

117
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CALIBRACION DE UN NUEVO
PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO
DE CAMARAS DE OSCILACION.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
LILIA REYES CHAVEZ

MEXICO, D. F.

TELIS CON
FALLA DE ORIGEN

1991



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

INDICE

	PAGINA
I INTRODUCCION	2
II METODOS EXISTENTES PARA EL DISEÑO DE CAMARAS DE OSCILACION	5
II.1 Tipos de Cámaras	6
II.2 Ecuaciones Fundamentales	9
II.3 Métodos de Solución	17
II.4 Método Iterativo	23
II.5 Métodos de Solución numérica de ecuaciones diferenciales	25
II.6 Análisis de Estabilidad	27
III NUEVO CRITERIO PROPUESTO PARA EL DISEÑO DE CAMARAS DE OSCILACION	30
III.1 Ecuaciones de la Cámara de Oscilación	31
IV DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y PRUEBAS REALIZADAS	39
IV.1 Descripción del dispositivo	40
IV.2 Pruebas Realizadas	43
V COMPARACION DE RESULTADOS TEORICOS Y DE LABORATORIO	68
V.1 Pruebas de Cierre	68
V.2 Pruebas de Apertura	69
VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
BIBLIOGRAFIA	81

PAGINA

APENDICE A

82

APENDICE B

86

APENDICE C

103

RESUMEN

La necesidad de lograr un diseño óptimo en las Cámaras de Oscilación da origen al presente trabajo, en donde se enfoca la solución del problema transitorio a partir del desarrollo de la teoría de las ecuaciones diferenciales no lineales. Los principales parámetros involucrados con la duración del transitorio fueron simulados a través de un modelo físico que permitió registrar la onda oscilatoria en cuatro cámaras intercambiables de diámetro variable. Los resultados se muestran de manera gráfica y de ellos se concluye, al establecer la comparación de los valores teóricos con los medidos, la confiabilidad en la simulación con el modelo matemático.

1. INTRODUCCION

El régimen transitorio en conductos a presión se ha caracterizado por describir la variación de las características hidráulicas del fluido dentro de un estado permanente inicial a un permanente final, sus principales componentes son la diferencia de presión ocasionados por la propagación del incremento de la onda de sobrepresión en todas las partes del sistema hidráulico, originando considerables daños.

Sin embargo la combinación de las ondas de sobrepresión, alternadas con espacios de vacíos, son causantes de inexplicables colapsos en las tuberías o en secciones de concreto reforzado, que no fueron diseñadas para resistir tal esfuerzo, obstaculizando así el funcionamiento del sistema hidráulico.

Paralelamente con lo anterior, la presencia de vibraciones hidráulicas puede ocasionar daños que, si son lo bastante fuertes, harán que la planta hidroeléctrica en cuestión sea susceptible de sufrir considerables daños como consecuencia de la resonancia.

La Ingeniería Civil ha considerado cuidadosamente todos los daños

potenciales para las Centrales Hidroeléctricas, estimando los sitios críticos y ubicando en ellos dispositivos de alivio para abatir su probabilidad de falla .

Para el dimensionamiento de los dispositivos de alivio lo más común es obtener la solución numérica utilizando el método de las características que transforma dos ecuaciones diferenciales parciales, la de movimiento y la de continuidad, en cuatro ecuaciones diferenciales totales. Estas ecuaciones son entonces expresadas en diferencias finitas, para usar el método en intervalos de tiempo específicos, y obtener la solución mediante el uso de algún programa de cómputo.

El presente trabajo tiene la finalidad de comprobar de manera experimental, la confiabilidad de un nuevo criterio de evaluación propuesto para lograr un diseño óptimo dentro de las cámaras de oscilación.

Así, el capítulo II presenta los criterios de evaluación existentes, para el dimensionamiento de las cámaras simple y con orificio, ya que será con las que se trabajará en la parte experimental

El capítulo III presenta parte de la teoría del nuevo método para el diseño de las cámaras, adaptando las ecuaciones planteadas a las condiciones del modelo físico.

En el capítulo IV se describe al dispositivo experimental empleado en la simulación del fenómeno transitorio, así como los instrumentos de medición utilizados para el registro de la sobrepresión dentro de las cámaras. Conjuntamente se presentan los valores numéricos de las oscilaciones para un intervalo de tiempo de 19 segundos.

La confiabilidad de la metodología de evaluación se muestra de manera

gráfica en el capítulo V, mediante la simulación del fenómeno transitorio en el dispositivo experimental para que, posteriormente se comparen los resultados con la simulación del transitorio empleando el modelo matemático.

Los comentarios, recomendaciones y conclusiones derivadas de la comparación de las gráficas obtenidas se expresan en el capítulo VI.

El Apéndice A muestra el listado del programa manejando la teoría propuesta en el capítulo III incluyendo las adaptaciones para su utilización en el modelo experimental.

Por último el apéndice B reúne de manera tabular los valores de las oscilaciones medidas en el modelo físico como las obtenidas en la simulación por computadora.

II METODOS EXISTENTES PARA EL DISEÑO DE CAMARAS DE OSCILACION

Un dispositivo eficaz para controlar las ondas de presión o golpe de ariete es la cámara de oscilación que transforma las ondas de presión en oscilaciones de masa mucho más lentas y con menor amplitud.

El diseño de las cámaras debe contemplar principalmente, el reducir la magnitud de las fluctuaciones de presión en una maniobra de cierre, el mejorar las características de regulación en la turbina y proporcionar la masa de agua necesaria para las maniobras de arranque de la planta. De acuerdo al volumen de agua manejado en la línea de conducción se puede realizar una combinación entre las dimensiones de la cámara, con la forma de la misma, de tal manera que el amortiguamiento de la onda de presión se lleva a cabo en el menor tiempo posible.

En los siguientes subcapítulos se presentará una clasificación de las cámaras de oscilación, así como los criterios existentes para su diseño.

II. 1 TIPOS DE CAMARAS

La elección del tipo de cámara se hace buscando una solución óptima del funcionamiento hidráulico, de los factores económico y constructivo. En función de estos factores se diseñan las cámaras, dependiendo de las necesidades del sistema. A continuación se presenta la clasificación de las cámaras de acuerdo a lo expresado en la referencia 1.

I. De acuerdo con su posición relativa a la casa de máquinas:

1. CAMARA AGUAS ARRIBA

Generalmente está colocada en la unión de la tubería de presión con el túnel, lo más cerca posible de las turbinas.

2. CAMARA AGUAS ABAJO

Se emplea cuando el túnel de desfogue es largo. Este diseño se justifica para prevenir la separación de columna del agua (caso de cierre rápido) y la presión excesiva (caso de una apertura rápida) en el tubo de succión y/o en el túnel de desfogue.

II. De acuerdo con su geometría:

1. CAMARAS DE OSCILACION SIMPLE

Esta cámara constituye el tipo más sencillo, debido a que esta cámara de hecho no posee resistencia al flujo en su base, requiere gran inercia para lograr su estabilidad y, por tanto su sección transversal debe ser muy grande. Sin embargo dicha inercia se contrapone a la necesidad de variaciones rápidas en el nivel de la superficie libre, las cuales deben ocurrir para que el líquido en el túnel sea acelerado con la velocidad que requieren las necesidades de generación.

2. CAMARAS ESPECIALES

2.1 CAMARAS CON EXPANSIONES O GALERIAS

Se emplea cuando se tienen cargas estáticas altas (350 m), túneles muy largos, variaciones considerables del nivel en el vaso o si se

desea evitar oscilaciones demasiado grandes.

El área de la sección transversal de esta cámara, A_2 , se reduce lo más posible para favorecer la operación de la turbina y que el flujo en el túnel se acelere o retarde con rapidez. Un arreglo de este tipo consiste básicamente en dos expansiones conectadas entre sí por una lumbrera casi siempre vertical, de diámetro relativamente reducido, llamada elevador.

Generalmente la galería superior se localiza arriba del nivel de aguas máximas (NAME) y la inferior por debajo del nivel de aguas mínimo (NAMINO) del embalse.

El funcionamiento de este dispositivo puede resumirse como sigue: en un cierre del distribuidor, el nivel del líquido en el elevador sube rápidamente hasta la expansión superior y esta inicia su llenado; por el aumento del área, las oscilaciones reducen su amplitud. La variación inicial rápida del nivel en la cámara produce la desaceleración inmediata de la masa líquida en el túnel. En un arranque de las turbinas, el nivel en el elevador desciende rápidamente hasta la expansión inferior, lo cual favorece la aceleración del líquido en el túnel; al aumentar el área, la oscilación es menor y más lenta. Durante la operación normal y para pequeñas variaciones de carga, el nivel se encuentra siempre en el elevador.

2.2 CAMARAS CON ORIFICIO

En este caso, la unión entre la cámara y el conducto se encuentra restringida por un orificio, el cual permite reducir la amplitud y duración de las oscilaciones mediante las pérdidas que produce el estrangulamiento, lo cual favorece la estabilidad sin tener que incrementar su sección logrando que pueda responder a las variaciones de producción con mayor rapidez que el tipo simple.

3. CAMARA DIFERENCIAL O DE JOHNSON

Está formado por dos elementos: un tubo central (cuyo diámetro es aproximadamente igual al del túnel) con orificio en su parte inferior, llamado elevador, y una cámara principal. Al presentarse una maniobra de cierre, el nivel en el elevador sube rápidamente y provoca la desaceleración del agua en el túnel; mientras tanto, el líquido de la cámara principal responde con lentitud. El tubo central puede verter hacia la cámara principal, manteniendo casi constante su carga respecto al túnel. Por otro lado, cuando se arrancan las turbinas, el nivel en el elevador desciende rápidamente, y proporciona una pronta respuesta en la aceleración del líquido en la tubería de presión; mientras el agua en el túnel se acelera, la cámara principal alimenta al elevador a través de los orificios.

III. De acuerdo con su localización relativa al terreno:

1. CAMARA EXCAVADA
2. CAMARA SUPERFICIAL
3. CAMARA MIXTA

IV. Casos especiales: Estos casos involucran arreglos más complejos de cámaras de oscilación. Los más destacados son:

1. Instalación de varias cámaras en el túnel. Se utiliza por ejemplo, para ampliar la capacidad de la planta, cuando el diseño de una sola cámara implica dimensiones muy grandes, o bien cuando la construcción de este arreglo ofrece ventajas.
2. Instalación de dos cámaras, con la turbina entre ambas. Se emplea cuando se tienen túneles de presión y de desfogue largos.
3. Instalación de cámaras en sistemas de conducción con dos embalses.

También se puede hacer combinaciones de varios tipos de cámaras, pero todas deben ser diseñadas tomando en cuenta la economía, el

funcionamiento y la estabilidad del sistema.

Una observación inicial es que el espacio entre la parte superior de la cámara y la superficie libre del agua no debe quedar completamente cerrado; por ello, las cámaras excavadas requieren ventilaciones, con suficiente sección transversal para permitir el flujo de aire. Si se cierra dicho espacio, se tendrá una cámara neumática o de aire.

1. CAMARA DE AIRE

Esta puede ser la solución en los casos en que sea muy difícil y caro instalar cámaras convencionales. Si la cámara de aire se encuentra bien dimensionada, su análisis es idéntico al de las cámaras de oscilación convencional durante el movimiento rápido del golpe de ariete; durante las oscilaciones posteriores debe emplearse la ley de compresión isotérmica.

II. 2 ECUACIONES FUNDAMENTALES

De acuerdo al desarrollo de la teoría golpe de ariete expuesta en las referencias 2 y 3, se partirá de las siguientes suposiciones:

- a) El flujo es unidimensional
- b) Las paredes del túnel son rígidas
- c) El área del túnel es constante en toda su longitud
- d) El agua se comporta como un fluido incompresible
- e) La masa de agua contenida en la cámara de oscilación es muy pequeña comparada con la del túnel y, por tanto, puede despreciarse.

A continuación se hará el análisis de las ecuaciones fundamentales para los casos de cámaras simples y con orificio, dado que el desarrollo para las otras cámaras es similar.

A) CAMARAS DE OSCILACION SIMPLE

ECUACION DINAMICA

Aplicando la ecuación de cantidad de movimiento, en el diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura 2, se obtienen las siguientes expresiones:

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

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

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

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

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

Por otro lado aplicando la segunda ley de Newton:

$$\sum F_x = m a_x \quad (11.2.1)$$

Tomando del segundo miembro la aceleración:

$$\bar{a} = \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v}{\partial t}$$

Al ser la inercia del líquido despreciable y por la suposición a):

$$\frac{\partial v}{\partial x} \frac{dx}{dt} = 0$$

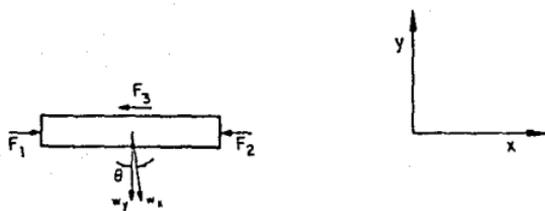
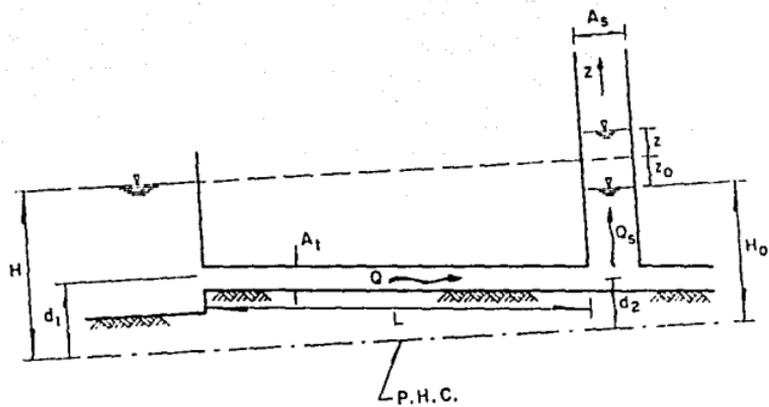


Fig 2 D.C.L. en cámara de oscilación simple

Sustituyendo la ecuación (II.2.1) las fuerzas expresadas en (a), (b), (c), (d) y la aceleración obtenida, se tiene simplificando:

$$H - h - \frac{\tau_0 L}{\gamma R_h} - \frac{L}{g} \frac{D\bar{v}}{Dt} = 0 \quad (\text{II.2.2})$$

En la ecuación anterior, el término τ_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 las pérdidas por fricción $h_f = s_f L$, más las pérdidas por entrada en la conducción $h_1 = K_1 v^2 / 2g$. Las de fricción podrán ser calculadas por cualquier fórmula para flujo uniforme, basándonos en la hipótesis de que son válidas durante el transitorio.

En resumen las pérdidas podrán quedar expresadas de la siguiente forma:

$$z_0 = \frac{f L}{D} \frac{v^2}{2g} + K_1 \frac{v^2}{2g} \quad (\text{II.2.3})$$

Regresando a la ecuación (II.2.2), como $H - h = -z$, y sustituyendo en ésta las ecuaciones arriba descritas se tendrá:

$$\frac{L}{g} \frac{d\bar{v}}{dt} = -z - z_0 \quad (\text{II.2.4})$$

Como se observa en la expresión (II.2.3), las pérdidas z_0 se pueden representar como un factor de la velocidad al cuadrado, dicha ecuación finalmente se puede expresar como:

$$\frac{L}{g} \frac{d\bar{v}}{dt} = -z \pm F v^2 \quad (\text{II.2.5})$$

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, de acuerdo al criterio manejado en la referencia 4.

ECUACION DE CONTINUIDAD

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

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

También:

$$Q_u = A_u \frac{dz}{dt}$$

Por otro lado, al tratarse de cierre instantáneo, se tiene:

$$Q_{tp} = 0$$

Finalmente la ecuación de continuidad que se manejará es:

$$Q = Q_u = A_u \frac{dz}{dt} \quad (II.2.6)$$

B) CAMARAS CON ORIFICIO O ESTRANGULADAS

ECUACION DE CONTINUIDAD

La ecuación de continuidad es:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{A_T v - Q_T}{A_u} \quad (II.2.6)$$

ECUACION DINAMICA

Al considerar el efecto del orificio conviene recordar que en la deducción de la ecuación del movimiento, la resultante incluye las fuerzas de presión. Si se considera que el punto 2 (ver figura 3) está en el túnel inmediatamente debajo del orificio, la presión en dicho punto será:

$$P_2 = \rho g (H_a + z_o + \Delta h) \quad (II.2.8)$$

dado que Δh es la diferencia de presión (expresada en columna de agua), entre aguas abajo y aguas arriba del orificio, y corresponde a la pérdida de carga provocada por éste.

La ecuación dinámica queda:

$$\frac{L}{g} \frac{dV}{dt} + z + \Delta h + F V |V| = 0 \quad (II.2.9)$$

La pérdida Δh puede calcularse de varias formas. Sea $C_d A_d$ el área del orificio. El flujo por este será:

$$Q_d = \pm C_d A_d \sqrt{2g \Delta h} \quad (II.2.10)$$

donde C_d es el coeficiente de descarga del orificio y A_d es el área de descarga del orificio, además por continuidad, $Q_d = A_s dz / dt$. Sustituyendo esta expresión en la ecuación anterior se obtendrá la siguiente ecuación:

$$\Delta h = \frac{1}{2g (C_d)^2} \left[\frac{A_s}{A_d} \right]^2 \frac{dz}{dt} \left| \frac{dz}{dt} \right| \quad (II.2.11)$$

La pérdida de carga será positiva si el flujo va hacia la cámara ($dz/dt > 0$) y negativa en caso contrario, como resulta al considerar el valor absoluto de la ecuación anterior. También es posible que el coeficiente de descarga del orificio tenga valores distintos en función del sentido de flujo, puesto que puede diseñarse para producir pérdidas mayores en un sentido que en otro.

Si se define:

$$R = \frac{1}{2g (C_d)^2} \left[\frac{A_s}{A_d} \right]^2 \quad (II.2.12)$$

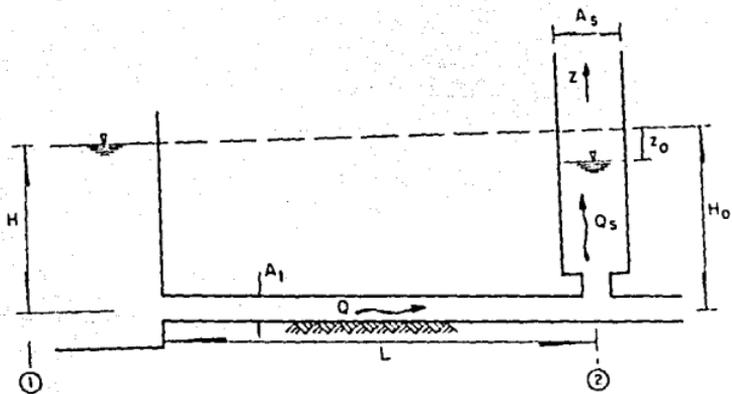


Fig 3 Definición de variables en cámara con orificio

la ecuación dinámica se escribe como:

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} = - \left[z + R \frac{dz}{dt} \left| \frac{dz}{dt} \right| + F V |V| \right] \quad (11.2.13)$$

11.3 METODOS DE SOLUCION

ANALISIS DE LA CAMARA SIMPLE. SOLUCION PARA EL CASO DE FRICCION NULA

Manejando los criterios expresados en la referencia 1, es posible obtener la solución analítica de las ecuaciones dinámica y de continuidad si se desprecian las pérdidas por fricción en el túnel, ya sea en maniobras instantáneas de cierre o de apertura. Al despreciar la fricción, la ecuación dinámica se simplifica como:

$$\frac{dv}{dt} = - \frac{g}{L} z \quad (11.3.1)$$

y la ecuación de continuidad, para el caso de cierre total instantáneo es:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{A_T}{A_u} v \quad (11.3.2)$$

Derivando la ecuación anterior con respecto al tiempo y sustituyendo en la ecuación (11.3.1), resulta:

$$\frac{L}{g} \frac{A_u}{A_T} \frac{d^2 z}{dt^2} + z = 0$$

que es una ecuación diferencial ordinaria homogénea de segundo orden, con coeficientes constantes; su solución general tiene la forma:

$$z = C_1 \cos \sqrt{\frac{g}{L} \frac{A_T}{A_u}} t + C_2 \operatorname{sen} \sqrt{\frac{g}{L} \frac{A_T}{A_u}} t \quad (11.3.3)$$

en la cual C_1 y C_2 son constantes de integración.

Para obtener el valor de las constantes de integración en la ec. (II.3.3) se recurre a las ecuaciones iniciales y de frontera, es decir se considera que $V_T = V_0$ y $z = 0$ dado que no existe fricción. Por lo tanto:

$$C_1 = 0 \quad \text{y} \quad z = C_2 \text{ sen } (2\pi t/T)$$

dado que C_2 corresponde a la semiamplitud de la oscilación (z_0), por lo tanto, la ecuación que representa las oscilaciones para el caso de fricción nula es:

$$z = z_0 \text{ sen } (2\pi t / T) \quad (II.3.4)$$

Para obtener la semiamplitud z_0 se deriva la ecuación (II.3.4), con respecto al tiempo y se iguala con la ecuación (II.3.2)

$$\frac{dz}{dt} = z_0 \left[\cos \frac{2\pi}{T} t \right] \frac{2\pi}{T} = \frac{A_T}{A_B} v$$

Para:

$$t = 0, z = 0, v = V_0 \text{ y } \cos (2\pi t/T) = 1$$

Al sustituir el valor del periodo T , y simplificando se obtiene:

$$z_0 = \frac{A_T}{A_B} V_0 \frac{T}{2\pi} = \frac{A_T}{A_B} V_0 \sqrt{\frac{L}{g} \frac{A_S}{A_T}}$$

Finalmente:

$$z_0 = V_0 \sqrt{\frac{L}{g} \frac{A_T}{A_B}} = Q_0 \sqrt{\frac{L}{g A_T A_B}}$$

que es la semiamplitud no amortiguada.

Calame y Gaden (1926) relacionaron las oscilaciones máximas con el

tiempo de cierre, t_c , en forma adimensional, para el caso de cierre no instantáneo y lineal, como se muestra en la siguiente tabla.

$\theta = t_c / T$	z_{max} / z_0
0.00	1.00
0.18	0.98
0.50	0.63
0.75	0.43
1.00	0.32

En cualquier sistema real, el efecto de la fricción si es muy importante, por lo que esta solución puede considerarse poco práctica.

II . 3 . 1 SOLUCION CON GRAFICAS

ANALISIS DE CAMARA SIMPLE

Para el caso de fricción no nula, no existe solución analítica. Sin embargo Calame y Gaden, introduciendo parámetros relativos y variables adimensionales, obtuvieron expresiones que permiten calcular el tamaño de las oscilaciones para maniobras de cierre y apertura de carga instantáneas.

En la figura 4 se muestran las curvas para calcular las oscilaciones máximas en maniobras de cierre total y de apertura total instantánea de carga. Los parámetros que se utilizan son:

$$F_{r0} = F v_0^2 / z_0 \quad ; \quad z_r = z_{max} / z_0$$

donde

z_0 es la semiapertura no amortiguada

F es el factor de pérdidas

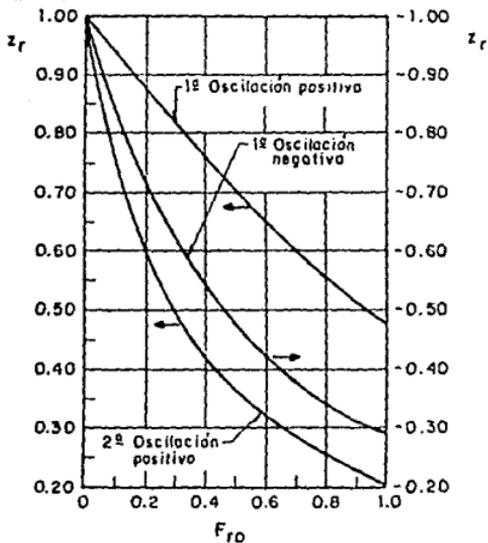


Fig 4 Máximos y mínimos para cierre total en Cámara simple

Estas gráficas son muy útiles para obtener los máximos y mínimos de una forma rápida y precisa, sobre todo en etapas preliminares de diseño, cuando se definen las dimensiones de la cámara, generalmente, por medio de iteraciones.

ANÁLISIS DE CÁMARA CON ORIFICIO O ESTRANGULADA

Para dimensionar el estrangulamiento efectivo, Calame y Gaden, lo definen como aquel en que la suma de $Y = z + \Delta h$, puede hacerse máxima al principio de las oscilaciones y permanece con este valor durante un cuarto de ciclo. Dichos autores encontraron que el orificio óptimo para un área de cámara dada, en una maniobra instantánea de cierre total está dentro del rango:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{4} F_{r0} < r_0 < \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{3}{4} F_{r0}$$

El área menor de esta desigualdad corresponde a la del orificio en el inicio de un cuarto de ciclo, y la mayor, a la de éste al final. Es decir, no existe un área de orificio única. Se sugiere usar el área mayor para diseños preliminares.

La variable Y , es la carga piezométrica calculada para un punto debajo del orificio y referida al nivel del embalse. Calame y Gaden reportan estas cargas piezométricas en forma adimensional. La variable Y_m de la figura 5 es:

$$y_m = Y/z.$$

Donde:

$$y_m = z_r + r_0 (u_r)^2$$

$$u_r = Q_d / Q_0$$

Cualesquiera que sean las áreas del orificio elegidas, se recomienda verificar el comportamiento y , sobre todo, la estabilidad en cada proyecto.

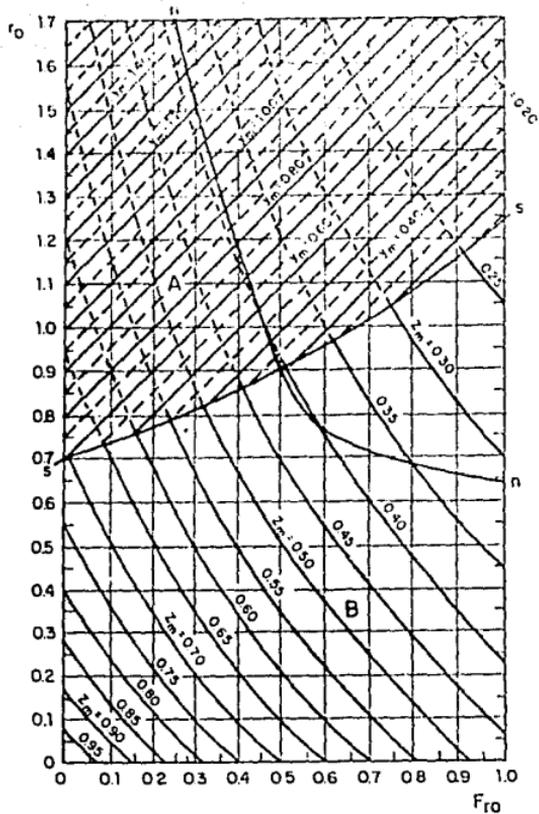


Fig 5 Cámara de oscilación con orificio para cierre total

II. 4 METODOS ITERATIVOS

Una solución analítica de las ecuaciones dinámica y de continuidad es posible solo en algunos casos, por lo tanto, los métodos gráficos son apropiados para el cálculo manual. Sin embargo, con la disponibilidad de las computadoras, los métodos gráficos y aritméticos se han sustituido por simulación analógica o cálculo digital. Estos métodos se han usado tradicionalmente para el cálculo de las oscilaciones. A continuación se describen los más comunes.

a) METODO DE PRESSEL

Las ecuaciones de continuidad y dinámica se escriben en diferencias finitas como:

$$\Delta V = -g \Delta t (z_m + F V_m |V|) / L \quad (II.4.1)$$

$$\Delta z = (V_m A_T - Q_m) \Delta t / A_m \quad (II.4.2)$$

donde

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t \quad (II.4.3)$$

$$z_m = z_i \Delta z / 2 \quad (II.4.4)$$

$$V_m = V_i + \Delta V / 2 \quad (II.4.5)$$

$$Q_m = (Q_{t_i} + Q_{t_{i+1}}) / 2 \quad (II.4.6)$$

Las ecuaciones (II.4.1) y (II.4.2) se resuelven por medio de iteraciones sucesivas. El procedimiento es el siguiente.

1. Se fija un incremento de tiempo, Δt
2. Se supone ΔV y se calculan V_m (ec. (II.4.5) y $F V_m |V_m|$)
3. Se calcula z_m con la ec. (II.4.1)

$$z_m = - \left[\frac{L}{g} \frac{\Delta V}{\Delta t} + F V_m |V_m| \right]$$

4. A partir de la ec. (II.4.4) se calcula $\Delta z = 2 (z_m - z_i)$
5. Se valúa Q_{t_m} , según el tipo de manobra de que se trate

6. Se valúa V'_m de la ecuación (II.4.2)

$$V'_m = \frac{Q_{t_m}}{A_T} + \frac{A_s}{A_T} \frac{\Delta z}{\Delta t}$$

7. Se calcula

$$\Delta V' = 2 (V'_m - V_1)$$

8. Si ΔV del paso 7 es distinto del valor supuesto en el paso 2, se repiten los pasos 2 a 7 hasta que la diferencia entre ellos sea pequeña; entonces, se pasa al siguiente instante de tiempo.

Una variante del método anterior consiste en suponer Δz en lugar de ΔV (útil en el caso de cámaras con expansiones, donde se toma A_s como la medida entre dos z sucesivas). El procedimiento es:

1. Se fija un Δt

2. Se supone un valor de Δz

3. Se calcula z_m en las ecuaciones (II.4.4). En caso de que la cámara sea de sección variable, con z_1 y $z_{1+1} = z_1 + \Delta z$, se calculará A_{n_1}

y $A_{n_{1+1}}$ y $A_{sm} = (A_{n_1} + A_{n_{1+1}}) / 2$

4. Se calcula Q_m de acuerdo al tipo de maniobra

5. Con la ecuación (II.4.2) se obtiene V_m

$$V_m = \frac{Q_m}{A_T} + \frac{A_{sm}}{A_T} \frac{\Delta z}{\Delta t}$$

6. Se calculan

$$\Delta V = 2 (V_m - V_1) \quad \text{y} \quad F V_m |V|$$

7. De la ecuación (II.4.1) se obtiene

$$z'_m = - \left[\frac{L}{g} \frac{\Delta V}{\Delta t} + F V_m |V| \right]$$

8. Se calcula $\Delta z' = 2 (z'_m - z_1)$

9. Se compara Δz del paso 8 con el supuesto en el paso 3; si son suficientemente parecidos, se pasa al siguiente incremento de

tiempo; si no, se repiten los pasos 2 al 8.

El proceso iterativo requiere de cierta experiencia, sobre todo en el primer método expuesto, ya que intuitivamente no se conoce la variación de velocidad y, por tanto, es difícil suponer Δv .

b) METODO DE SCIMEMI

Es una simplificación del método de Pressel, en el que no se consideran valores medios. El procedimiento es el siguiente:

1. Se obtiene Q_{1+1} de la ley de cierre

2. De la ecuación (II.4.2) se obtiene

$$\Delta z_1 = (V_1 A_T - Q_{1+1}) \Delta t / A_s$$

3. Se calcula la z al final del intervalo

$$z_{1+1} = z_1 + \Delta z_1$$

4. Se calcula ΔV_1 con la ecuación (II.4.1)

$$\Delta V_1 = g \Delta t (z_{1+1} + F V_1 |V_1|) / L$$

5. Se obtiene $V_{1+1} = V_1 + \Delta V_1$ y se pasa al siguiente instante.

Para obtener resultados precisos con este método, es necesario usar incrementos ($\Delta t < T / 200$, aproximadamente) ya que las aproximaciones a las derivadas son de primer orden.

II . 5 METODOS DE SOLUCION NUMERICA DE ECUACIONES DIFERENCIALES

Estos métodos han sido desarrollados con el objeto de dar una solución rápida y precisa a sistemas de ecuaciones diferenciales.

De los múltiples métodos existentes se ha seleccionado el de Heun por su sencillez, ya que puede usarse con calculadoras pequeñas, y el de Runge-Kutta por su precisión, eficiencia y adaptabilidad a problemas complejos.

a) METODO DE HEUN

Sea \bar{y} el vector de variables dependientes

$$\bar{y} = \begin{bmatrix} V \\ z \end{bmatrix} \quad \text{o tambien} \quad \bar{y} = \begin{bmatrix} Q \\ z \end{bmatrix}$$

según se utilicen las ecuaciones de continuidad o dinámica. El sistema de ecuaciones diferenciales puede escribirse vectorialmente como:

$$\frac{d\bar{y}}{dt} = \bar{f}(t, \bar{y}) = \begin{bmatrix} \frac{dV}{dt} & \frac{dz}{dt} \end{bmatrix}^T \quad (II.5.1)$$

$$\frac{d\bar{y}}{dt} = \bar{f}(t, \bar{y}) = \begin{bmatrix} \frac{dQ}{dt} & \frac{dz}{dt} \end{bmatrix}^T \quad (II.5.2)$$

Donde la T indica el vector transpuesto, y dV/dt , dz/dt y dQ/dt están dados por las ecuaciones dinámica y de continuidad respectivamente.

Supóngase que se conocen los valores del vector \bar{y} para un tiempo dado t_m (por ejemplo la condición inicial)

$$\bar{y}(t_m = 0) = \bar{y}(0) = \{ V_0 \ z_0 \}^T \quad (II.5.3)$$

$$\bar{y}(t_m = 0) = \bar{y}(0) = \{ V_0 \ z_0 \}^T \quad (II.5.4)$$

o tambien

$$\bar{y}(t_m = 0) = \bar{y}(0) = \{ Q_0 \ z_0 \}^T \quad (II.5.5)$$

para avanzar la solución al tiempo $t_m + \Delta t = t_{m+1}$, en el método de Heun se utilizan las siguientes expresiones:

$$K_1 = \Delta t \bar{f}(t_m, y_m) \quad (II.5.5.a)$$

$$K_2 = \Delta t \bar{f}(t_m + \Delta t, \bar{y}_m + K_1) \quad (II.5.5.b)$$

$$\bar{y}_{n+1} = \bar{y}_n + (K_1 + K_2) / 2 \quad (II.5.5.c)$$

b) METODO DE RUNGE-KUTTA

De la misma manera que con el método de Heun, se parte de una condición inicial, para avanzar la solución del tiempo t_n al $t_{n+1} = t_n + \Delta t$. Se utilizan las siguientes expresiones:

$$K_1 = \Delta t F(t_n, y_n) \quad (II.5.6)$$

$$K_2 = \Delta t F(t_n + \Delta t/2, \bar{y}_n + K_1/2) \quad (II.5.6.a)$$

$$K_3 = \Delta t F(t_n + \Delta t/2, \bar{y}_n + K_2/2) \quad (II.5.6.b)$$

$$K_4 = \Delta t F(t_n + \Delta t, \bar{y}_n + K_3) \quad (II.5.6.c)$$

$$\bar{y}_{n+1} = \bar{y}_n + (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) / 6 \quad (II.5.6.d)$$

Para calcular \bar{y}_{n+2} se utiliza el valor de y_{n+1} corriendo los índices en las ecuaciones anteriores.

II . 6 . ANALISIS DE ESTABILIDAD

Las dimensiones de una cámara de oscilación deben ser tales que la hagan estable para cualquier cambio de demanda, esto es, las oscilaciones en la cámara deben ser amortiguadas.

Conviene que el tiempo de amortiguamiento sea corto; ésto equivale a que la relación entre un tiempo máximo y el anterior (relación de amortiguamiento) sea pequeña.

Existen dos criterios para estudiar la estabilidad; el de Thoma, para

oscilaciones de pequeña amplitud y el método plano fase que relaciona las ecuaciones de continuidad y dinámica con la ecuación de potencia, para posteriormente referirla a un cierto plano. Debido a lo complicado de este criterio, la teoría de Thoma es lo más empleada.

CRITERIO DE AREA DE THOMA.

A partir de la ecuación dinámica de la oscilación y de la ecuación de continuidad para la cámara de oscilación simple, Thoma encontró la siguiente ecuación:

$$A_o = n A_{Th} = n \frac{v_{to}^2}{2g} \frac{L A_t}{c v_{to}^2 H_o} \quad (II.6.1)$$

donde:

- A_o = área horizontal de la cámara, m^2
- n = factor de estabilidad
- A_{Th} = área de Thoma, m^2
- v = velocidad de flujo estable en el túnel, m/s
- g = aceleración de la gravedad, m/s^2
- L = longitud del túnel, m
- A_t = área del túnel, m^2
- c = coeficiente de pérdidas de carga en el túnel, s^2/m
- H_o = carga neta, m .

La teoría de Thoma se ha extendido a todos los tipos y sistemas de cámaras por lo es importante conocer las suposiciones que se hicieron al respecto.

- a) El gobernador conserva la potencia constante
- b) Las oscilaciones en la cámara son pequeñas
- c) La eficiencia de la turbina es constante
- d) Las pérdidas de presión en el tubo son despreciables
- e) La carga de velocidad en el túnel es despreciable
- f) El gobernador es altamente sensible y reacciona inmediatamente
- g) La estación de potencia está aislada

Sin embargo con base en la experiencia práctica, para conseguir un amortiguamiento eficiente, la CFE propone que el diámetro teórico se debe aumentar un 25% en cámaras diferenciales y con orificio, y un 50% en cámaras simples. Lo anterior involucra que los criterios de evaluación hasta ahora existentes, no contemplan en su totalidad los efectos del fenómeno transitorio dentro del sistema hidráulico por lo que resulta necesario incrementar las dimensiones para obtener un diseño funcional.

En el siguiente capítulo se propondrá un nuevo criterio para el diseño de cámaras de oscilación con el cual, se tenga certeza de la confiabilidad de los resultados.

III . NUEVO CRITERIO PROPUESTO PARA EL DISEÑO DE CÁMARAS DE OSCILACION.

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo anterior, se concluye que los problemas originados por la presencia del régimen transitorio son inevitables, tanto en los sistemas de bombeo como en las plantas hidroeléctricas.

En las plantas hidroeléctricas el problema es ocasionado por la presencia de arranques o paros súbitos de energía, cambios de carga, etc. que provocan diferentes situaciones de transitorios, algo similar ocurre con los equipos de bombeo por esta razón, la determinación de las condiciones iniciales de operación son de suma importancia para cualquier secuencia del análisis del fenómeno transitorio, al final del proceso se determinarán las dimensiones de una cámara estable.

A continuación se presentarán las formulaciones de un nuevo criterio de diseño de las cámaras cuya finalidad es eliminar la incertidumbre de los métodos planteados en el capítulo II. Este procedimiento fué originalmente presentado en la referencia 5 de la cual se presentarán los aspectos más relevantes que serán motivo de la comprobación experimental presentada en los siguientes capítulos.

III . 1 ECUACIONES DE LA CAMARA DE OSCILACION .

Para el análisis del diseño de la cámara se considerará que la ubicación de los mismos será tanto aguas arriba como aguas abajo con respecto a la turbina. La ubicación de las cámaras dependerá del problema que se quiera evitar, así una cámara localizada aguas arriba, generalmente se coloca en la unión de la tubería a presión con el túnel, lo más cerca posible de la turbina, mientras que una cámara ubicada aguas abajo se justifica para prevenir la separación de la columna de agua y la presión excesiva en el tubo de succión.

Con referencia a la figura 6.a y 6.b se definirá a la longitud de la tubería con oscilaciones como $L_1 + L_2$ (m), a_1 como el área de la tubería (m^2), A_c como el área de la cámara (m^2), para el cálculo de las pérdidas se considerará un coeficiente de rugosidad según Manning igual a n . La carga total disponible en ambos casos será H (m). Sin embargo la ubicación del P.H.C varlará, para la situación de la cámara ubicada aguas arriba de la turbina, el P.H.C estará situado al nivel del espejo de agua en el embalse, por lo que para la condición inicial o estacionaria la elevación (x_0) será negativa como se observa en la figura 6.a . Para el caso de la ubicación aguas abajo de la turbina, se tendrá que el P.H.C estará localizado al nivel del espejo de agua de la descarga o desfogue, por lo que la elevación en la condición inicial será positivo como se observa en la figura 6.

Considerando que el fenómeno transitorio se producirá cuando exista una variación en la potencia total de generación, es decir, al provocar un cierre o una abertura brusca dentro de la tubería de alimentación de la turbina se pasará subitamente de generar una potencia inicial M_0 a una potencia final M_f , es decir:

$$M_f = f M_0$$

Ahora, interrelacionando la operatividad de la turbina ante un cambio de potencia con las condiciones hidráulicas para ese momento, se obtiene una ecuación de la forma:

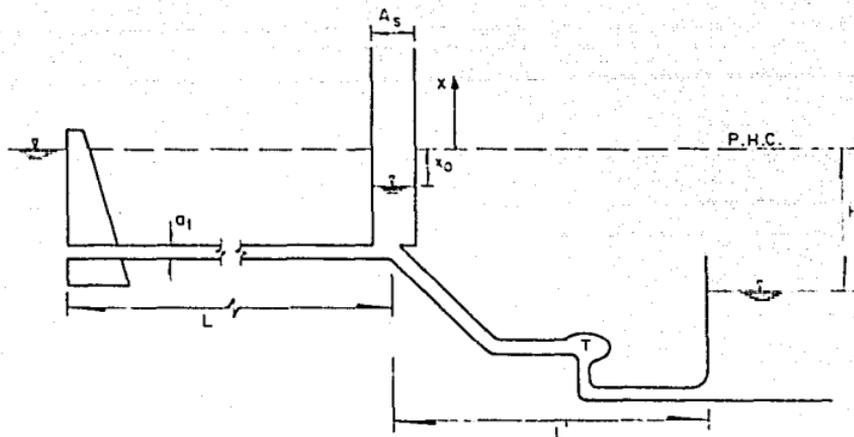


Fig 6a Cámara aguas arriba de la turbina

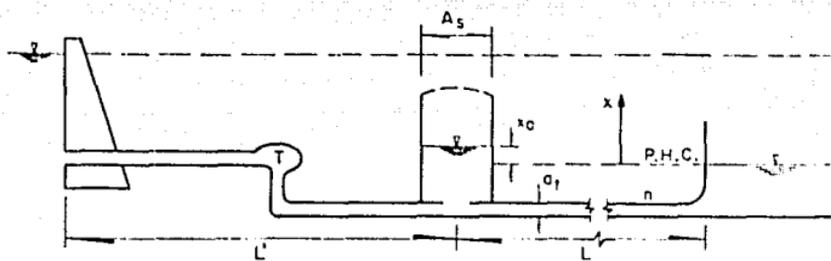


Fig 6b Cámara aguas abajo de la turbina

$$\ddot{X} + f(\dot{X}, X) = 0$$

donde X es el desplazamiento del sistema dinámico, cuya derivada respecto al tiempo es \dot{X} .

Llevando la ecuación anterior a una expresión diferencial que represente el comportamiento de una cámara de oscilación se obtendrá:

$$\frac{l}{g} \frac{dV_1}{dt} + P_1 |V_1| V_1 + K_c |\dot{X}| \dot{X} + X = 0 \quad \text{(III.1.1)}$$

donde

V_1 velocidad en la conducción (m/s)
 g aceleración de la gravedad (m/s²)

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}$$

X coordenada para indicar el movimiento del nivel del agua dentro de la cámara de oscilación (m)

P_1 coeficiente que toma en cuenta las pérdidas y que está definido como:

$$P_1 = \left[\frac{n_1}{r_1^{2/3}} \right]^2 l_1 \quad \text{(III.1.2.a)}$$

con n coeficiente de fricción según Manning

r_1 radio hidráulico de la conducción principal (m)

l_1 tramo de tubería (m)

Obviamente

$$P_2 = \left[\frac{n_2}{r_2^{2/3}} \right]^2 l_2 \quad \text{(III.1.2.b)}$$

Nótese que en la cámara para la condición inicial

$$X_0 = -P_1 V_0^2 \quad \text{(III.1.2.c)}$$

Donde V_0 (m/s) es la velocidad inicial en la tubería.

El coeficiente que toma en cuenta las pérdidas por el cambio de sección de la tubería hacia la cámara, se define como:

$$K_c = \left[\frac{A_c}{A_0} - 1 \right]^2 / 2g \quad (\text{III.1.3})$$

donde

A_c área de la cámara de oscilación (m^2)

A_0 área de entrada a la cámara (m^2)

Por continuidad, en la cámara:

$$a_t V_1 = A_c \dot{X} + a_t V_2 \quad (\text{III.1.4})$$

siendo a_t área transversal de la tubería (m^2)

V_2 velocidad en la conducción principal
después del cierre o la abertura (m/s)

Si H es la carga total disponible (m), entonces

$$H + X = (P_2 + K_u) V_2^2 \quad (\text{III.1.5})$$

donde K_u es un coeficiente que representa la pérdida por la abertura o cierre repentino, y está definida como

$$K_u = ((a_t/A_u - 1)^2 + (a_t/A_u)^2) / 2g \quad (\text{III.1.6})$$

Siendo A_u el área de cierre (m^2).

Despejando a V_2 de (III.1.5)

$$V_2 = \sqrt{\frac{H + X}{P_2 + K_u}} \quad (\text{III.1.7})$$

Despejando a V_1 de (III.1.4) y sustuyendo el valor de V_2

$$V_1 = \frac{Ac}{a_t} \dot{X} + \sqrt{\frac{H+X}{P_2+K_s}} \quad (III.1.8)$$

Derivando la ecuación anterior

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{Ac}{a_t} \ddot{X} + \frac{\dot{X}}{\sqrt{H+X} \sqrt{P_2+K_s}} \quad (III.1.9)$$

Sustituyendo las ecuaciones (III.1.8) y (III.1.9) en la (III.1.1) se obtiene:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{g} \left[\frac{Ac}{a_t} \frac{d^2X}{dt^2} + \frac{1}{\sqrt{H+X}} \frac{1}{\sqrt{P_2+K_s}} \frac{dX}{dt} \right] + \\ & P_1 \left[\frac{Ac}{a_t} \frac{dX}{dt} + \frac{\sqrt{H+X}}{\sqrt{P_2+K_s}} \right] \left[\frac{Ac}{a_t} \frac{dX}{dt} + \frac{\sqrt{H+X}}{\sqrt{P_2+K_s}} \right] \\ & + K_c \left[\frac{dX}{dt} \right] \frac{dX}{dt} + X = 0 \quad (III.1.10) \end{aligned}$$

Agrupando términos

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1}{g} \frac{Ac}{a_t} \right] \frac{d^2X}{dt^2} + P_1 \left[\frac{Ac}{a_t} \frac{dX}{dt} + \frac{\sqrt{H+X}}{\sqrt{P_2+K_s}} \right] \left[\frac{Ac}{a_t} \frac{dX}{dt} + \frac{\sqrt{H+X}}{\sqrt{P_2+K_s}} \right] \\ & + \left[\frac{1}{g} \frac{1}{\sqrt{H+X}} \frac{1}{\sqrt{P_2+K_s}} + K_c \right] \frac{dX}{dt} \frac{dX}{dt} + X = 0 \quad (III.1.11) \end{aligned}$$

Para sintetizar la ecuación anterior puede hacerse que

$$LG = \frac{1}{g} ; RA = \frac{A_c}{a_t} ; AL = LG \cdot RA ; Y = (H+X)^{0.5}$$

$$PK = \frac{1}{\sqrt{P_2 + K_s}} ; Z = \frac{d X}{d t} ; \dot{Z} = \frac{d^2 X}{d t^2}$$

Con estas consideraciones la ecuación (III.1.11) puede presentarse como:

$$AL \dot{Z} + P_1 [RA \cdot Z + PK \cdot Y] (RA \cdot Z + PK \cdot Y) + (LG \cdot PK / Y + KC |Z|) Z + X = 0$$

.....(III.1.12)

La ecuación (III.1.12) será entonces la que habrá que resolver para simular el funcionamiento de la cámara de oscilación, y como resultado se obtendrá, para cada Δt , los nuevos valores X_1 y Z_1 .

Para determinar las condiciones iniciales de V y X , puede usarse la ecuación (III.1.8), de la siguiente forma

$$V_0 = \frac{A_c}{a_t} \dot{X}_0 + \sqrt{\frac{H + X_0}{P_2 + K_s}} \quad (III.1.13)$$

y despejando a \dot{X}_0 se tiene

$$\dot{X}_0 = \frac{a_t}{A_c} \left[V_0 - \sqrt{\frac{H + X_0}{P_2 + K_s}} \right] \quad (III.1.14)$$

Para calcular la velocidad en la tubería (V_1), la ecuación (II.1.1) puede presentarse como:

$$\frac{1}{g} \frac{V_1 - V_0}{\Delta t} + P_1 V_1 V_0 + K_c Z_0 Z_1 + (X_0 + X_1)/2 = 0 \quad (\text{III.1.15})$$

Desarrollando

$$\left[\frac{1}{g \Delta t} + P_1 V_0 \right] V_1 = \frac{V_0}{g \Delta t} - \left[K_c Z_0 Z_1 + (X_0 + X_1)/2 \right] \quad (\text{III.1.16})$$

despejando a V_1

$$V_1 = \frac{\frac{V_0}{g \Delta t} - \left[K_c Z_0 Z_1 + (X_0 + X_1)/2 \right]}{\left[\frac{1}{g \Delta t} + P_1 V_0 \right]} \quad (\text{III.1.17})$$

Nótese que todos los parámetros del miembro derecho son conocidos, pues X_1 y Z_1 se obtienen de la ecuación (III.1.12)

De acuerdo con las ecuaciones anteriores la magnitud de A_c depende del coeficiente de rugosidad n , de la exactitud del coeficiente K_0 y de la magnitud del cambio de potencia M_F , por lo que se supondrá una cierta probabilidad Π_n de que el coeficiente de rugosidad fuera menor que $n - \Delta n$, otra probabilidad Π_K de que K_0 fuera menor que $K_0 - \Delta K_0$ y una tercera probabilidad Π_M de que por alguna falla del gobernador en la maniobra de demanda la magnitud del cambio de potencia fuera mayor que $M_F + \Delta M_F$.

Por lo anterior la probabilidad de que la cámara fuera inestable será:

$$\pi_T \leq \pi_n \pi_k \pi_K$$

III.1.17

Una vez fijados los valores anteriores se obtendrá el rango de valores para los cuales el área A_c es estable, ubicando los valores extremos para ese rango y se conocerán como valores mínimos (S_1 y S_2), por lo tanto para que la Cámara de Oscilación sea estable debe cumplirse que: $S_1 > S_2$, pero a fin de garantizar esta estabilidad deberá cumplirse la condición de: $S_1 - S_2 < TOL$, es decir la diferencia entre los dos mínimos debe ser menor que una tolerancia prefijada, de esta manera podrá decirse que para una cierta área A_c resultará: PEQUEÑA si existe una $|x_1| > H/2$ (donde el valor de $H/2$ se ha fijado por una serie de experimentaciones y el valor de x_1 representa un mínimo en el instante (1) y se caracteriza por $|x_1| > |x_{1-1}|$ y $|x_1| > |x_{1-1}|$, o si $S_2 > S_1$. En tanto que resultará GRANDE si siendo $S_1 > S_2$ o $(S_1 - S_2) > TOL$.

Con estas ideas se puede escoger un valor cualquiera de A_c y por medio del método de Runge-Kutta de cuarto orden se obtendrá la solución de las ecuaciones dinámica y de continuidad, y se comprobará que para ese valor de A_c es pequeña. Enseguida se repetirá el cálculo para el nuevo valor de A_c considerablemente mayor y así sucesivamente hasta encontrar un A_c para la cual la cámara resulta grande.

Después, considerando el último valor de A_c para una cámara pequeña y el primero para una grande, se empleará algún método, como el de partición, para encontrar el área A_c que satisfaga las condiciones de $S_1 > S_2$ y $(S_1 - S_2) < TOL$.

En el apéndice A se presenta el listado del programa para simular el comportamiento de las cámaras de oscilación usando la teoría antes expuesta, es decir, resolviendo la ecuación (III.1.12) y con auxilio de (III.1.14) y (III.1.17). El método empleado de integración fué el de Runge-Kutta con la aproximación de cuarto orden, el cual mostro ser satisfactorio para $\Delta t = 0.1$ s en todos los casos.

IV . DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y PRUEBAS REALIZADAS

El objetivo de la construcción del dispositivo experimental que a continuación se presentará fué la comprobación de la veracidad de la metodología de evaluación de las fórmulas manejadas en el capítulo anterior.

Cabe señalar que el dispositivo no simulará la escala de algún prototipo por lo tanto para su construcción no se tomaron en cuenta las leyes de similitud (geométrica, cinemática y dinámica), sino que se trató como obra hidráulica de dimensiones reducidas e independientes.

IV . 1 DESCRIPCION DEL DISPOSITIVO.

Para su descripción, el modelo experimental se subdividirá en partes de acuerdo a la secuencia del flujo en el mismo, así se tendrá:

- a) Embalse o tanque de carga constante
- b) Conducción
- c) Cámaras de Oscilación
- d) Depósito de aforo

a) EMBALSE

Está simulado por un tanque circular de diámetro igual a $\phi = 1.10$ m y una altura de 1.20 m. proporcionando una carga constante de 1.10 m, medidos hasta el eje de la tubería. Para garantizar el nivel constante, el depósito fué alimentado por medio de una bomba de 1 HP, en el momento de alcanzar la capacidad máxima de almacenamiento, el volumen excedente era desalojado mediante una charola colocada en su parte superior, como se muestra en el plano anexo, con derrame constante. La toma de succión de la bomba estaba conectada a un canal de dimensiones 0.42 x 0.50 x 15.0 m. La tubería de descarga de la bomba cuenta con una válvula de compuerta para regular la salida del flujo. El canal además además de proporcionar agua a la toma de succión, cumple con la función de recircular el volumen de agua utilizado en el dispositivo.

b) CONDUCCION

Al hablar de la conducción se estará refiriendo a la parte del dispositivo que transporta al fluido, desde el embalse hasta el depósito de aforo. La conducción es una tubería de $\phi = 3"$ de diámetro de PVC. Al final de la misma se colocó una compuerta deslizante para regular la salida del fluido y provocar la variación de niveles dentro de las cámaras de oscilación.

Debido a la existencia de pérdidas a lo largo de la conducción, se tendrá una variación del nivel estático de la Cámara con respecto al embalse. Para el modelo, las principales pérdidas locales se producen debido a la entrada brusca que existe entre la conducción y la cámara, a la presencia de la T y por la compuerta al final de la conducción. Tales pérdidas se representan como una fracción de la carga de velocidad, por lo que se expresarán como:

$$h_l = \sum k_l \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

h_l será la pérdida de energía local

$\sum k_l$ será la sumatoria de los coeficientes de pérdidas por cada pieza especial.

$v^2/2g$ es la carga de velocidad.

En el caso de las pérdidas por fricción también se expresarán como una fracción de la carga de velocidad donde el coeficiente del mismo se determinará como:

$$h_{f1} = \left[f \frac{L}{D} \right] \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

h_{f1} será la pérdida por fricción.

f estará en función de la rugosidad del material y de la velocidad por lo que el valor de f será variable, sin embargo tal variación se considera despreciable, por lo tanto f se obtendrá del Diagrama Universal de Moody.

L es la longitud total del recorrido del flujo.

D será el diámetro de la conducción.

Por lo anterior el valor total de las pérdidas estará expresado como:

$$h_p = h_l + h_{f1}$$

Por lo tanto;

$$h_p = \left[\sum K_i + f \frac{L}{D} \right] \frac{v^2}{2g} \quad \text{IV. I.1}$$

De acuerdo a la figura 3 y planteando la ecuación de la energía entre el embalse y la cámara se obtendrá:

$$H = z + \frac{v^2}{2g} + h_p \quad \text{IV. I.2}$$

Tomando como P.H.C el nivel en el embalse, la ecuación IV. I.2 quedará expresada como:

$$z = \frac{v^2}{2g} + h_p \quad \text{IV. I.3}$$

Sustituyendo la ecuación IV. I.1 en la expresión IV. I.3 resultará:

$$z = \frac{v^2}{2g} \left[1 + \sum k + f \frac{L}{D} \right]$$

Cuyo resultado nos indicará el valor numérico de las pérdidas entre los puntos en estudio.

c) CAMARAS DE OSCILACION

Para el dispositivo se emplearon cuatro cámaras de oscilación fabricadas en acrílico con una longitud de 1.60 m y con un diámetro variable de 2", 3", 4" y 5".

Dado que se trabajó con diámetros variables, para realizar la conexión de las cámaras de oscilación con la línea de conducción, se realizó una brida "única" cuyo diámetro de entrada fue igual al de la línea de conducción, eliminándose así la necesidad de cambiar o adaptar piezas especiales al dispositivo, originadas por la variación de los diámetros de las cámaras.

Como resultado de la condición anterior se clasificaron las cámaras en

dos tipos: SIMPLE que correspondió al diámetro de $\phi = 3"$ y con ORIFICIO O ESTRANGULADAS que correspondió a los diámetros de $\phi = 2"$, $4"$ y $5"$.

Para la determinación de las pérdidas provocadas por la presencia del cambio de área a la entrada de la cámara, cada una de ellas contó con un orificio de diámetro igual a $\phi = 2"$, ubicado a una altura de 0.20 m. con respecto a su base para permitir la conexión de una tubería lateral de PVC, cuyo diámetro fue igual a $2"$, con descarga al depósito de aforo determinándose así el gasto que pasaba por la cámara.

d) DEPOSITO DE AFORO

El objetivo del depósito fué para determinar el gasto circundante en el modelo.

Consta de un tanque de llegada cuyas dimensiones son $h = 0.50\text{m}$ $b = 0.90\text{m}$ $l = 1.50\text{m}$, dos muros tranquilizadores de madera y un vertedor triangular de dimensiones $h = 0.15\text{m}$ $\theta = 90^\circ$. El diseño del vertedor se realizó cumpliendo con las restricciones que se indican en la referencia 6.

El valor del gasto se calculó en función de la expresión de la Universidad Católica de Chile para vertedores triangulares, es decir:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \mu k h_v^{5/2}$$

donde los valores de μ y k se obtienen de consultar las tablas correspondientes en la referencia 6.

IV. 2 PRUEBAS REALIZADAS

A continuación se describirá el procedimiento empleado para la

realización de las pruebas, es importante señalar que para simular el fenómeno transitorio, fué necesario realizar la calibración de algunos parámetros que influirían dentro de la utilización del dispositivo físico, los resultados se presentarán en la primera parte de este subcapítulo. En la segunda parte se presentará la descripción del instrumento de medición empleado para el registro de las oscilaciones.

IV . 2 . 1 CALIBRACION DEL DISPOSITIVO FISICO

La determinación del valor de las pérdidas de carga por el cambio de dirección y la ampliación del área a la entrada en las cámaras, resultó ser uno de los parámetros importantes para la simulación. Para su obtención se realizaron una serie de pruebas que consistieron en fijar un gasto a la salida de la línea de conducción, proponiendo una abertura en la compuerta ubicada al final de la misma, una vez establecido el gasto se procedía a medir la altura de la columna de agua en la cámara de oscilación. Al finalizar la toma de las lecturas se cerraba por completo la compuerta y se hacía descargar el mismo gasto por la tubería lateral de la cámara, regulando la salida con la válvula de compuerta ubicada en dicha tubería, y se medían las alturas de la columna de agua dentro de la cámara de oscilación. La diferencia de las dos lecturas de la altura de la columna de agua proporcionó el valor numérico de las pérdidas por el orificio para un flujo establecido.

Lo anterior se realizó varias veces permitiendo tener la información necesaria para construir la gráfica IV.2.a teniéndose así un rango del comportamiento de las pérdidas por entrada para cada cámara.

De la gráfica anterior se concluye que la entrada de la cámara de 2" de diámetro provoca las mayores pérdidas de carga, esto es lógico ya que para este caso se trabaja con una reducción de área, mientras que para las cámaras de 4" y 5" de diámetro, las pérdidas no son grandes

PERDIDAS POR ENTRADA (CAMARA)

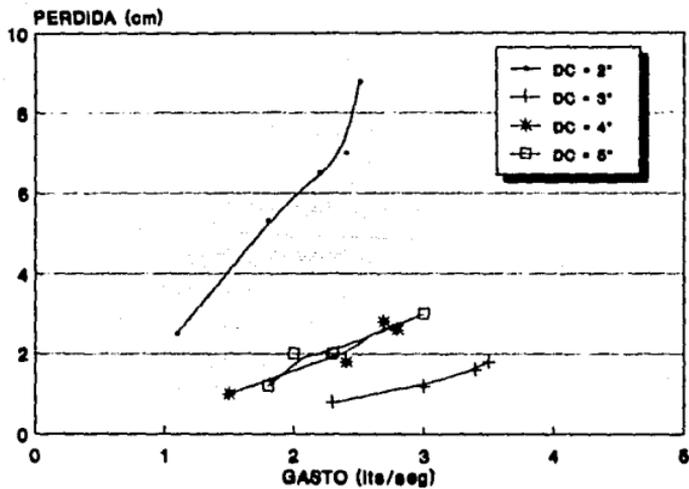


FIG. IV.2.a PERDIDAS

dado que se trabaja con una ampliación a la entrada. Las menores pérdidas se presentarán para la cámara de 3" de diámetro, ya que el diámetro de la conducción y de la entrada fueron los mismos.

El valor del coeficiente de fricción resultó ser otro de los parámetros importantes de calibración ya que su comportamiento no se apegaba a lo especificado en los tratados de hidráulica. Para obtener su valor se realizaron varias pruebas que consistían en medir las pérdidas existentes de carga en la cámara para diferentes gastos. En la gráfica IV.2.b se muestran los resultados obtenidos, que para la cámara de 2" de diámetro se explican con un coeficiente de $n = 0.014$ mientras que para las cámaras de 3", 4" y 5" el valor del coeficiente se encuentra entre $n = 0.011$ y $n = 0.012$.

La diferencia de valores no involucra cambios de material sino la influencia de la carga de velocidad en el nivel estático, esto es, la entrada de la cámara provoca que sea registrada la carga de velocidad, por lo que al analizar el gradiente hidráulico entre un punto antes de la cámara y la cámara, la pendiente del mismo será menor a la real, debido al incremento de altura del nivel estático, por lo tanto, para no considerar este incremento el valor de n se ve incrementado para el caso de la cámara de 2" de diámetro, para que, en el momento de realizar la simulación, se considere tal efecto.

Por último, el valor manejado para las cámaras de 3", 4" y 5" de diámetro fué $n = 0.011$.

El comportamiento de la abertura de la compuerta fué otro punto interesante para la simulación, principalmente para los casos de abertura, por ello se realizó la calibración del área de abertura de la compuerta contra el gasto descargado en ese instante. De los valores obtenidos se construyó la gráfica IV.2.c que mediante la aplicación de regresiones pudo obtenerse el valor del coeficiente para orificios $C_d = 0.707$, cuyo valor responde al comportamiento de las áreas medidas.

PERDIDAS VS GASTOS

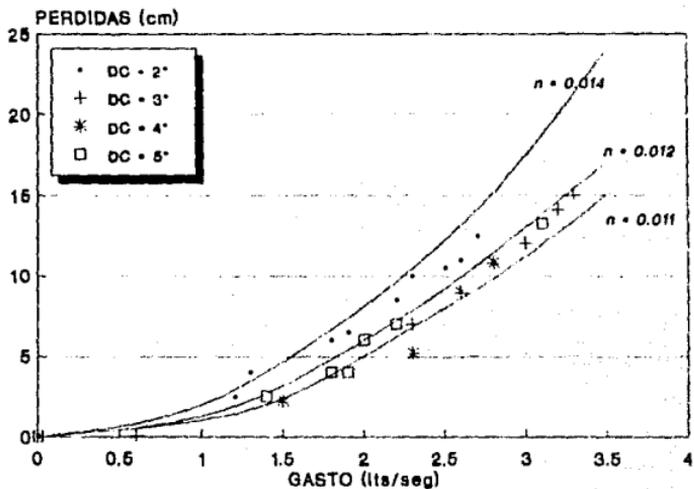


FIG. IV.2.b VALOR DEL COEFICIENTE "n"

IV.2.2 DISPOSITIVO DE MEDICION

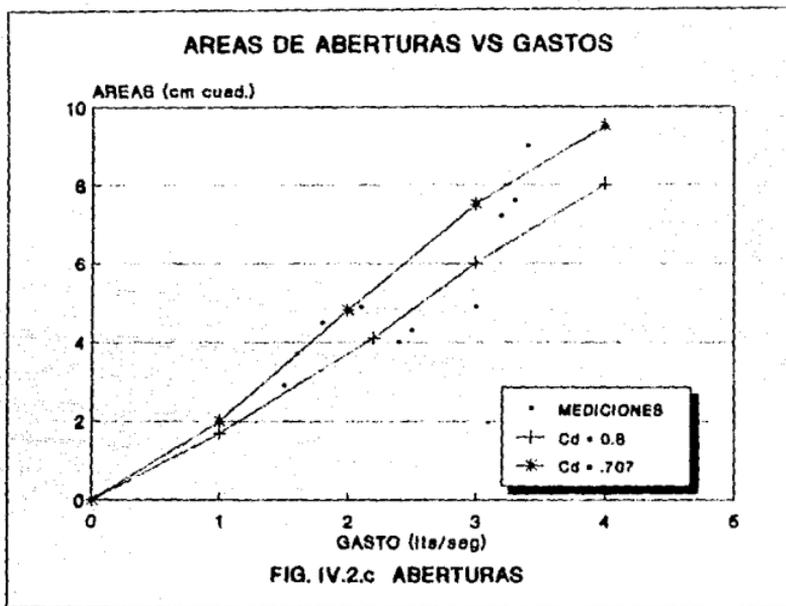
Para la toma de las lecturas de las oscilación dentro de las cámaras, se diseño en el laboratorio de instrumentación del Instituto de Ingeniería un dispositivo cuyo objetivo fué registrar la fluctuación de niveles.

Para facilitar la explicación del funcionamiento del mismo, se realizará un esquema mostrado en la figura IV.2.2.1 en donde se desarrolla en cuatro etapas el proceso de registro de datos.

La primera etapa consistió en registrar el desnivel del flujo a través del empleo de dos barras de latón de longitud igual a 1.50m. ambas barras registraban la altura de la columna de agua a través de un capacitor colocado en el extremo superior de las mismas, una vez emitida la señal del desnivel del agua, esta era llevada a un acondicionador de señal cuya función consistió en transformar la señal emitida por el capacitor, para poder ser leída por el graficador, sin embargo la frecuencia de emisión de la señal es pequeña por lo que resultó necesario amplificarla, para que finalmente fuera llevada al registrador del tipo MFE de punta caliente.

Ya en la práctica se observó que la lectura correspondiente a la longitud de la cresta, no correspondía a la longitud real, la razón de esta deficiencia se debió al fenómeno de tensión superficial del agua dentro de las puntas medidoras, dado que aunque la columna de agua descendía quedaba una pequeña película, que descendía mas lentamente por lo que la señal de salida no correspondió a la columna de agua real.

Por lo anterior se procedió a tomar de manera directa la magnitud de las oscilaciones, y del graficador el tiempo de duración y posteriormente construir la gráfica de oscilaciones contra tiempo.



A continuación se presenta los valores numéricos de las oscilaciones considerando los casos de cierre y abertura, posteriormente serán capturados en computadora para efectuar la comparación de los resultados teóricos contra los medidos. El resultado de la comparación se presentará en el capítulo siguiente.

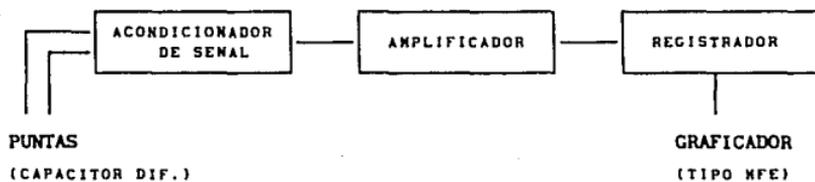


Fig. IV.2.2.1 Registro de las oscilaciones

DIAMETRO DE LA CAMARA = 2"

PRUEBA No. 1

H (cm)	TIEMPO (seg)
9.3	0
- 46.9	0.9
25.9	3.3
- 11.7	5.7
6.7	7.2
- 3.2	10.8
2.3	12.6
- 0.08	15.0

ABERTURA

Q = 2.27 lts/seg

H (cm)	TIEMPO (seg)
- 10.5	0
61.0	1.2
- 39.2	3.3
32.3	6.0
- 27.8	8.4
19.7	11.1
- 15.9	13.2
14.2	15.9
- 11.6	18.3
10.7	21.0
- 8.9	23.1
7.7	25.8
- 6.8	28.2
6.2	30.6
- 5.6	33.0
4.9	36.0
- 4.4	38.4
3.8	40.8
- 3.4	42.9
3.0	45.6
- 2.8	48.0

CIERRE

Q = 2.64 lts/seg

TABLA IV 1 : VALORES MAXIMOS DE LAS OSCILACIONES

TIEMPO (seg)	H ABERTURA (m)	H CIERRE (m)
0	0.093	0.105
0.5	0.34	0.35
1	0.46	0.59
1.5	0.30	0.55
2	0.10	0.20
2.5	0.09	0.20
3	0.22	0.37
3.5	0.25	0.37
4	0.15	0.26
4.5	0.05	0.10
5	0.04	0.10
5.5	0.10	0.25
6	0.09	0.32
6.5	0.01	0.25
7	0.05	0.10
7.5	0.06	0.08
8	0.045	0.24
8.5	0.03	0.27
9	0.015	0.20
9.5	0.0	0.19
10	0.015	0.0
10.5	0.025	0.10
11	0.02	0.19
11.5	0.01	0.16
12	0.01	0.05
12.5	0.02	0.05
13	0.02	0.14
13.5	0.01	0.13
14	0.005	0.07
14.5	0.0	0.0
15	0.01	0.05
15.5	0.005	0.11
16	0.0	0.14
16.5	0.0	0.09
17	0.0	0.02
17.5	0.0	0.05
18	0.0	0.1
18.5	0.0	0.1
19	0.0	0.06
19.5	0.0	0.02
20	0.0	0.02

TABLA IV.2 : VALORES INTERPOLADOS

DIAMETRO DE LA CAMARA = 3"

PRUEBA No. 1

H (cm)	TIEMPO (seg)
9.5	0
- 40.5	1.2
23.2	4.8
- 11.6	8.4
5.8	11.4
- 2.8	15.0
1.5	18.6
- 0.07	23.4

ABERTURA

Q = 3.6 lts/seg

H (cm)	TIEMPO (seg)
- 10.0	0
46.2	2.1
- 38.5	5.4
31.9	9.0
- 28.8	12.6
24.5	15.6
- 21.8	19.8
19.5	22.8
- 16.8	26.7
16.0	30.0
- 13.2	33.6
12.0	37.2
- 10.5	40.8
9.6	44.1
- 8.9	48.0
6.9	51.0
- 6.7	55.2
6.3	57.6
- 5.6	62.4
5.4	64.8
- 4.8	69.6
4.0	72.0
- 4.0	76.8
3.7	79.2
- 3.8	83.4
2.8	87.0
- 2.9	90.6

CIERRE

TABLA IV.3 : VALORES MAXIMOS DE LAS OSCILACIONES

TIEMPO (seg)	H ABERTURA (m)	H CIERRE (m)
0	0.095	- 0.10
0.5	- 0.15	0.06
1	- 0.37	0.2
1.5	- 0.38	0.34
2	- 0.30	0.46
2.5	- 0.19	0.40
3	- 0.06	0.23
3.5	0.05	0.14
4	0.13	- 0.02
4.5	0.20	- 0.20
5	0.22	- 0.33
5.5	0.18	- 0.37
6	0.13	- 0.28
6.5	0.08	- 0.16
7	0.02	- 0.05
7.5	- 0.03	0.06
8	- 0.09	0.18
8.5	- 0.11	0.28
9	- 0.09	0.32
9.5	- 0.06	0.25
10	- 0.02	0.15
10.5	0.01	0.06
11	0.04	- 0.02
11.5	0.06	- 0.11
12	0.05	- 0.22
12.5	0.04	- 0.29
13	0.025	- 0.24
13.5	0.01	- 0.15
14	0.0	- 0.02
14.5	- 0.01	0.08
15	- 0.025	0.18
15.5	- 0.02	0.24
16	- 0.018	0.21
16.5	- 0.01	0.15
17	- 0.003	0.09
17.5	0.0	0.025
18	0.005	- 0.03
18.5	0.01	- 0.08
19	0.012	- 0.15
19.5	0.01	- 0.20
20	0.008	- 0.20

TABLA IV.4 : VALORES INTERPOLADOS

DIAMETRO DE LA CAMARA = 4"
PRUEBA No. 1

H (cm)	TIEMPO (seg)
13.1	0
- 34.0	1.8
13.5	6.0
- 5.1	10.8
2.0	15.0
- 0.9	21.0
0.3	24.0

ABERTURA

Q = 3.32 lts/seg

H (cm)	TIEMPO (seg)
- 13.1	0
38.8	2.1
- 30.6	5.4
23.5	9.0
- 20.0	12.6
16.5	15.6
- 14.4	19.8
12.0	22.8
- 10.4	26.7
9.1	30.0
- 8.0	33.6
6.8	37.2
- 6.0	40.8
5.0	44.1
- 4.7	48.0
3.9	51.0
- 3.6	55.2
3.1	57.6
- 2.9	62.4
2.3	64.8
- 2.3	69.6

CIERRE

TABLA IV.5 : VALORES MAXIMOS DE LAS OSCILACIONES

TIEMPO (seg)	H ABERTURA (m)	H CIERRE (m)
0	0.131	- 0.131
0.5	- 0.04	0.0
1	- 0.19	0.11
1.5	- 0.32	0.21
2	- 0.33	0.32
2.5	- 0.28	0.38
3	- 0.21	0.37
3.5	- 0.15	0.30
4	- 0.09	0.20
4.5	- 0.03	0.11
5	0.03	0.02
5.5	0.09	- 0.06
6	0.14	- 0.16
6.5	0.13	- 0.23
7	0.11	- 0.30
7.5	0.09	- 0.29
8	0.07	- 0.22
8.5	0.05	- 0.15
9	0.03	- 0.08
9.5	0.00	- 0.02
10	- 0.02	0.07
10.5	- 0.04	0.15
11	- 0.05	0.21
11.5	- 0.04	0.23
12	- 0.03	0.20
12.5	- 0.02	0.16
13	- 0.01	0.12
13.5	0.0	0.07
14	0.01	0.03
14.5	0.02	- 0.02
15	0.03	- 0.06
15.5	0.02	- 0.12
16	0.03	- 0.16
16.5	0.015	- 0.19
17	0.01	- 0.19
17.5	0.0	- 0.15
18	0.0	- 0.10
18.5	0.0	- 0.05
19	0.0	0.0
19.5	0.0	0.05
20	0.0	0.10

TABLA IV.6 : VALORES INTERPOLADOS

DIAMETRO DE LA CAMARA = 5"
PRUEBA No. 1

H (cm)	TIEMPO (seg)
17.0	0
- 26.5	2.4
6.4	8.4
- 1.5	13.8
0.5	19.8

ABERTURA

Q = 5.42 lts/seg

H (cm)	TIEMPO (seg)
- 17.0	0
31.6	2.1
- 22.5	5.4
16.8	9.0
- 13.5	12.6
11.3	15.6
- 9.4	19.8
7.5	22.8
- 6.5	26.7
5.5	30.0
- 4.3	33.6
3.7	37.2
- 3.3	40.8
2.8	44.1
- 2.5	48.0
2.2	51.0
- 1.7	55.2
1.5	57.6
- 1.3	62.4
0.9	64.8
- 0.8	69.6

CIERRE

TABLA IV.7 : VALORES MAXIMOS DE LAS OSCILACIONES

TIEMPO (seg)	H ABERTURA (m)	H CIERRE (m)
0	0.17	- 0.17
0.5	0.05	- 0.07
1	- 0.06	0.0
1.5	- 0.16	0.08
2	- 0.23	0.14
2.5	- 0.27	0.21
3	- 0.25	0.26
3.5	- 0.22	0.31
4	- 0.18	0.30
4.5	- 0.15	0.25
5	- 0.115	0.21
5.5	- 0.08	0.17
6	- 0.05	0.13
6.5	- 0.02	0.08
7	0.01	0.03
7.5	0.03	- 0.03
8	0.05	- 0.07
8.5	0.06	- 0.12
9	0.07	- 0.16
9.5	0.065	- 0.21
10	0.05	- 0.22
10.5	0.04	- 0.19
11	0.03	- 0.15
11.5	0.02	- 0.11
12	0.01	- 0.06
12.5	0.0	- 0.02
13	- 0.01	0.03
13.5	- 0.02	0.07
14	- 0.015	0.11
14.5	- 0.01	0.15
15	- 0.009	0.17
15.5	- 0.008	0.16
16	- 0.005	0.14
16.5	0.0	0.11
17	0.0	0.08
17.5	0.0	0.05
18	0.0	0.01
18.5	0.0	- 0.02
19	0.0	- 0.05
19.5	0.0	- 0.08
20	0.0	- 0.11

TABLA IV.8:

VALORES INTERPOLADOS

DIAMETRO DE LA CAMARA = 2"
PRUEBA No. 2

H (cm)	TIEMPO (seg)
2.3	0
- 23.3	0.9
17.5	3.3
- 10.5	5.7
8.3	7.5
- 5.6	10.8
4.1	12.9
- 3.1	16.2
2.6	17.4

ABERTURA

Q = 1.039 lts/seg

H (cm)	TIEMPO (seg)
- 2.0	0
29.8	2.1
- 22.0	5.4
20.0	9.0
- 14.9	12.6
14.2	15.6
- 10.8	19.8
11.7	22.8
- 7.7	26.7
8.5	30.0
- 6.2	33.6
7.5	37.2
- 5.0	40.8
5.8	44.1
- 3.8	48.0
4.7	51.0
- 2.9	55.2
4.0	57.6
- 2.1	62.4
3.5	64.8
- 1.8	69.6
2.8	72.0
- 1.0	76.8

CIERRE

TABLA IV.9 : VALORES MAXIMOS DE LAS OSCILACIONES

TIEMPO (seg)	H ABERTURA (m)	H CIERRE (m)
0	0.023	- 0.02
0.5	- 0.19	0.14
1	- 0.22	0.25
1.5	- 0.15	0.30
2	- 0.05	0.20
2.5	0.05	0.05
3	0.15	- 0.10
3.5	0.16	- 0.21
4	0.09	- 0.16
4.5	0.02	- 0.05
5	- 0.05	0.05
5.5	- 0.09	0.15
6	- 0.08	0.20
6.5	- 0.02	0.15
7	0.04	0.09
7.5	0.08	0.02
8	0.06	- 0.05
8.5	0.04	- 0.12
9	0.01	- 0.15
9.5	- 0.01	- 0.10
10	- 0.04	- 0.03
10.5	- 0.06	0.05
11	- 0.05	0.11
11.5	- 0.02	0.14
12	0.005	0.10
12.5	0.03	0.05
13	0.04	- 0.02
13.5	0.03	- 0.08
14	0.02	- 0.11
14.5	0.01	0.06
15	0.0	0.0
15.5	- 0.01	0.05
16	- 0.02	0.10
16.5	- 0.01	0.10
17	0.01	0.05
17.5	0.03	0.02
18	0.02	- 0.02
18.5	0.01	- 0.06
19	0.015	- 0.04
19.5	0.0	0.0
20	0.0	- 0.05

TABLA IV.10 : VALORES INTERPOLADOS

DIAMETRO DE LA CAMARA = 3"
PRUEBA No. 2

H (cm)	TIEMPO (seg)
8.4	0
- 37.0	1.5
23.0	4.8
- 12.0	8.4
6.9	11.4
- 33.0	15.0
2.2	18.0
- 0.9	23.4
0.9	26.4

ABERTURA

Q = 2.187 lts/seg

H (cm)	TIEMPO (seg)
- 8.5	0
41.0	2.1
- 35.6	5.7
29.9	9.0
- 26.5	12.6
22.7	15.6
- 20.3	19.8
17.4	23.4
- 15.8	27.0
13.7	30.0
- 12.3	34.2
10.3	37.2
- 9.5	41.1
8.3	43.8
- 7.8	48.0
6.5	51.0
- 6.3	55.8
5.1	58.8
- 5.3	62.4
4.3	65.4
- 4.5	69.6
3.5	72.0

CIERRE

TABLA IV.11 : VALORES MAXIMOS DE LAS OSCILACIONES

TIEMPO (seg)	H ABERTURA (m)	H CIERRE (m)
0	0.084	- 0.085
0.5	- 0.11	0.06
1	- 0.29	0.20
1.5	- 0.37	0.31
2	- 0.29	0.40
2.5	- 0.20	0.36
3	- 0.10	0.25
3.5	0.0	0.14
4	0.10	0.0
4.5	0.20	- 0.13
5	0.22	- 0.28
5.5	0.17	- 0.36
6	0.13	- 0.33
6.5	0.08	- 0.24
7	0.02	- 0.11
7.5	- 0.04	0.0
8	- 0.09	0.14
8.5	- 0.11	0.25
9	- 0.08	0.30
9.5	- 0.05	0.25
10	- 0.02	0.16
10.5	0.02	0.08
11	0.05	0.0
11.5	0.07	- 0.10
12	0.06	- 0.19
12.5	0.04	- 0.26
13	0.02	- 0.22
13.5	0.01	- 0.14
14	- 0.01	- 0.05
14.5	- 0.028	0.05
15	- 0.03	0.15
15.5	- 0.025	0.22
16	- 0.01	0.20
16.5	0.0	0.16
17	0.01	0.10
17.5	0.02	0.05
18	0.025	0.0
18.5	0.02	- 0.05
19	0.02	- 0.1
19.5	0.017	- 0.16
20	0.01	- 0.2

TABLA IV. 12 : VALORES INTERPOLADOS

DIAMETRO DE LA CAMARA = 4"
PRUEBA No. 2

H (cm)	TIEMPO (seg)
8.0	0
- 23.3	1.2
14.4	6.6
- 7.5	11.4
4.3	15.6
- 2.0	20.1
1.1	25.2
- 0.5	30.6
0.4	33.6

ABERTURA

Q = 1.79 lts/seg

H (cm)	TIEMPO (seg)
- 6.0	0
25.0	2.7
- 21.0	7.2
17.5	12.0
- 14.5	16.8
12.5	21.6
- 10.5	25.8
9.2	30.6
- 8.0	35.4
7.0	39.0
- 4.4	44.4
5.2	48.6
- 3.4	54.0
4.0	58.8
- 2.5	63.6
2.8	67.8
- 2.1	72.6
2.5	76.8
- 1.6	82.2

CIERRE

TABLA IV.13 : VALORES MAXIMOS DE LAS OSCILACIONES

TIEMPO (seg)	H ABERTURA (m)	H CIERRE (m)
0	0.06	- 0.06
0.5	- 0.10	0.02
1	- 0.21	0.08
1.5	- 0.22	0.14
2	- 0.19	0.19
2.5	- 0.15	0.245
3	- 0.11	0.24
3.5	- 0.07	0.20
4	- 0.03	0.15
4.5	0.01	0.09
5	0.05	0.02
5.5	0.09	- 0.05
6	0.125	- 0.11
6.5	0.14	- 0.16
7	0.14	- 0.20
7.5	0.13	- 0.20
8	0.10	- 0.16
8.5	0.07	- 0.12
9	0.04	- 0.07
9.5	0.01	- 0.02
10	- 0.01	0.03
10.5	- 0.04	0.07
11	- 0.06	0.11
11.5	- 0.07	0.14
12	- 0.06	0.17
12.5	- 0.04	0.15
13	- 0.03	0.12
13.5	- 0.02	0.09
14	0.0	0.05
14.5	0.01	0.00
15	0.02	- 0.03
15.5	0.04	- 0.07
16	0.045	- 0.10
16.5	0.04	- 0.13
17	0.03	- 0.145
17.5	0.02	- 0.15
18	0.015	- 0.10
18.5	0.01	- 0.06
19	0.0	- 0.03
19.5	- 0.01	0.0
20	- 0.02	0.04

TABLA IV.14 : VALORES INTERPOLADOS

DIAMETRO DE LA CAMARA = 5"
PRUEBA No.2

H (cm)	TIEMPO (seg)
29.5	0
- 29.0	2.7
- 3.6	7.32
- 0.5	16.47
0.2	18.91

ABERTURA

$Q_{INIC} = 7.1$ lts/seg

H (cm)	TIEMPO (seg)
- 29.5	0
- 28.0	3.3
- 26.5	9.1
- 19.4	14.9
- 15.0	21.3
- 12.2	26.8
- 9.7	33.5
- 8.3	37.8
- 6.8	45.1
- 5.8	50.0
- 4.7	57.3
- 4.2	62.2
- 3.4	68.9
- 2.9	73.8
- 2.3	81.7
- 2.5	86.0
- 2.0	92.7
- 1.6	98.2
- 1.2	104.3
- 1.4	109.8
- 0.7	115.3

CIERRE

TABLA IV.15 : VALORES MAXIMOS DE LAS OSCILACIONES

TIEMPO (seg)	H ABERTURA (m)	H CIERRE (m)
0	0.29	- 0.29
0.5	0.27	- 0.18
1	0.06	- 0.07
1.5	- 0.06	0.04
2	- 0.17	0.10
2.5	- 0.28	0.22
3	- 0.28	0.27
3.5	- 0.24	0.28
4	- 0.20	0.24
4.5	- 0.16	0.20
5	- 0.12	0.16
5.5	- 0.08	0.11
6	- 0.04	0.04
6.5	0.0	0.02
7	0.03	- 0.07
7.5	0.04	- 0.13
8	0.045	- 0.17
8.5	0.04	- 0.22
9	0.03	- 0.26
9.5	0.028	- 0.25
10	0.027	- 0.20
10.5	0.025	- 0.15
11	0.02	- 0.10
11.5	0.015	- 0.05
12	0.012	- 0.0
12.5	0.01	0.04
13	0.01	0.08
13.5	0.09	0.12
14	0.02	0.15
14.5	0.0	0.18
15	0.0	0.19
15.5	- 0.01	0.18
16	- 0.012	0.15
16.5	- 0.01	0.13
17	0.0	0.10
17.5	0.0	0.07
18	0.0	0.03
18.5	0.0	0.0
19	0.0	- 0.04
19.5	0.0	- 0.07
20	0.0	- 0.1

TABLA IV. 16 : VALORES INTERPOLADOS

V . COMPARACION DE RESULTADOS TEORICOS Y DE LABORATORIO

Para la comparación de resultados se eligió en un intervalo de tiempo de 19 seg, mismo que para los valores medidos corresponde a los valores mostrados en las tablas IV.2 , IV.4, IV.6, IV.8, IV.10, IV.12, IV.14, IV.16 del capítulo anterior, mientras que para los valores teóricos se utilizará el programa mostrado en el apéndice A.

El resultado de la comparación se muestra en los siguientes subcapítulos.

V . 1 PRUEBAS DE CIERRE

Del resultado de la comparación se observa concordancia en la magnitud de los picos, el desfaseamiento que se observa en las oscilaciones subsecuentes a la primera , se consideran de carácter secundario ya que para el dimensionamiento de las cámaras se considera la mayor magnitud, misma que corresponde a la primera oscilación. Para este punto, tanto los valores teóricos como medidos coinciden, como se

observa en las gráficas obtenidas.

En cuanto al desfaseamiento en el tiempo de oscilación, también se considera de carácter secundario, ya que no es un factor decisivo dentro del diseño de las cámaras.

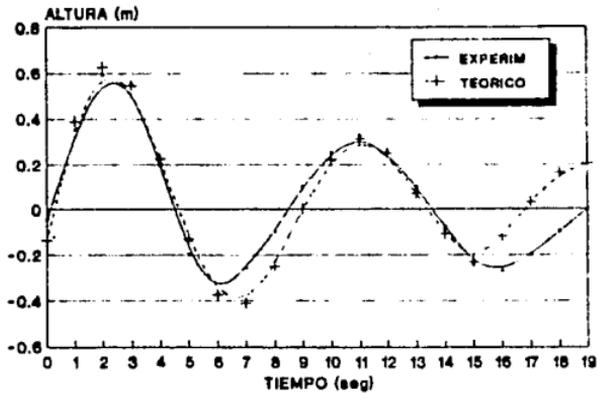
Sobre el valor del coeficiente de pérdidas por entrada, se corrigió para el caso de la cámara de 2" de diámetro, ya que el área de entrada es una reducción, por lo que el valor de K_e se multiplicó por un factor de 12.5 para compensar el efecto de la reducción. El valor de n se consideró igual a lo establecido en el capítulo anterior.

V. 2 PRUEBAS DE APERTURAS

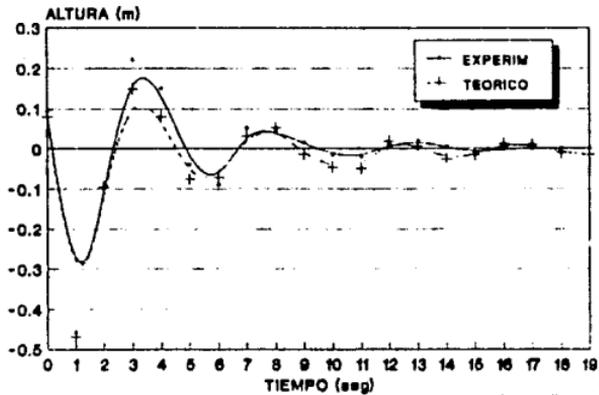
Para esta maniobra el comportamiento del simulador es congruente con los valores medidos en el dispositivo. Al igual que en la maniobra anterior, se observa el desfaseamiento entre la magnitud de los picos simulados y medidos, sin embargo, se considera de carácter secundario ya que para el caso crítico que corresponde a la primera oscilación, los valores coinciden. El desfaseamiento existente con respecto al tiempo, también se considerará de importancia secundaria.

A continuación se presenta de forma gráfica el resultado de las comparaciones efectuadas.

CIERRE
DIAMETRO DE LA CAMARA = 2"

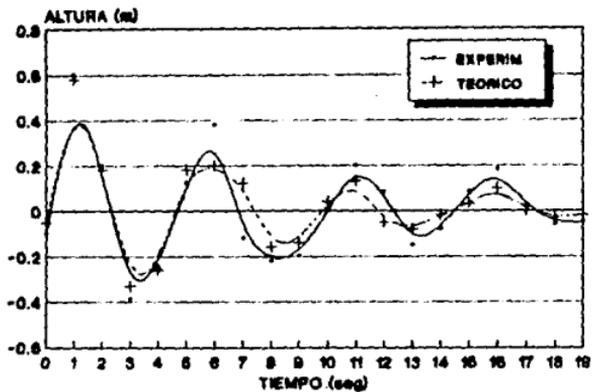


ABERTURA
DIAMETRO DE LA CAMARA = 2"

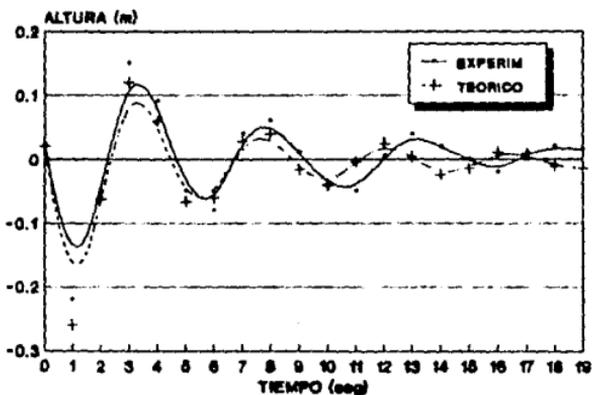


PRUEBA No. 1

CIERRE
DIAMETRO DE LA CAMARA = 2"

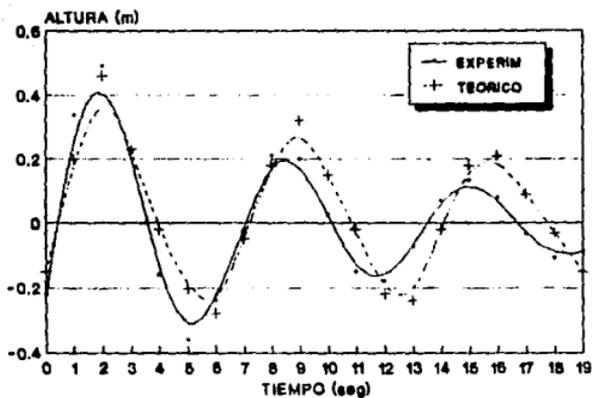


ABERTURA
DIAMETRO DE LA CAMARA = 2"

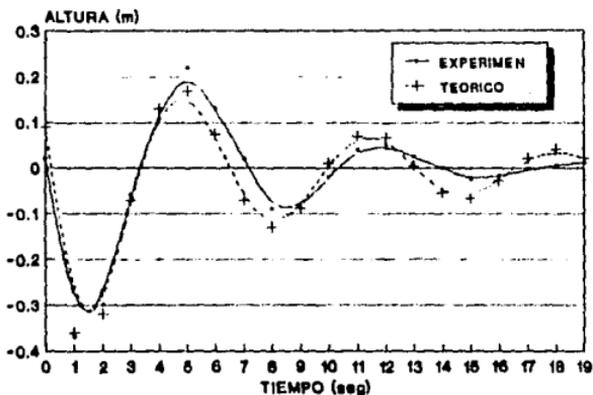


PRUEBA No. 2

CIERRE
DIAMETRO DE LA CAMARA = 3"

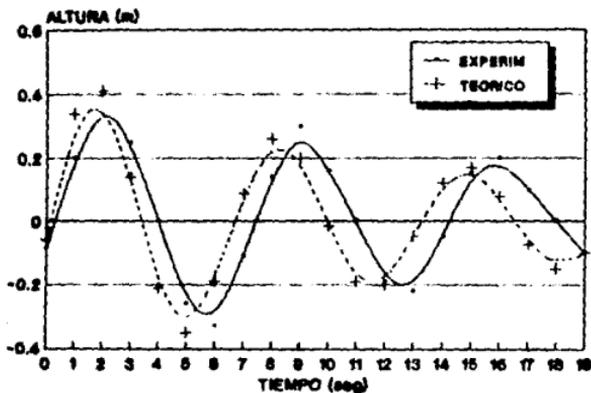


ABERTURA
DIAMETRO DE LA CAMARA = 3"

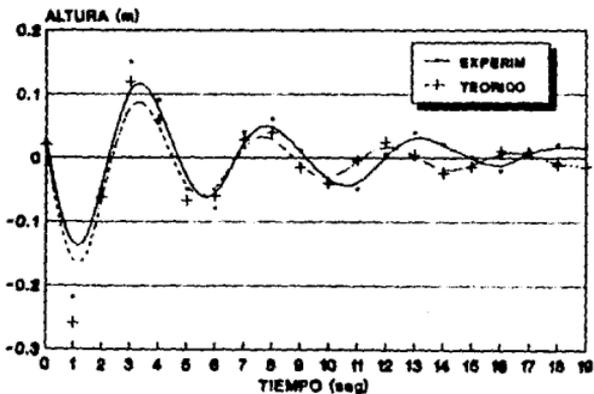


PRUEBA No. 1

CIERRE
DIAMETRO DE LA CAMARA = 3"

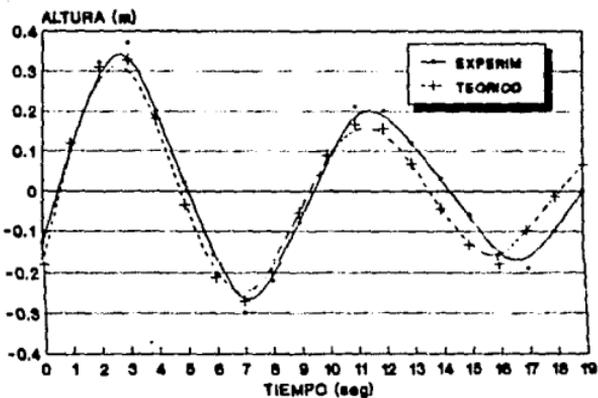


ABERTURA
DIAMETRO DE LA CAMARA = 3"

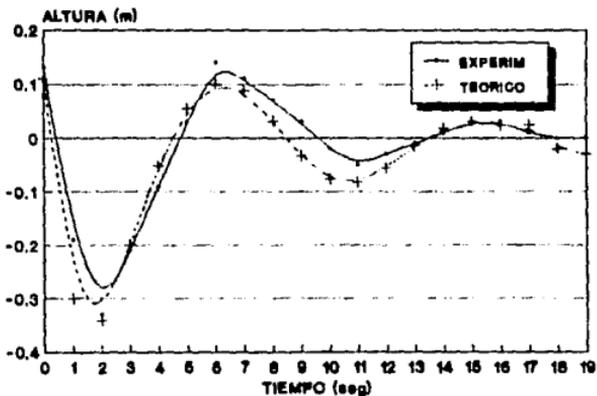


PRUEBA No. 2

CIERRE
DIAMETRO DE LA CAMARA = 4"

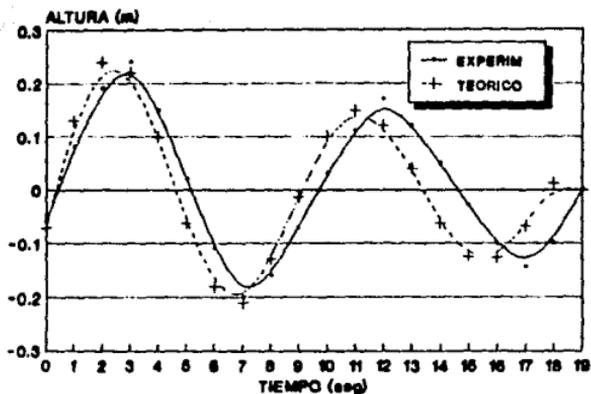


ABERTURA
DIAMETRO DE LA CAMARA = 4"

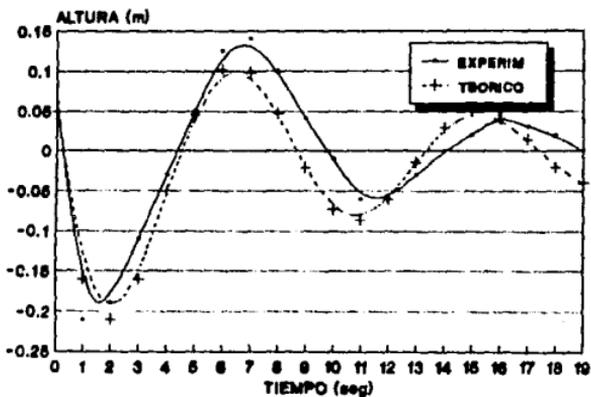


PRUEBA No. 1

CIERRE
DIAMETRO DE LA CAMARA = 4"

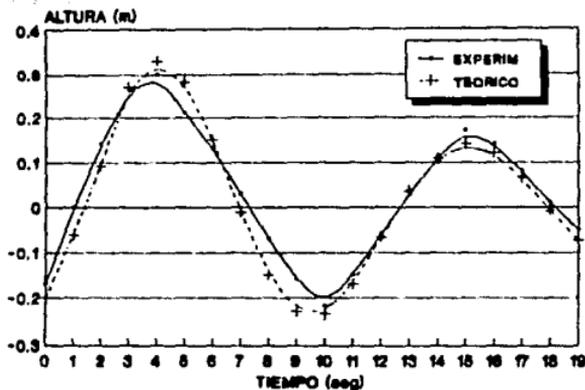


ABERTURA
DIAMETRO DE LA CAMARA = 4"

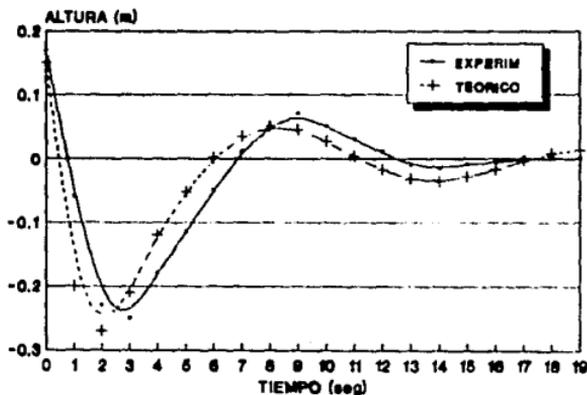


PRUEBA No.2

CIERRE
DIAMETRO DE LA CAMARA = 5'

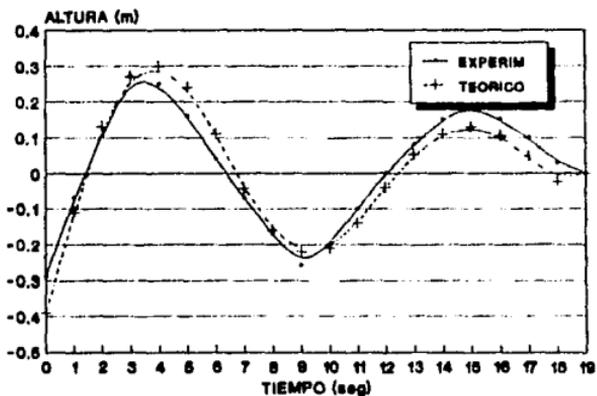


ABERTURA
DIAMETRO DE LA CAMARA = 5'

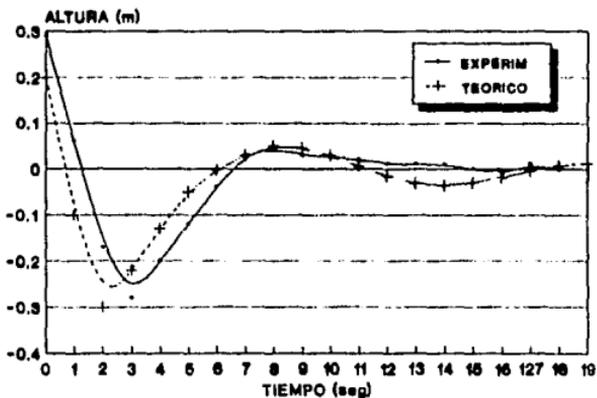


PRUEBA No. 1

CIERRE
DIAMETRO DE LA CAMARA = 5°



ABERTURA
DIAMETRO DE LA CAMARA = 5°



PRUEBA No. 2

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del comportamiento de las gráficas obtenidas se concluye en términos generales, que el método de simulación es satisfactorio, por lo que se puede tener confiabilidad en los resultados.

Para el caso de la maniobra de cierre, las gráficas demuestran un comportamiento congruente entre lo teórico y lo medido, sin embargo analizando el desfase existente entre los picos de las oscilaciones se concluye que se debe al comportamiento de las pérdidas, ya que a pesar de haber realizado una calibración, su valor no permanece constante en el desarrollo del transitorio, es decir, no se tiene el mismo comportamiento cuando la columna de agua tiene un sentido ascendente, que cuando es descendente, pero para fines de diseño, el punto de interés es la primera oscilación, y para este punto el valor teórico y medido coincidieron.

Con respecto a la maniobra de apertura, el desfase de los picos

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

subsecuente a la primera oscilación fueron más perceptibles, lo que lleva a la necesidad de estudiar con mas detalle el comportamiento de las pérdidas en el fenómeno oscilatorio. Sin embargo al igual que en el caso anterior los valores teóricos y medidos en la primera oscilación coincidieron, lo que implica confiabilidad en el simulador.

En general se observó que la cámara que requirió de mayor precisión en la determinación de las pérdidas fué la de 2" de diámetro, ya que presenta una reducción del área a la entrada, incrementando con esto, el valor de pérdidas. El objetivo de incluir esta área no involucra de ninguna manera la recomendación de utilizar cámaras de diámetro menor al de la línea de conducción, sino el tener un mayor rango de comparación del fenómeno transitorio ante distintos diámetros.

Es importante hacer la observación que en las gráficas las curvas no pasan exactamente por los puntos dados como datos, debido a características propias del paquete de computadora empleado, ya que para graficar el programa utiliza valores medios tomando como puntos extremos los valores proporcionados como dato. Sin embargo para evitar cualquier tipo de confusión, en el apéndice B se presenta en forma tabular los valores teórico y medido de las oscilaciones para el intervalo de tiempo fijado.

Por último, es importante recomendar la utilidad del estudio de las pérdidas en el fenómeno transitorio, ya que del conocimiento de su comportamiento el diseño de las cámaras puede contener ensanchamientos o contracciones de área que permitan una mejor disipación de la energía.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

AGRADECIMIENTOS

Al instituto de Ingenieria, a la DEFFI , UNAM por las facilidades otorgadas para la elaboraci3n de este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

1. "Cámaras de Oscilación . Analisis y Diseño Hidráulico."
Instituto de Ingeniería . Berezowsky. , Ramirez L.
- 2 "Teoría del Golpe de Ariete y sus aplicaciones en Ing. Hidráulica"
Uriel Mancebo del Castillo
3. "Manual de Diseño de Obras Civiles"
CFE . Hidrotecnia
4. "Cámaras de Oscilación, medidas experimentales y su solución numérica" . Tesis Luis León Vizcalno.
- 5 "La Teoría de las ecuaciones no lineales y el diseño de Cámaras de Oscilación" . Instituto de Ingeniería . Sánchez B . J. L , Gracia S . J
6. "Hidráulica General"
Gilberto Sotelo
7. "Guidelines to Hydraulic Transient Analysis"
S. Pejovic , Boldy and Obradovic.

APENDICE A

El programa que a continuación se presenta, se fundamenta en la teoría desarrollada en el capítulo III, el objetivo de su utilización fué simular el fenómeno oscilatorio dentro de las cámaras empleadas en la fase experimental y posteriormente poder comparar los resultados con lo medido en el modelo físico. Por lo anterior el listado maneja como valores constantes algunas características hidráulicas tales como el diámetro en la conducción, la carga disponible, etc. valores que para el diseño de las mismas se contemplan como variables.

LISTADO DEL PROGRAMA

```

10 REM PROGRAMA PARA SIMULAR EL FUNCIONAMIENTO DE UNA CAMARA DE
15 REM OSCILACION
20 REM
30 REM LOS DATOS DE ENTRADA SON:
40 REM N = FACTOR DE FRICCION DE MANNING
50 REM DTUB = DIAMETRO DEL TUBO DE CONDUCCION (m)
60 REM Q = GASTO (mCUB/s)
70 REM DCAM = DIAMETRO DE LA CAMARA DE OSCILACION (m)
80 REM G = ACELERACION DE LA GRAVEDAD (m/s*s)
90 REM L = LONG. DEL TUBO DE COND. DEL TANQUE A LA CAMARA (m)
100 REM H = CARGA EN EL TANQUE (m)
110 REM IU = NUMERO DE DATOS DE INTERVALOS DE CALCULO
120 REM LTC = LONG. DE LA TUBERIA DE LA CAMARA A LA COMPUERTA (m)
130 REM DT = INTERVALO DE TIEMPO (s)
140 REM II = INTERVALO DE IMPRESION DE RESULTADOS
150 REM AZ = AREA DE ABERTURA DE LA COMPUERTA (m*m)
160 REM CERO = NIVEL DE REFERENCIA SELECCIONADO (m)
170 REM
180 CERO = .1
190 N=.011;DTUB=.0762;Q=.00006;DCAM=.1016
200 G=9.810001;L=10.7;H=1.7;IU=125;LTC=1.285
210 COSUB 1170
220 DT = .1; II = 5
230 OV = VELT; AZ = .0006637
240 PRINT "N=";N;"DTUB=";DTUB;"Q=";Q;"L=";L;"H=";H;"AZ=";AZ;"AC=";AC
250 AC = ACAM
260 LG = L/G
270 RA = AC/AT
280 KC = (RA-1) ^ 2 / (2*G)
290 KS = (((AT/AZ)-1) ^ 2/19.62)+(AT/AZ)^2/(2*G)
300 CK=KC
310 CKF=KC*1
320 KS = (AT/AZ) ^ 2 / (2*G)
330 PK = 1/(P2+KS) ^ .5
340 OX = -P1 * OV ^ 2
350 OZ = (OV - PK * (H + OX) ^ .5) / RA
360 XO = OX
370 ZO = OZ
380 LPRINT "RESULTADOS DEL PROGRAMA PARA LOS DATOS EMPLEADOS"
390 LPRINT " "
400 LPRINT "XO= ";XO; "ZO= ";ZO;
410 LPRINT " T V X Z "
420 OPEN "O", #1, "A:ARCHSALI.WK1"
430 PRINT #1, O, XO
440 I = 1
450 X = XO

```

```

460 Z = Z0
470 Y = (H + X) ^ .5
480 W = RA * Z + PK * Y
490 Q = KC * ABS(Z) + LG * PK / Y
500 E = P1 * W * ABS(W)
510 F = Q * Z + X
520 GA = -(E + F) / (LG * RA)
530 K1 = DT * Z
540 L1 = DT * GA
550 X = X0 + K1 / 2
560 Z = Z0 + L1 / 2
570 Y = (H + X) ^ .5
580 W = RA * Z + PK * Y
590 Q = KC * ABS(Z) + LG * PK /
600 E = P1 * W * ABS(W)
610 F = Q * Z + X
620 GA = -(E + F) / (LG * RA)
630 K2 = DT * Z
640 L2 = DT * GA
650 X = X0 + K2 / 2
660 Z = Z0 + L2 / 2
670 Y = (H + X) ^ .5
680 W = RA * Z + PK * Y
690 Q = KC * ABS(Z) + LG * PK /
700 E = P1 * W * ABS(W)
710 F = Q * Z + X
720 GA = -(E + F) / (LG * RA)
730 K3 = DT * Z
740 L3 = DT * GA
750 X = X0 + K3
760 Z = Z0 + L3
770 Y = (H + X) ^ .5
780 W = RA * Z + PK * Y
790 Q = KC * ABS(Z) + LG * PK /
800 E = P1 * W * ABS(W)
810 F = Q * Z + X
820 GA = -(E + F) / (LG * RA)
830 K4 = DT * Z
840 L4 = DT * GA
850 SK = K1 + 2 * (K2 + K3) + K4
860 SL = L1 + 2 * (L2 + L3) + L4
870 XI = X0 + SK / 6
880 ZI = Z0 + SL / 6
890 IF ABS (XI) > (H * .75) THEN STOP
900 T = I * DT
910 B = KC * Z0 * ZI + (X0 + XI) / 2
920 NU = LG * OV / DT - B
930 DE = P1 * OV + LG / DT
940 VI = NU / DE
950 J = INT(I / II)
960 IF (J * II) = I THEN 1090
970 OV = VI

```

```

980 XO = XI
990 ZO = ZI
1000 NI = I
1010     I = NI + 1
1020 IF I = IU THEN 1110
1030 GOTO 970
1040 T = 1 * DT
1050 XI = IX
1060 LPRINT USING "##.#### " ; T; VI; XI+CERO; ZI
1070     PRINT #1, T, XI+CERO
1080 GOTO 450
1090     CLOSE #1
1100 PRINT "YA ACABE"
1110 STOP
1120 REM CALCULO DE P1 Y P2
1130 L2 = LTC
1140 ATUB = (3.1416/4)*DTUB ^ 2
1150 ACAM = (3.1416/4)*DCAM ^ 2
1160 RH=(DTUB/4)^(2/3)
1170 P1 = ((N/RH)^2)*L1
1180 P2 = ((N/RH)^2)*L2
1190 AT = ATUB
1200 VELT = Q/AT
1210 PRINT "AT= "; AT; "OV= "; VELT; "P1= "; P1; "P2= "; P2
1220 RETURN

```

APENDICE B

A continuación se presenta en forma tabular los valores de las oscilaciones tanto teóricas como medidas, para el intervalo de tiempo fijado, con el propósito de poder construir las gráficas que permitan lograr una comparación.

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 2''$
 CIERRE PRUEBA No. 1

TIEMPO (SEG)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	- 0.05	- 0.138
1	0.35	0.387
2	0.59	0.626
3	0.55	0.545
4	0.2	0.224
5	- 0.2	- 0.134
6	- 0.37	- 0.372
7	- 0.26	- 0.41
8	- 0.1	- 0.25
9	0.1	0.0
10	0.25	0.22
11	0.32	0.309
12	0.25	0.247
13	0.1	0.07
14	- 0.08	- 0.11
15	- 0.24	- 0.23
16	- 0.27	- 0.119
17	- 0.2	0.03
18	- 0.1	0.164
19	0.0	0.201

DIAMETRO DE LA CAMARA $\phi = 2''$
 ABERTURA PRUEBA No. 2

TIEMPO (SEC)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	0.093	0.08
1	- 0.46	- 0.47
2	- 0.1	- 0.094
3	0.22	0.15
4	0.15	0.08
5	- 0.04	- 0.076
6	- 0.09	- 0.072
7	0.05	0.031
8	0.045	0.054
9	0.015	- 0.013
10	- 0.015	- 0.046
11	- 0.02	- 0.048
12	0.01	0.02
13	0.02	0.007
14	0.005	- 0.025
15	- 0.01	- 0.015
16	0.0	0.012
17	0.0	0.011
18	0.0	- 0.01
19	0.0	- 0.015

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 2''$
 CIERRE PRUEBA No. 2

TIEMPO (SEG)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	- 0.1	- 0.05
1	0.6	0.58
2	0.2	0.18
3	- 0.39	- 0.33
4	- 0.25	- 0.26
5	0.12	0.18
6	0.38	0.2
7	- 0.12	0.12
8	- 0.22	- 0.16
9	- 0.2	- 0.14
10	0.0	0.04
11	0.2	0.13
12	0.08	- 0.05
13	- 0.15	- 0.08
14	- 0.08	- 0.02
15	0.08	0.03
16	0.18	0.1
17	0.02	0.0
18	- 0.06	- 0.03
19	- 0.05	- 0.02

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 2''$
 ABERTURA PRUEBA No. 2

TIEMPO (SEG)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	0.023	0.02
1	- 0.22	- 0.26
2	- 0.05	- 0.062
3	0.15	0.12
4	0.09	0.059
5	- 0.05	- 0.067
6	- 0.08	- 0.06
7	0.04	0.028
8	0.06	0.04
9	0.01	- 0.015
10	- 0.04	- 0.041
11	- 0.05	- 0.004
12	0.005	0.025
13	0.04	0.004
14	0.02	- 0.024
15	0.0	- 0.014
16	- 0.02	0.01
17	0.01	0.008
18	0.02	- 0.011
19	0.015	- 0.014

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 3''$
 CIERRE PRUEBA No. 1

TIEMPO (SEC)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	- 0.22	- 0.15
1	0.34	0.2
2	0.49	0.46
3	0.22	0.23
4	- 0.16	- 0.02
5	- 0.36	- 0.2
6	- 0.24	- 0.28
7	- 0.025	- 0.05
8	0.21	0.18
9	0.198	0.32
10	0.026	0.15
11	- 0.15	- 0.02
12	- 0.18	- 0.22
13	- 0.074	- 0.24
14	0.07	- 0.02
15	0.132	0.18
16	0.078	0.21
17	- 0.034	0.09
18	- 0.108	- 0.03
19	- 0.089	- 0.15

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 3^\circ$
 ABERTURA PRUEBA No. 1

TIEMPO (SEG)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	0.02	0.09
1	- 0.37	- 0.36
2	- 0.3	- 0.32
3	- 0.06	- 0.071
4	0.13	0.13
5	0.22	0.17
6	0.13	0.073
7	0.02	- 0.07
8	- 0.09	- 0.13
9	- 0.09	- 0.088
10	- 0.02	0.01
11	0.04	0.07
12	0.05	0.066
13	0.025	0.004
14	0.0	- 0.055
15	- 0.025	- 0.065
16	- 0.018	- 0.027
17	0.003	0.021
18	0.005	0.041
19	0.012	0.022

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 3''$
 CIERRE PRUEBA No. 2

TIEMPO (SEG)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	- 0.085	- 0.06
1	0.2	- 0.34
2	0.4	- 0.41
3	0.25	0.14
4	0.0	- 0.21
5	- 0.26	- 0.35
6	- 0.33	- 0.19
7	- 0.11	0.087
8	0.14	0.26
9	0.3	0.2
10	0.16	- 0.015
11	0.0	- 0.19
12	- 0.19	- 0.2
13	- 0.22	- 0.048
14	- 0.05	0.12
15	0.15	0.17
16	0.2	0.078
17	0.1	- 0.073
18	0.0	- 0.15
19	- 0.1	- 0.1

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 3''$
 ABERTURA PRUEBA No. 2

TIEMPO (SEC)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	0.093	0.108
1	- 0.34	- 0.29
2	- 0.10	- 0.128
3	0.09	0.009
4	0.22	0.079
5	0.25	0.087
6	0.15	0.057
7	0.05	0.017
8	- 0.04	- 0.012
9	- 0.10	- 0.024
10	- 0.09	- 0.021
11	- 0.01	- 0.010
12	0.05	0.025
13	0.06	0.006
14	0.045	0.0076
15	- 0.03	0.006
16	- 0.015	- 0.01
17	- 0.01	- 0.008
18	- 0.02	- 0.011
19	0.015	- 0.014

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 4''$
 CIERRE PRUEBA No. 1

TIEMPO (SEG)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	- 0.131	- 0.18
1	0.11	0.12
2	0.32	0.31
3	0.37	0.33
4	0.2	0.18
5	0.02	- 0.034
6	- 0.16	- 0.21
7	- 0.3	- 0.27
8	- 0.22	- 0.2
9	- 0.08	- 0.054
10	0.07	0.089
11	0.21	0.167
12	0.2	0.156
13	0.12	0.07
14	0.03	- 0.045
15	- 0.06	- 0.133
16	- 0.16	- 0.18
17	- 0.19	- 0.098
18	- 0.1	- 0.014
19	0.0	0.067

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 4''$
 ABERTURA PRUEBA No. 1

TIEMPO (SEG)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	0.131	0.11
1	- 0.19	- 0.3
2	- 0.33	- 0.34
3	- 0.21	- 0.2
4	- 0.09	- 0.052
5	0.03	- 0.055
6	0.14	0.101
7	0.11	0.087
8	0.07	0.032
9	0.03	- 0.033
10	- 0.02	- 0.076
11	- 0.05	- 0.082
12	- 0.03	- 0.055
13	- 0.01	- 0.015
14	0.01	0.018
15	0.03	0.031
16	0.03	0.024
17	0.01	0.025
18	0.0	- 0.02
19	0.0	- 0.03

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 4^\circ$
 CIERRE PRUEBA No. 2

TIEMPO (SEG)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	- 0.06	- 0.07
1	0.08	0.13
2	0.19	0.24
3	0.24	0.22
4	0.15	0.099
5	0.02	- 0.063
6	- 0.11	- 0.18
7	- 0.2	- 0.21
8	- 0.16	- 0.13
9	- 0.07	- 0.014
10	0.03	0.1
11	0.11	0.15
12	0.17	0.12
13	0.12	0.04
14	0.05	- 0.062
15	- 0.03	- 0.125
16	- 0.1	- 0.126
17	- 0.145	- 0.068
18	- 0.1	0.012
19	0.0	0.0

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 4''$
 ABERTURA PRUEBA No. 2

TIEMPO (SEG)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	0.06	0.05
1	- 0.21	- 0.16
2	- 0.19	- 0.21
3	- 0.11	- 0.16
4	- 0.03	- 0.05
5	0.05	0.046
6	0.125	0.102
7	0.14	0.098
8	0.1	0.047
9	0.04	- 0.021
10	- 0.01	- 0.073
11	- 0.06	- 0.086
12	- 0.06	- 0.06
13	- 0.03	- 0.014
14	0.0	0.029
15	0.02	0.05
16	0.045	0.04
17	0.03	- 0.014
18	0.02	- 0.04
19	0.0	- 0.04

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 5''$
 CIERRE PRUEBA No. 1

TIEMPO (SEG)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	- 0.17	- 0.2
1	0.0	- 0.06
2	0.14	0.092
3	0.26	0.27
4	0.3	0.33
5	0.21	0.28
6	0.13	0.15
7	0.03	- 0.011
8	- 0.07	- 0.15
9	- 0.16	- 0.23
10	- 0.22	- 0.235
11	- 0.15	- 0.17
12	- 0.06	- 0.066
13	0.03	0.036
14	0.11	0.108
15	0.17	0.14
16	0.14	0.12
17	0.08	0.065
18	0.01	- 0.007
19	- 0.05	- 0.074

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 5''$
 ABERTURA PRUEBA No. 1

TIEMPO (SEG)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	0.17	0.15
1	- 0.06	- 0.2
2	- 0.23	- 0.27
3	- 0.25	- 0.21
4	- 0.18	- 0.12
5	- 0.115	- 0.053
6	- 0.05	0.001
7	0.01	0.035
8	0.05	0.05
9	0.07	0.045
10	0.05	0.027
11	0.01	0.004
12	- 0.01	- 0.018
13	- 0.015	- 0.032
14	- 0.009	- 0.036
15	- 0.005	- 0.029
16	0.0	- 0.017
17	0.0	0.003
18	0.0	0.008
19	0.0	0.013

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 5''$
 CIERRE PRUEBA No. 2

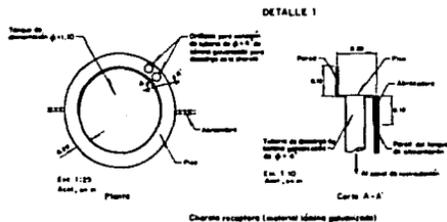
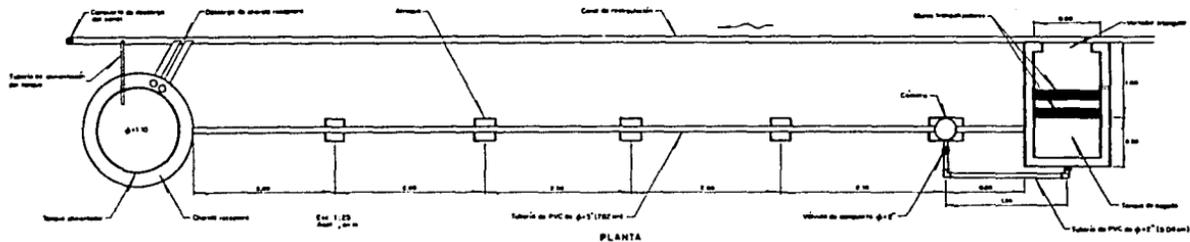
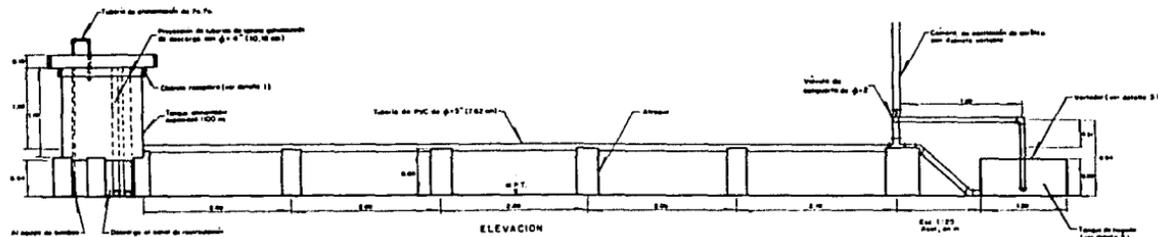
TIEMPO (SEC)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	- 0.29	- 0.39
1	- 0.07	- 0.11
2	0.104	0.13
3	0.27	0.27
4	0.25	0.3
5	0.16	0.24
6	0.04	0.11
7	- 0.07	- 0.042
8	- 0.17	- 0.16
9	- 0.26	- 0.22
10	- 0.2	- 0.21
11	- 0.1	- 0.14
12	0.0	- 0.039
13	0.08	0.052
14	0.15	0.11
15	0.19	0.13
16	0.15	0.104
17	0.1	0.047
18	0.03	- 0.022
19	0.0	0.0

DIAMETRO DE LA CAMARA $\theta = 5''$
 ABERTURA PRUEBA No. 2

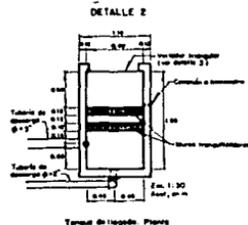
TIEMPO (SEG)	EXPERIM. (M)	TEORICO (M)
0	0.029	0.2
1	0.06	- 0.1
2	- 0.17	- 0.3
3	- 0.28	- 0.22
4	- 0.2	- 0.13
5	- 0.12	- 0.05
6	- 0.04	- 0.002
7	0.03	0.03
8	0.045	0.05
9	0.03	0.046
10	0.027	0.029
11	0.02	0.005
12	0.012	- 0.016
13	0.01	- 0.031
14	0.009	- 0.036
15	0.0	- 0.03
16	- 0.01	- 0.018
17	0.01	- 0.004
18	0.0	0.007
19	0.0	0.013

APENDICE C

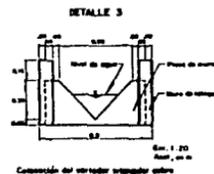
(PLANO ANEXO)



Detalle 1



Detalle 2



Detalle 3

INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA
CAMARA DE OSCILACION

PROYECTO 0332 FECHA AGOSTO/91