max y del 1er. min a partir del análisis normalizado según Calame y Gaden.

De estos valores se escogieron las pruebas 2,5 y 7 para - probar los métodos numéricos variando únicamente el valor del - incremento de tiempo.

El valor de B que entra como constante de pérdidas será, para ser congruentes con el análisis adimensional:

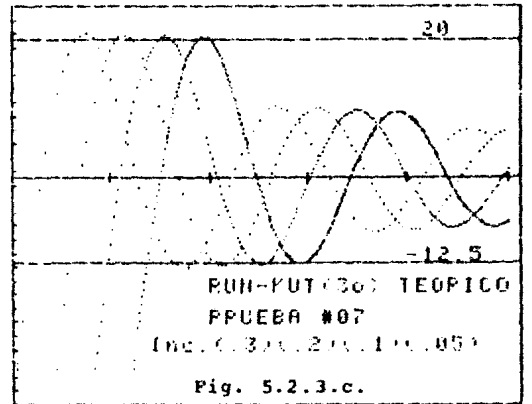
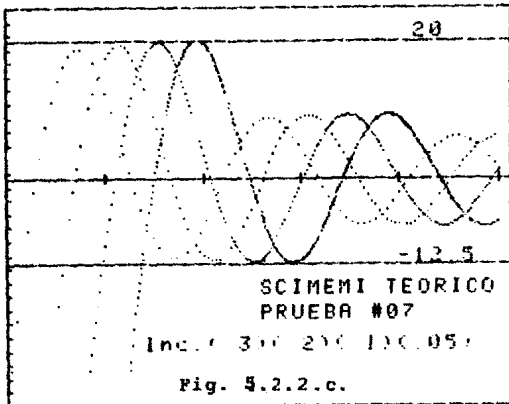
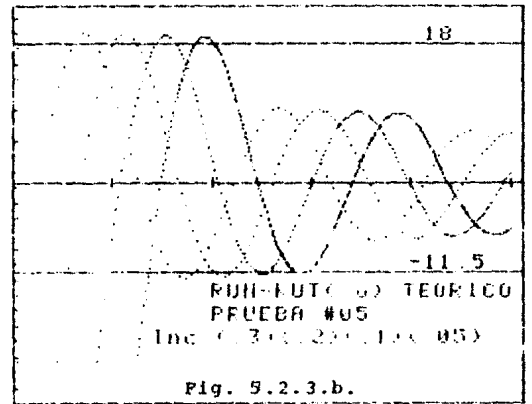
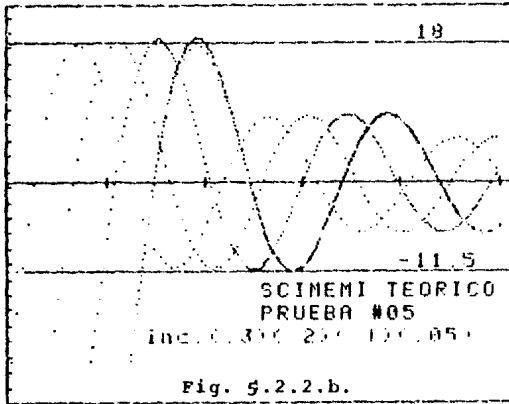
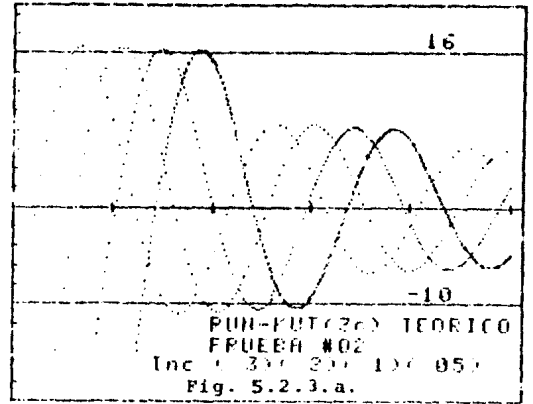
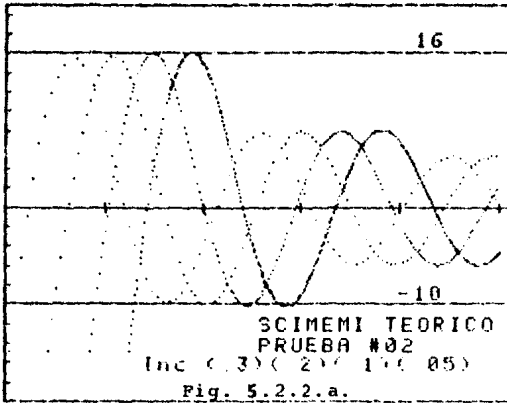
$$B = z_0/V_0^2$$

Se puede observar que B en estos momentos aún no es adimensional, pero al ser resuelto el fenómeno dentro del programa, se divide entonces B entre dos veces la gravedad. Así mismo, se introduce su signo negativo si va del embalse a la cámara y positivo al descenso de la cámara al embalse.

Corriendo los programas 6.3 SCIMEM y 6.4 RUNKUT con las consideraciones arriba descritas y probando distintos incrementos de tiempo, se obtienen los resultados que se presentan en las figuras 5.2.2 y 5.2.3, la primera para el método de Scimemi y la segunda para el método de Runge-Kutta. Ambas figuras constan de 3 gráficas, una para cada prueba; y a su vez cada gráfica de cuatro resultados para distintos incrementos de tiempo (0.3, 0.2, 0.1 y 0.05 seg.).

Se puede observar de dichas figuras que para el método de Scimemi, la variación de los resultados tiende a aumentar y acercarse a los valores teóricos al disminuir el incremento de tiempo, por el contrario en el método de Runge-Kutta (3er. orden), al disminuir el incremento de tiempo, los valores resultantes tienden a disminuir hacia los resultados teóricos.

De los mismos programas se obtuvieron resultados numéricos, ya que las gráficas solo permiten una evaluación cualitativa, aún cuando estén escalados. Así se presenta entonces la tabla 5.2.4 en donde se muestran los resultados numéricos de las figuras anteriormente tratadas.



```

**** RESULTADOS TEORICOS
**** SCIMEMI ****
PRUEBA 2      Zmax teo =0.16001

Zmax= .156122765845      INC .3
Zmax= .158285426532      INC .2
Zmax= .160088521523      INC .1
Zmax= .161695212328      INC .05

PRUEBA 5      Zmax teo =0.18741

Zmax= .176962542156      INC .3
Zmax= .180179359452      INC .2
Zmax= .183064258921      INC .1
Zmax= .185126537452      INC .05

PRUEBA 7      Zmax teo =0.20205

Zmax= .191583602845      INC .3
Zmax= .195056832159      INC .2
Zmax= .198088524591      INC .1
Zmax= .201565214589      INC .05

```

```

**** RESULTADOS TEORICOS
**** RUNGE KUTTA ****
PRUEBA 2      Zmax teo.=0.16001

Zmax= .162586608456      INC .3
Zmax= .161254865159      INC .2
Zmax= .160950215591      INC .1
Zmax= .159215214587      INC .05

PRUEBA 5      Zmax teo.=0.18741

Zmax= .192546625845      INC .3
Zmax= .189426598457      INC .2
Zmax= .187689521554      INC .1
Zmax= .185012584107      INC .05

PRUEBA 7      Zmax teo.=0.20205

Zmax= .208526608556      INC .3
Zmax= .206752165121      INC .2
Zmax= .203012215892      INC .1
Zmax= .200988544534      INC .05

```

Tabla 5.2.4. Comparación de valores normalizados de los máximos teóricos contra los resultados obtenidos con el método de Scimemi y de Runge-Kutta, para diferentes valores del incremento de tiempo.

Después de analizados los métodos independientemente del ruido que puedan aportar las pérdidas y exclusivamente manejando valores teóricos, se optó por utilizar 0.1 seg. como incremento de tiempo para ambos métodos, tanto por convergencia a los valores teóricos así como por no incrementar demasiado el tiempo de proceso de computadora, que también es factor de decisión.

En la segunda parte de los resultados de los métodos numéricos se presenta el análisis de los valores de los coeficientes de pérdidas y se obtuvieron los siguientes resultados:

. Para la cámara estrangulada.

- Con el flujo del embalse a la cámara:

$$k_i = 0.1 \quad * k_{te} = 1.28 \quad k_{cs} = -0.2$$

- Con el flujo de la cámara al embalse:

$$k_i = 0.3 \quad * k_{te} = 1.20 \quad k_{cs} = 1.42$$

\* Coeficientes obtenidos de la figura 1.67 el primero y de la 1.56 el segundo de la referencia #1, manual A.2.3, suponiendo un redondeo de 0.1D.

. Para la cámara simple.

- Con el flujo del embalse a la cámara:

$$k_i = 0.1 \quad ** k_{te} = 2.68 \quad k_{cs} = -1.28$$

- Con el flujo de la cámara al embalse:

$$k_i = 0.3 \quad ** k_{te} = 0.68 \quad k_{cs} = 2.80$$

\*\* Coeficientes obtenidos de las figuras 1.67 y 1.70 el primero y de las fig. 1.56 y 1.70 el segundo de la referencia #1, manual A.2.3., suponiendo un redondeo de 0.1D.

Los demás coeficientes de pérdidas locales se obtuvieron de la referencia #6. Cabe aclarar que los valores presentados son ya los coeficientes transformados, por continuidad y energía y presión total a que sean utilizados en función de la velocidad en la conducción.

Con relación a las pérdidas debidas a la fricción, se probaron los programas con una subrutina que valúa la variación del coeficiente de fricción  $f$  en función de la velocidad, utilizando las ecuaciones que representa el diagrama de Moody. Se observó que los valores variaban en un rango de mínimo 0.0185 y como -- máximo 0.021; se aumentaba con esto el tiempo de proceso de computadora y la variación en los resultados no lo justificaba, por lo que se tomó un valor promedio y constante igual a  $f = 0.020$ .

Al tomar este valor constante en los dos pozos, se obtienen finalmente los valores de  $B$  que entran en la ecuación (5.1.4). Los valores que adoptó la constante de pérdidas  $B$  se muestran a continuación en la tabla 5.2.5:

SENTIDO DEL FLUJO	CAMARA ESTRANGULADA	CAMARA SIMPLE
Embalse a Cámara	$B_1 = -3.44$	$B_1 = -3.76$
Cámara a Embalse	$B_2 = 3.18$	$B_2 = 4.04$

Tabla 5.2.5. Coeficientes de pérdidas para las dos cámaras de oscilación probadas.

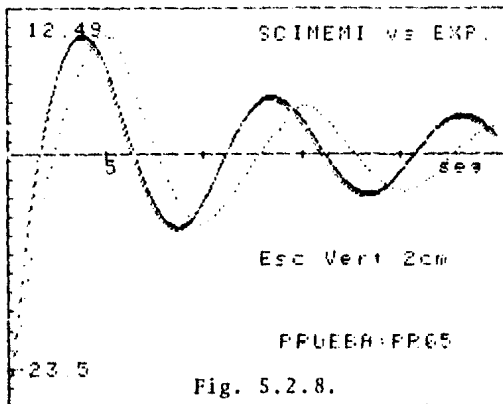
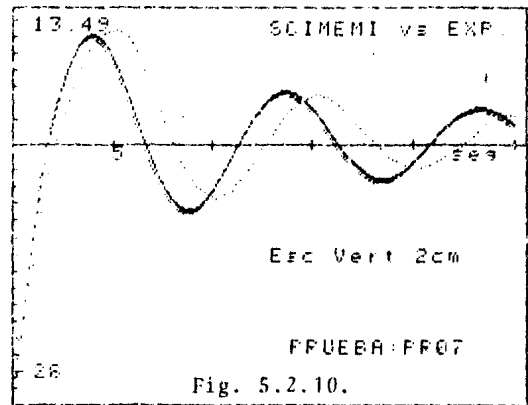
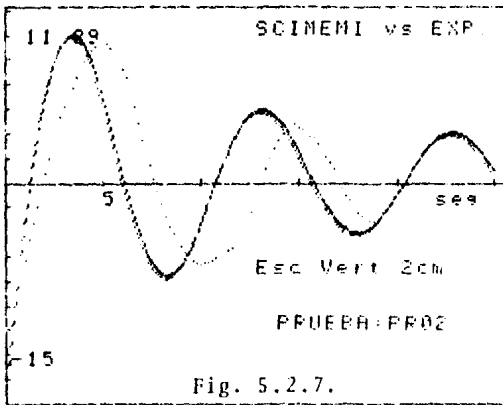
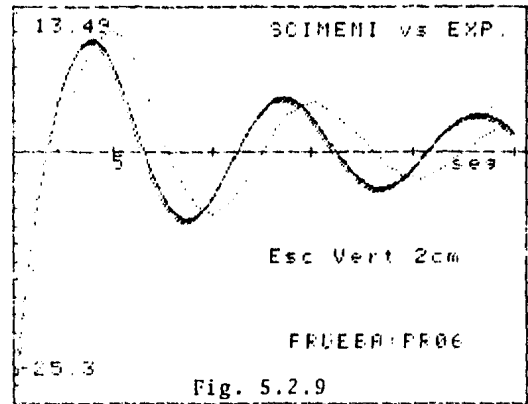
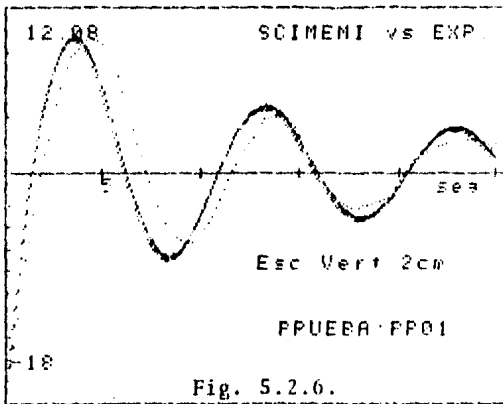
A continuación se presentan las figuras de resultados gráficos por el método de Scimemi, comparándolo con las oscilaciones experimentales. Se presentan en dos bloques, uno desde las figuras 5.2.6 a la 5.2.10, donde se comparan las pruebas 1,2,5,6 y 7 que corresponden a la cámara estrangulada; el otro bloque desde las figuras 5.2.11. a la 5.2.15., comparando las pruebas 10,11,12, 13 y 15 que pertenecen a pruebas en la cámara simple.

De las mismas pruebas se presentan las comparaciones de los resultados de Runge-Kutta de 3er. orden contra los experimentales en las figuras de la 5.2.16. a la 5.2.20 para la cámara estrangulada y de la figura 5.2.21. a la 5.2.25 para la simple.

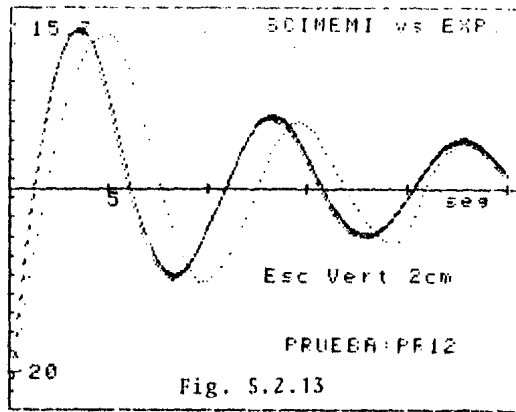
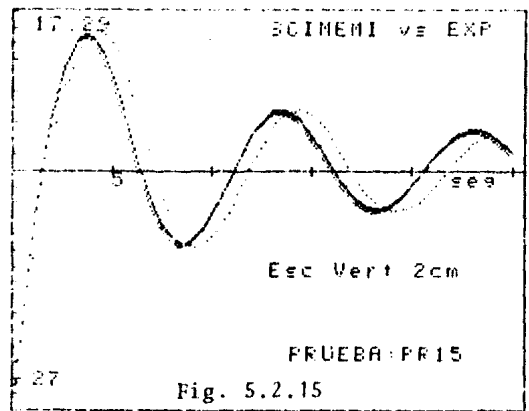
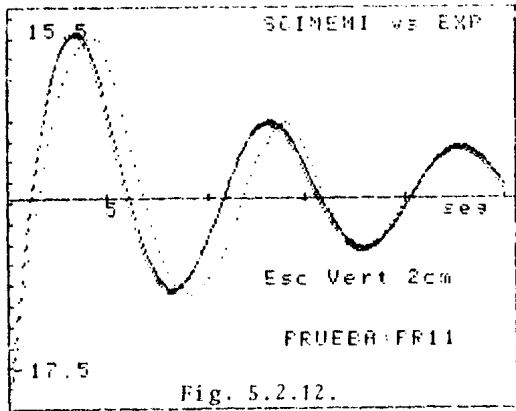
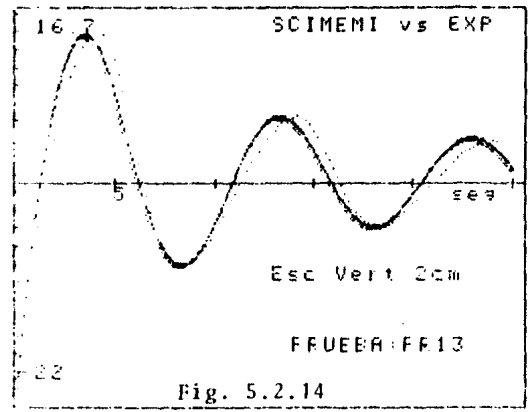
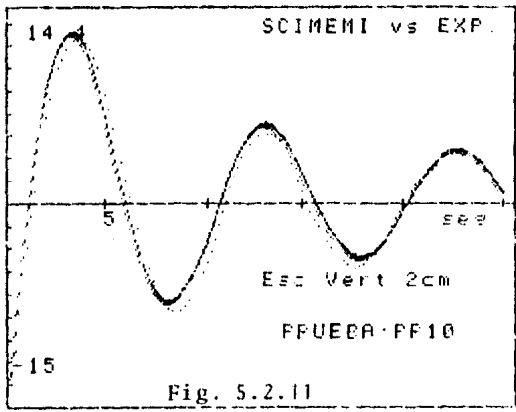
En la última serie de figuras de la 5.2.26 a la 5.2.31, se presenta la comparación de los dos métodos (el Runge-Kutta se defasó dos segundos en el tiempo para facilitar la comparación), - para las pruebas 5,6 y 7 de la cámara estrangulada y las pruebas 10,12 y 15 que corresponden al pozo simple.

Las gráficas de resultados permiten una evaluación cualitativa de las comparaciones, la cuantificación de las diferencias entre los valores medidos y los calculados (1er. máximo y 1er mínimo exclusivamente por razones de espacio), se presentan en las tablas 5.2.32 para los valores máximos y en la 5.2.33 para los mínimos.

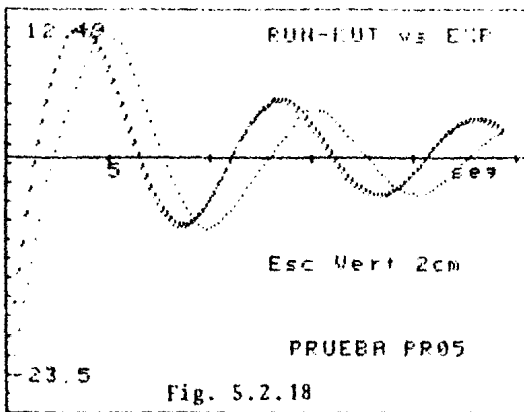
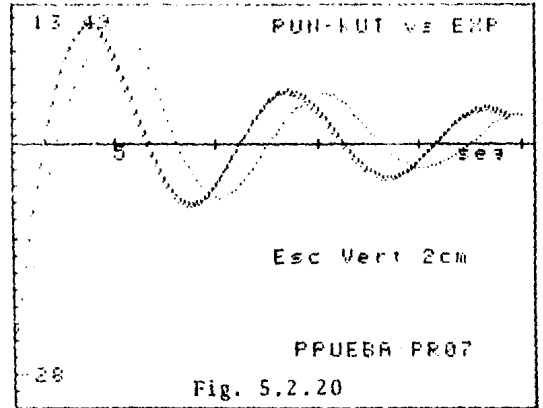
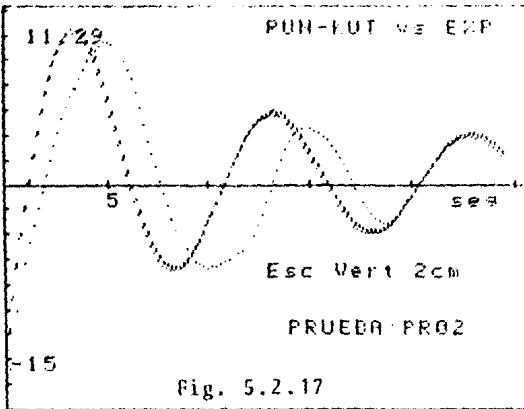
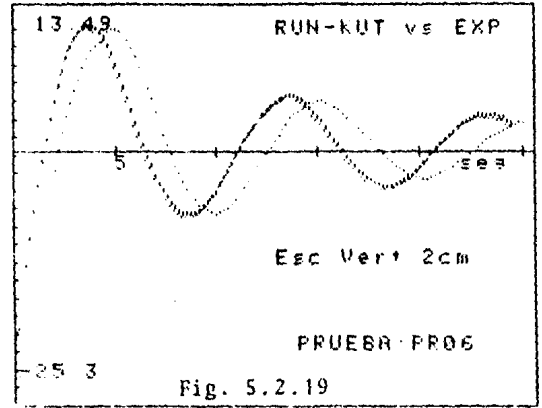
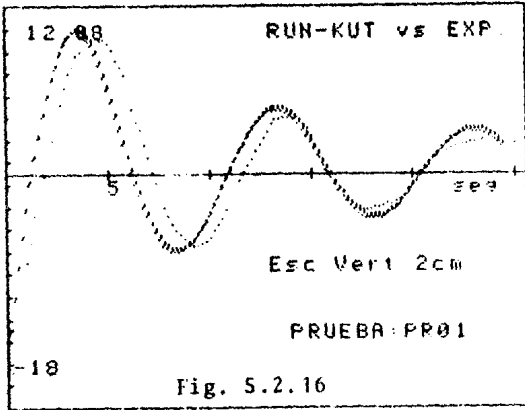




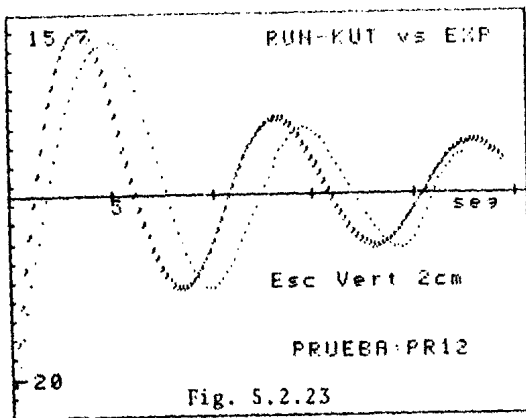
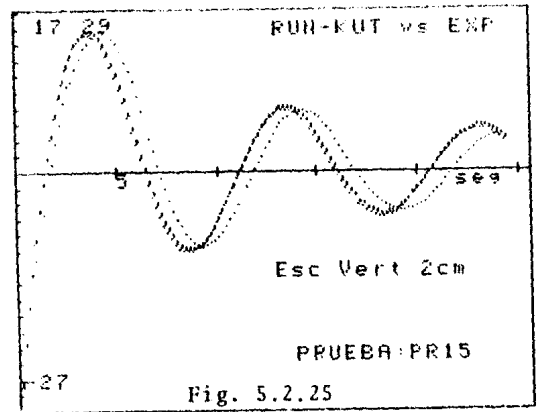
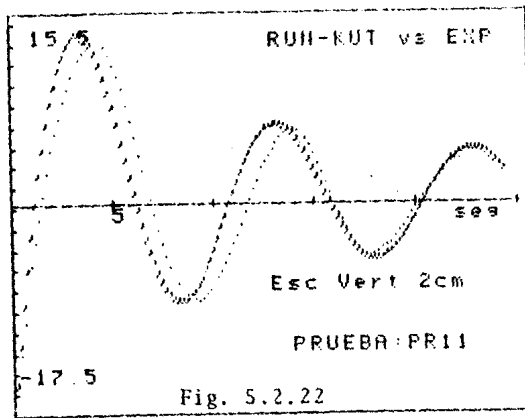
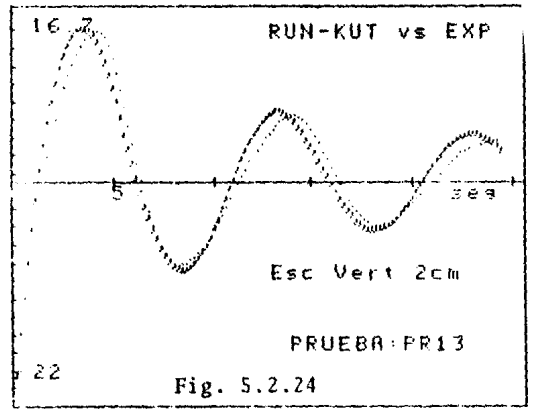
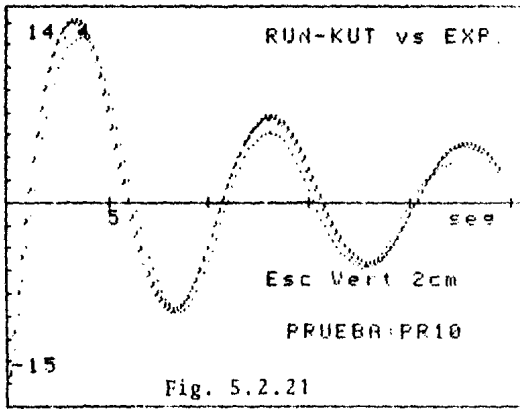
Figuras de 5.2.6 a 5.2.10.  
Comparación del método de Scimemi y los valores experimentales para la cámara Estrangulada.



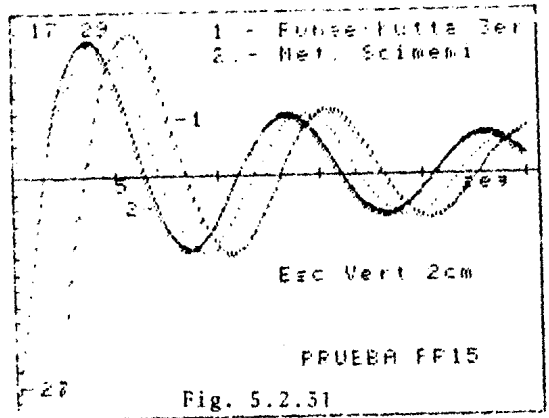
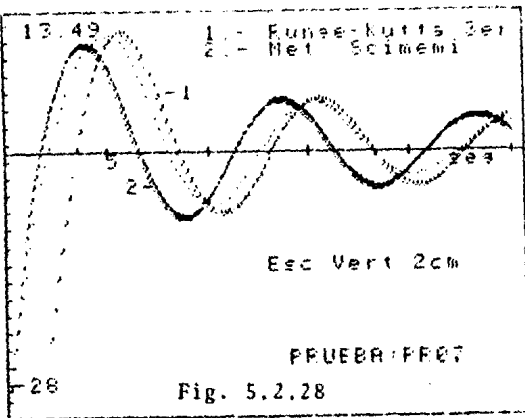
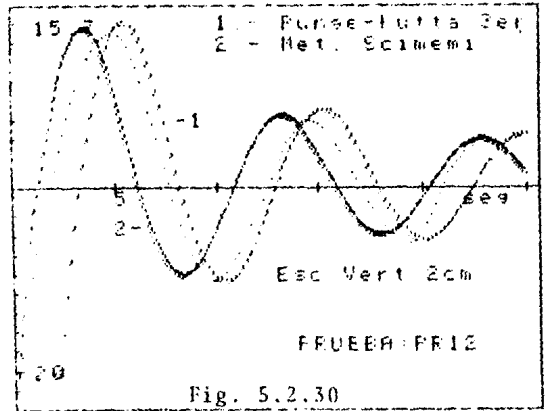
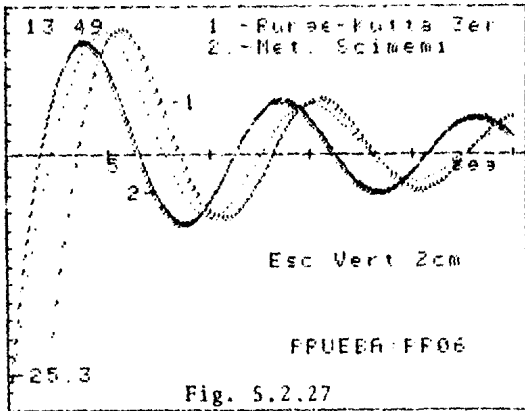
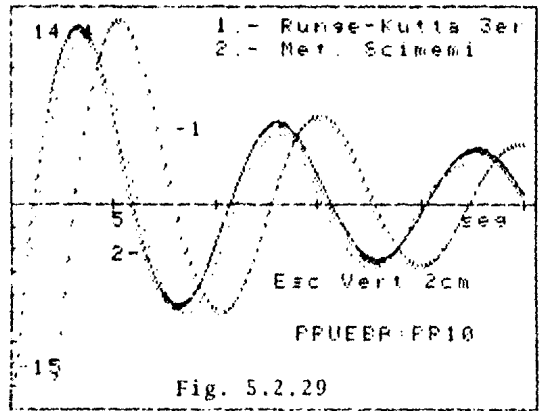
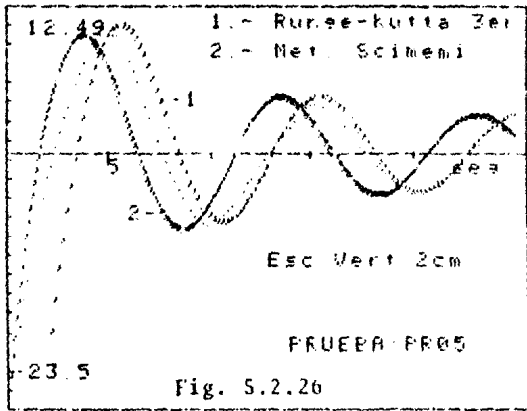
Figuras de 5.2.11 a 5.2.15.  
Comparación del método de Scimemi y los valores experimentales para la cámara Simple.



Figuras de 5.2.16 a 5.2.20.  
Comparación del método de Runge-Kutta (3er. orden) y los valores experimentales para la cámara Estrangulada.



Figuras de 5.2.21 a 5.2.25.  
Comparación del método de Runge-Kutta (3er. orden) y los valores experimentales para la cámara Simple.



Tipo	Prueba	z <sub>0</sub> (-) (cm)	Experimental		Scimemi		R. K. (3ro)		% Diferencia	
			T seg	z <sub>max</sub> (cm)	T seg	z <sub>max</sub> (cm)	T (seg)	z <sub>max</sub> (cm)	Scimemi %	R. Kutta %
COE	3	13.0	3.5	11.0	3.2	11.3	3.2	11.4	2	3
	2	15.0	4.8	11.3	3.3	11.6	3.2	11.9	2	5 **
	1	18.0	4.3	12.1	3.4	11.8	3.4	12.5	- 2 *	3
	4	20.0	4.3	12.5	3.5	11.9	3.4	12.8	- 4	2
	5	23.5	4.6	12.5	3.6	12.0	3.4	13.1	- 4	4
	6	25.3	3.8	13.5	3.7	12.0	3.6	13.4	-11 **	-1
	7	28.0	4.5	13.5	3.8	12.0	3.6	13.5	-11 **	0 *
	8	29.9	4.8	13.3	3.9	11.9	3.6	13.6	-10	2
COS	9	13.0	4.3	14.2	3.0	14.5	3.0	15.0	2	5
	10	15.5	3.5	14.5	3.1	15.1	3.2	15.7	4	8 **
	11	18.0	4.0	15.5	3.2	15.4	3.2	16.1	0 *	3
	12	20.0	4.2	15.7	3.3	15.8	3.2	16.5	1	5
	13	22.0	4.0	16.7	3.3	16.0	3.4	16.7	- 4	0 *
	14	24.8	4.8	16.8	3.4	16.1	3.4	16.9	- 4	0
	15	27.0	4.0	17.3	3.5	16.2	3.6	16.9	- 6 **	-2

Tabla 5.2.32. Resultados numéricos y porcentajes de diferencia entre los métodos de solución numérica y los datos experimentales. (Valores --- MAXIMOS).

\* Errores mínimos  
 \*\* Errores máximos

Tipo	Prueba	z <sub>0</sub> (-) (cm)	Experimental		Scimemi		R. K. (3ro)		Diferencia	
			T seg	z <sub>min</sub> (cm)	T seg	z <sub>min</sub> (cm)	T seg	z <sub>min</sub> cm	Scimemi %	R.K. %
COE	3	13.0	8.7	5.5	8.0	7.9	8.0	6.9	25 **	20 **
	2	15.0	9.8	6.8	8.1	8.0	8.2	7.1	17	4
	1	18.0	9.2	6.7	8.2	8.1	8.2	7.3	20	6
	4	20.0	9.1	6.9	8.3	8.2	8.4	7.4	15	6
	5	23.5	9.6	7.5	8.5	8.2	8.4	7.5	8 *	0 *
	6	25.3	8.8	7.1	8.5	8.2	8.4	7.6	13	7
	7	28.0	9.6	6.6	8.7	8.2	8.6	7.6	19	13
	8	29.9	9.8	6.7	8.8	8.2	8.6	7.6	18	11
COS	9	13.0	9.3	9.9	7.9	9.1	8.0	9.6	- 8 **	- 3
	10	15.5	8.4	9.8	8.0	9.4	8.0	9.9	- 4	1 *
	11	18.0	9	9.6	8.1	9.5	8.2	10.0	- 1	4
	12	20.0	9.3	10.0	8.2	9.6	8.2	10.2	- 4	2
	13	22.0	8.0	9.5	8.2	9.7	8.2	10.3	2	7 **
	14	24.8	9.6	9.8	8.3	9.8	8.4	10.3	0 *	4
	15	27.0	9.0	9.6	8.4	9.8	8.4	10.4	2	7 **

Tabla 5.2.33. Resultados numéricos y porcentajes de diferencia entre los métodos de solución numérica y los datos experimentales. (Valores --- MINIMOS).

\* Errores mínimos  
 \*\* Errores máximos.

## 6. CONCLUSIONES

Las oscilaciones presentan, si hablamos de magnitudes en cuanto a valores máximos, una relación casi lineal en función del valor de la  $z_0$ . En la gráfica 4.2.26.g, se muestra dicha relación con  $z_0$ , que a fin de cuenta es relación del cuadrado del gasto y de la carga en el embalse. Comparando los valores en las dos cámaras, es posible detectar que para la simple, (que tiene realmente el orificio restrictor y la ampliación gradual) se presentan mayores ascensos que para la cámara estrangulada (ampliación brusca pero con cambio de dirección de diámetro constante).

Por el contrario, en el descenso se obtienen valores, en cuanto a magnitud, similares para ambos pozos. Es decir, las pérdidas que presenta la ampliación brusca son más importantes que el efecto de aumento de carga debido a la presencia de un orificio.



La variación debida a la disminución de carga por el cambio de diámetros en la "te" ó cambio de sentido del flujo, aunado a que en la cámara estrangulada se presenta, en el descenso de la oscilación, una contracción brusca que no provoca tantas pérdidas como en el ascenso, son las dos razones para que la magnitud entre las diferencias de los máximos y mínimos se mantenga con un valor casi constante a lo largo de la gráfica antes mencionada, es decir, no presenta disminución que se compense en la gráfica.

Dentro de una misma cámara el efecto de aceleración (inercia) de masa, no es de efectos despreciables como se supone en la teoría de cámaras de oscilación. Esto se puede apreciar observando las figuras 4.2.29 y 4.2.30, donde se observa que el aceleramiento, sobre todo en la cámara simple, es mayor en las pruebas con mayor carga y el descenso obtiene valores mayores que para las mismas condiciones de  $z_0$  con una carga menor en el embalse.

En cuanto a los métodos numéricos, se presenta una valuación comparativa donde el método de Runge-Kutta toma valores mas cercanos consistentemente que el método de Scimemi. Aunque el citado método de Scimemi, vale la pena aclararlo, presenta valores bastante aproximados en el caso de la cámara simple.

Cabe aclarar que el método de Scimemi es uno de los recurrentes más simples y tiene como orden de error el intervalo de tiempo al cuadrado, mientras que el método de Runge-Kutta tiene como error del --

orden: incremento de tiempo a la cuarta, es decir, que para ser congruentes en la comparación el incremento de tiempo que le correspondería a Scimemi sería de 0.04 seg.. Se tomó el valor de 0.1 por la comparación de las figuras 5.2.2 y 5.2.3, en donde para este valor converge a los teóricos máximos y mínimos. Si se usará 0.04 es posible que Scimemi converga a los valores experimentales.

En las gráficas comparativas del método de Runge-Kutta y las oscilaciones experimentales, figuras de la 5.2.16 a la 5.2.25, y de la tabla de valores numéricos 5.2.32 y 5.2.33, el ascenso del método generalmente excede al valor experimental para ambos pozos en un promedio del 4%. En el descenso excede su valor, siendo mayor para la cámara estrangulada con un promedio de 8% y para la simple con una diferencia promedio del 5%.

De la misma tabla se puede observar que los tiempos entre métodos no varía más de 0.2 segundos, a excepción de la prueba número 8, que presenta una variación de 0.3 segundos, representando una vez y media el incremento de tiempo del método de Runge-Kutta. En los demás casos se puede desprestigiar esta diferencia ya que el error es precisamente igual al incremento de tiempo utilizado, por lo que puede asumirse que no existe error en el tiempo entre métodos, pero que al compararse con los datos experimentales no coinciden.

Esto puede deberse a la suposición de masa en el pozo despreciable, y que en realidad sea de importancia en cuanto a la amplitud de oscilaciones.

\* Recomendaciones para una futura investigación sobre los mismos pozos de oscilación:

- 1.- Incluir en la ecuación dinámica los efectos del cambio de cantidad de movimiento, es decir, tomar en cuenta la inercia de la cámara en relación con la conducción, mediante el criterio de longitud equivalente.
- 2.- Ajustar los valores de los coeficientes de pérdida, especialmente en los descensos de la cámara estrangulada. La variación que sufren estos coeficientes, para efectos de este trabajo se muestran en la tabla 5.2.5., donde se observa que para los descensos los valores aumentan y ésto se contrapone a la conclusión dada al principio de la magnitud constante a lo largo de la gráfica 4.2.26.g.
- 3.- Tratar de medir experimentalmente los valores de pérdidas totales una vez establecido el sistema y antes del transitorio, tratando de valuar correctamente este valor, ya que como se puede apreciar en la tabla 4.2.1, las diferencias entre  $z_0$  medida y la  $z_0$  calculada pueden deberse a que en la construcción del cambio de dirección en la cámara estrangulada se puedan provocar separaciones de flujo que presenten succiones y así mayores pérdidas que las calculadas, afectando a los resultados en las oscilaciones.

Es conveniente llevar a cabo las recomendaciones uno a tres en forma simultánea para evitar posibles errores de cálculo futuro.

## 6.1) APENDICE

CAT	NAME	TYPE	BYTES	RECS	FILE
	CARGA	PROG *	256	50	1
	PR01	DATA	1208	1	2
	PR02	DATA	1208	1	3
	DATEXP	PROG	256	3	4
	GRAFIC	PROG *	256	8	5
	PR03	DATA	1208	1	6
	PR04	DATA	1208	1	7
	PR05	DATA	1208	1	8
	PR06	DATA	1208	1	9
	DATA02	PROG	256	21	10
	PR07	DATA	1208	1	11
	PR08	DATA	1208	1	12
	PR09	DATA	1208	1	13
	PR10	DATA	1208	1	14
	DATA03	PROG	256	22	15
	PR11	DATA	1208	1	16
	PR12	DATA	1208	1	17
	PR13	DATA	1208	1	18
	PR14	DATA	1208	1	19
	DATA04	PROG	256	23	20
	PR15	DATA	1208	1	21
	PR16	DATA	1208	1	22
	PR17	DATA	1208	1	23
	PR18	DATA	1208	1	24
	PR19	DATA	1208	1	25
	DATA05	PROG	256	20	26
	SCIMEM	PROG	256	12	27
	SCMTE0	PROG	256	69	28
	RUNKUT	PROG	256	25	29
	SCM02	PROG *	256	21	30
	TEOSC2	PROG *1	256	23	31
	RK	PROG	256	23	32
	RK1	PROG *	256	22	33

CATALOGO CASSETTE #1  
 TESTS LICENCIATURA  
 CAMARAS DE OSCILACION  
 LEON VIZCHINO LUIS F.  
 MAYO DE 1984

Tabla (listado) Catalogo de programas y datos  
 utilizado en el presente trabajo.  
 CASSETTE #1 (HP-85 Tesis)

## PROGRAMA PROG. 6.1 "CARGA"

```

10 ! *** INTERPOLACION
20 ! *** TESIS POZOS OSCILACION
30 ! *** PROG. LUIS F. LEON
40 ! PLOT I,SIN(I)
50 ! *** MAYO 1984
60 CLEAR @ DIM A(2,400),B(150)
70 D0,S0=0 @ DIM P$(18)
80 DISP "CARGADOR RESULTADOS EXP.*****"
90 DISP "PRUEBA #";
100 INPUT P$
110 DISP "NIVEL ESTATICO";
120 INPUT C1
130 DISP "VALOR -Z0";
140 INPUT Z0
150 DISP "Tiempo inicial=";
160 INPUT T1
170 DISP "Tiempo pico=";
180 INPUT T2
190 DISP "# Valores intermedios=";
200 INPUT N
210 D=(T2-T1)/N
220 CLEAR @ DISP "Valores experimentales:"
230 FOR I=1+S0 TO N+S0
240 D0=D0+D
250 A(1,I)=D0
260 READ A(2,I)
270 DISP "# de imagen";I;"=";A(2,I)
280 NEXT I
290 T1=T2
300 S0=S0+N
310 DISP @ DISP "Otro rango (SI=1 / NO=2)"
320 INPUT R5
330 IF R5=1 THEN GOTO 170
340 CLEAR @ BEEP 50,50 @ DISP "INICIO INTERPOLACION....."
350 T=.2 @ J=1
360 FOR I=1 TO S0
370 IF T>A(1,I) THEN 410
380 B(J)=C1-((A(2,I)-A(2,I-1))/(A(1,I)-A(1,I-1))*(T-A(1,I-1))+A(2,I-1))
390 J=J+1
400 T=T+.2
410 NEXT I
420 DISP @ DISP "INTERPOLACION TERMINADA....."
430 B(0)=Z0
440 FOR I=1 TO J-1
450 IF B(I-1)<B(I) THEN 480
460 SCALE 0,25.6,B(0)-3,B(I)+3
470 GOTO 490
480 NEXT I
490 YAXIS 0,2
500 XAXIS 0,5
510 T=0
520 FOR I=0 TO J-1
530 MOVE T,B(I)
540 LABEL ". ."
550 T=T+.2
560 NEXT I
570 BEEP 75,75 @ PAUSE
580 CREATE P$,1,1208

```

```
590 ASSIGN# 1 TO P$
600 PRINT# 1,1 ; B()
610 BEEP 30,30 @ END
```

-77-

Prog. 6.1 "CARGA" Captura e interpolación de datos experimentales.

```
PROGRAMA PROG. 6.2 "GRAFIC"
10 ! *** GRAFICA RESULTADOS
20 ! *** LUIS F. LEON MAY 84
30 ! *** TESIS LICENCIATURA
40 CLEAR @ DISP "PRUEBA A GRAFICAR (PR??)" @ DIM P$(181),B(150)
50 INPUT P$
60 DISP "# de Valores en el vector"
70 INPUT J
80 ASSIGN# 1 TO P$
90 READ# 1,1 ; B()
100 FOR I=1 TO 80
110 IF B(I)<B(I+1) THEN 140
120 SCALE 0,25.6,B(0)-3,B(I)+3
130 GOTO 150
140 NEXT I
150 YAXIS 0,2
160 XAXIS 0,5
170 FRAME
180 MOVE 14,B(0)+3
190 LABEL "PRUEBA:";P$
200 MOVE .3,B(0)
210 LABEL B(0)
220 MOVE .3,B(I)
230 LABEL INT(B(I)*100)/100
240 MOVE 5,-2
250 LABEL "5"
260 MOVE 22,-2
270 LABEL "seg"
280 MOVE 13,B(0)/2
290 LABEL "Esc Vert 2cm"
300 ! **GRAFICA RESULTADOS
310 T=0
320 FOR I=0 TO J
330 MOVE T,B(I)
340 LABEL ". "
350 T=T+.2
360 NEXT I
370 BEEP 50,50 @ END
```

Prog. 6.2 "GRAFIC" Lee el vector prueba, escala y grafica.

```
PROGRAMA PROG. 6.4 "RUNKUT"
10 CLEAR
20 ! *** RUNGE KUTTA 3er ORDEN
30 ! *** PROG LUIS F. LEON
40 ! *** TESIS MAYO 1984
50 READ A9,AB,L,D1
60 DATA .0182414,.00316692,4,.0635
70 DISP "POZOS OSCILACION" @ DISP "DATOS" @ DISP "Area camera=";A
9 @ DISP "Area galeria=";AB
80 DISP "Longitud=";L @ DISP "Diametro=";D1
90 DISP @ DISP "CONDICIONES INICIALES:"
95 DISP "Inc.Tiempo ="
96 INPUT T1
100 DISP "GASTO=";
110 INPUT Q@ D=Q/1000/A9
120 DISP "Z0=";
130 INPUT Z0
140 DISP "INTRODUCE PERDIDAS LOCALES"
150 DISP "Valor (-) B1="
160 INPUT L1
170 DISP "Valor (+) B2="
180 INPUT L2
190 T=0 @ I=0
200 CLEAR @ DISP "RUNGE KUTTA....CALCULANDOSE.." @ DIM H(500)
210 DISP "*****ESPERE..."
220 H(0)=Z0
230 Z=Z0
240 Z1=D
250 A=9.81*AB/(L*A9)
260 V1=A9/AB*D
270 IF V1>0 THEN 300
280 X=L1
290 GOTO 310
300 X=L2
310 B=X*(A9/(2*L*AB))
320 GOSUB 590
330 A1=T1*W
340 B1=T1*Z1
350 Z=Z0+B1/3
360 Z1=D+A1/3
370 GOSUB 590
380 A2=T1*W
390 B2=T1*Z1
400 Z=Z0+2*B2/3
410 Z1=D+2*A2/3
420 GOSUB 590
430 A3=T1*W
440 B3=T1*Z1
450 Z2=D+A1/4+3*A3/4
460 I=I+1 @ H(I)=Z0+B1/4+3*B3/4
470 T=T+T1
480 D=Z2
490 Z0=H(I)
500 V1=A9/AB*D
510 IF T>25 THEN 520 ELSE 270
520 T=0 @ M=25/T1
530 FOR I=0 TO M-4
540 MOVE T,H(I)*100
550 LABEL ", "
560 T=T+T1
```

```

570 NEXT I
580 BEEP 50,50 @ END
590 W=-A*Z-B*Z1^2
600 RETURN

```

Prog. 6.4 "RUNKUT" Método de Runge-Kutta de 3er. Orden.

```

PROGRAMA PROG. 6.3 "SCIMEM"
10 ! *** SCIMEMI CORREGIDO
20 ! *** POZOS OSCILACION
30 ! *** PROG. LUIS F. LEON
40 ! *** TESIS LICENCIATURA
50 ! *** MAYO DE 1984
60 READ A1,A2,L,G
70 DATA .00316692,.0182414,4,9.81
80 CLEAR @ DISP "VALORES CONSTANTES:"
90 DISP "Area tuberia=";A1
100 DISP "Area camara=";A2
110 DISP "Longitud tub=";L
120 DISP @ DISP "CONDICIONES INICIALES"
130 DISP "Z0 (-)=";@ INPUT Z0
140 DISP "Q (l/s)=";@ INPUT Q
150 Q1=Q/1000 @ V0=Q1/A1 @ DIM Z(500)
160 DISP "Inc.Tiempo=";@ INPUT T1
170 DISP "COEFICIENTES PERDIDAS"
180 DISP "(V-C) B1=";@ INPUT B1
190 DISP "(C-V) B2=";@ INPUT B2
200 Z(0)=Z0
210 K1=G*T1/L
220 K2=T1*A1/A2
230 Z1=K2*V0
240 Z(1)=Z0+Z1
250 V1=K1*((-1)*Z(1)+B1*V0*V0/(2*G))
260 V=V0 @ I=1 @ T=T1
270 V=V+V1
280 IF V<0 THEN 300
290 B=B1 @ GOTO 310
300 B=B2
310 I=I+1 @ T=T+T1
320 Z1=K2*V
330 Z(I)=Z(I-1)+Z1
340 V1=K1*((-1)*Z(I)+B*V*V/(2*G))
350 IF T<25 THEN 270
360 T=0
370 ! SCALE 0,25.6,-20,15
380 FOR J=0 TO I
390 MOVE T,Z(J)*100
395 T=T+T1
400 LABEL ",,"
410 NEXT J
420 FRAME
430 BEEP @ END

```

Prog. 6.3 "SCIMEM" Método de Scimemi.



## BIBLIOGRAFIA:

- 1.- C.F.E. "Manual de diseño de Obras Civiles", Sección A, Hidrotecnia, Secciones A.2.3 y A.2.6, 1982.
- 2.- Luthe, Olivera, Shutz, "Métodos Numéricos", Limusa, México 1978.
- 3.- Salvador Díaz Maldonado, "Funcionamiento y estabilidad de Cámaras de Oscilación", Tesis de Maestría, México 1982.
- 4.- Chaudhry, M.H., "Applied Hydraulic Transients", Van Nostrand Reinhold, New York, USA, 1979.
- 5.- Aparicio, M.J. y Berezowsky, V.M., "Presentación Adimensional de las oscilaciones en cámaras de oscilación, simple y con orificio.", Artículo del Instituto de Ingeniería.
- 6.- Sotelo, A.G. "Hidraulica General", Volumen I, Limusa, México 1976.
- 7.- Jaeger, C., "Fluid Transients in Hydro-Electric Engineering Practice", Blackie, Glasgow and London, London, 1977