

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA



BIBLIOTECA

“CHIMENEA HIDRAULICA DE EQUILIBRIO”

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de
INGENIERO MECANICO

PRESENTADA POR:

JORGE ALBERTO CARRILLO BURGOS



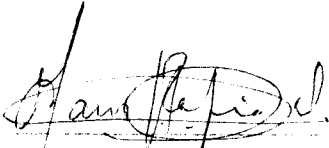
D-9201

GUAYAQUIL - ECUADOR

1988

A G R A D E C I M I E N T O

Al ING. GALO BETANCOURT S.
Director de Tesis, por su
ayuda y colaboración para
la realización de este tra-
bajo.



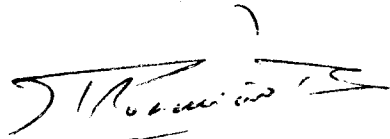
Ing. Mardiana Mardiana S.
SURABAYA



Ing. Gede Dalanawati S.
DIRECTOR TESIS



Ing. Mardiana Mardiana
MEMBER TRIBUNAL



Ing. Mardiana Mardiana
MEMBER TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

" La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expresados en esta tesis, es correspondiente a quien suscribe y no al patrimonio intelectual de la escuela, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.

" Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESCUELA.



Jorge Carrillo Burgos

RESUMEN

Este trabajo comprende la visualización del efecto del "golpe de ariete" que consiste en la compresibilidad del líquido y la elasticidad de las paredes de la tubería; y la manera de amortiguar altas presiones peligrosas de la forma más rápida posible, previniendo fatigas en ductos, especialmente en túneles de aducción en centrales hidroeléctricas que alimentan a las turbinas.

Principalmente consta de una parte teórica donde se señalan las ecuaciones necesarias para el desarrollo del tema y una parte experimental donde se simulan constantes como una represa construida en un tanque, túnel de aducción o tubería que termina en un tanque de amortiguación denominado chimenea de equilibrio, junto con las válvulas de control respectivamente.

La chimenea no fué factible construirla de forma cilíndrica, razón por la que se la construyó de sección cuadrada, bajo los mismos parámetros.

También se obtuvo diferentes curvas de amortiguación, cambiando el diámetro del orificio de entrada en la base de la chimenea, haciéndolo cada vez más restringido.

Además se diseñó un programa de computación para obtener teóricamente las curvas de amortiguación y también para evaluarlo con la experimentación.

INDICE GENERAL

RESUMEN

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE ABREVIATURAS

INTRODUCCION

1.- FLUJO NO PERMANENTE EN DUCTOS

1.1.- Introducción.

1.2.- Antecedentes.

2.- EL GOLPE DE ARIETE.

2.1.- Origen e Importancia del Fenómeno

2.2.- Teoría del Golpe de Ariete y sus Efectos.

2.2.1.- Derivaciones Matemáticas para Obtener
Ecuaciones de Flujo Momentáneo.

2.3.- Chimenea Hidráulica de Equilibrio Como Solución
al Problema.

3.- ANALISIS TEORICO DEL MOVIMIENTO AMORTIGUADO Y RESULTADOS.

3.1.- Ecuaciones Fundamentales que intervienen en el
Análisis de Flujo.

3.1.1.- Teoría de la Columna de Agua Rígida.

3.1.2.- Ecuación de la Energía.

3.2.- Ecuación del Movimiento Amortiguado.

3.3.- Altura Máxima de la Chimenea Hidráulica.



BIBLIOTECA

3.4.- Período de Estabilización de la Onda Amortiguada.

3.5.- Resultados del Análisis.

4.- DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL.

4.1.- Diseño de la Estructura.

4.2.- Selección de Elementos: Tubería, Bomba, Válvulas y Reservorios.

4.3.- Construcción de la Chimenea.

5.- PRUEBAS EXPERIMENTALES.

5.1.- Oscilación del Nivel de Agua en la Chimenea Hidráulica.

5.2.- Decaimiento de las Oscilaciones en la Chimenea Hidráulica.

6.- EVALUACION DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

APENDICES.

TABLAS DE RESULTADOS

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

INDICE DE FIGURAS

- Fig. 1.- Onda de Sobrepresión en el Cierre Instantáneo de una Válvula.
- Fig. 2.- a) Válvula al Final de la Tubería.
b) Cabezal de Presión del golpe de Ariete en N, B y M.
- Fig. 3.- a) Onda Pulso que Produce un Cambio de Cabezal.
b) Ecuación de Momento Aplicada a un Volumen de Control.
- Fig. 4.- Relación de Continuidad en un ducto.
- Fig. 5.- a) La presión interna origina una tensión tangencial.
b) Determinación del Valor F en Cilindro de Pared Delgada.
- Fig. 6.- a) Presión Interna Igual Fuerza.
b) Determinación de Fallas en las Juntas.
- Fig. 7.- Chimenea de Equilibrio Sencilla.
- Fig. 8.- Chimenea de Equilibrio de Orificio.
- Fig. 9.- Tanque de Estrangulación.
- Fig.10.- Forma de Estrangulación en Base de Chimenea.
- Fig.11.- Chimenea de Equilibrio Diferencial.
- Fig.12.- Chimenea de Equilibrio Diferencial Separada.
- Fig.13.- Gradiente Hidráulico para Cierre de Compuerta.
- Fig.14.- Elementos de Un Tubo de Corriente.
- Fig.15.- Flujo Estable e Inestable de un Fluido Incompresible en un Ducto Horizontal.
- Fig.16.- Representación Esquemática de la Chimenea de

Equilibrio con los Niveles en Operación Normal.

Fig.17.- Curva de Máxima y Mínima Elevación en la Chimenea de Equilibrio.

Fig.18.- Representación de las Oscilaciones de Nivel de Agua con un Brusco Cerramiento de Compuertas.

Fig.19.- Representación de las Oscilaciones de Nivel de Agua con Brusca Apertura de Compuertas.

Fig.20.- Períodos de Oscilación de Nivel h y Velocidad V .

Fig.21.- Oscilación de la Onda de Presión en el Tanque Chimenea hasta su Equilibrio.

Fig.22.- Conexión de la Tubería al Reservorio y Accesorios.

Fig.22'. Diagrama de Moody.

Fig.23.- Instalación de un Tubo Pitot en una Tubería.

Fig.24.- Válvula de Compuerta y sus Partes.

Fig.25.- Válvula de Bola y sus Partes.

Fig.26.- Construcción Reservorio Mayor y sus Accesorios.

Fig.27.- Instalación Reservorio Menor y los Equipos de Reposición.

Fig.28.- Sección Transversal de la Chimenea de Equilibrio

Fig.29.- Base de la Chimenea que se une a la Tubería.

Fig.30.- Calibración de Cotas en dos Tanques.

Fig.31.- Cota Constante en la Base de la Chimenea de Orificio restringido.

Fig.32.- Línea de Altura Piezométrica a lo Largo de la Tubería.

INDICE DE ABREVIATURAS

- A = Coeficiente de la Ecuación Característica.
- A_1 = Área de la Tubería.
- A_2 = Área del Orificio.
- a = Velocidad de Onda.
- B = Coeficiente de Ecuación Característica.
- C_1 = Coeficiente de la Velocidad V_1 .
- C_2 = Coeficiente de la Velocidad V_2 .
- D = Diámetro de la Tubería.
- E = Módulo elasticidad material de la tubería (Kg/cm^2).
- e = Espesor de la Tubería (m).
- F = $A_B = A_{TH}$ = Área de la Secc. Transv. Tanque-Chimenea.
- g = Gravedad.
- h = Desplazamiento del nivel en la Chimenea.
- h_{LT} = Cabezal de Pérdida en el Tanque.
- h_1 = Cabezal Hasta la Entrada de la Tubería.
- h_2 = Cabezal Constante desde la Tubería hasta la Base de la Chimenea.
- h_3 = Cabezal Variable en la Chimenea de Equilibrio.
- H_a = Cabezal desacelerativo.
- $H_0 = H_R = H_n$ = Niv. Inic. en Reservorio = Alt. salto nat.
- K_1 = Coeficiente de Pérdida a la Salida del Tanque.
- K_2 = Coeficiente de Pérdidas en las Uniones.
- K_3 = Coeficiente de Pérdida en la Tee de la Tubería.
- K_4 = Coeficiente de Restricción en la Base de la Chimenea.

- K = Módulo de Elasticidad del Agua (Kg/cm^2),
 L = Longitud de la Tubería (m).
 m = Masa de Agua.
 P = Presión del Fluido.
 Q = Flujo de Agua en la Descarga.
 S = Espacio.
 t = Tiempo en Seg.
 T = Período de Onda de Amortiguación.
 T_c = Tiempo del Cierre de la Válvula.
 V_o = Velocidad en el Punto O.
 V_1 = Velocidad en la Entrada a la Tubería.
 V_z = Velocidad del Agua a lo Largo de la Tubería y de la Base de la Chimenea de Equilibrio.
 Z_1 = Distancia desde el Centro de la Reducción hasta un $Z = 0$.
 Z_o = Nivel de Referencia.



LETRAS GRIEGAS.

- ΔP = Variación o Cambio de Presión.
 ΔA = Cambio de Area de Sección Transversal.
 Δ = Variación Pequeña o Cambio de Algún Valor.
 ΔV = Cambio de velocidad del Fluido.
 Γ = Peso Específico del Agua.
 δ = Densidad del Agua.
 ϵ = Deformación Unitaria Lateral.
 ϵ_1 = Deformación Unitaria Axial.
 μ = Relación de Poisson.

σ_1 = Esfuerzo Axial Unitario.

σ_2 = Esfuerzo Lateral Unitario.

ϵ = Cambio en la Deformación.

π = Pi.

α = Angulo de Caída de la Tubería.

θ = Angulo de Inclinación de la Tubería.

Ψ = Solución de Ecuación Característica.

Σ = Sumatoria.

INTRODUCCION

Cuando hablamos de los inconvenientes y problemas que pueden suceder en una tubería de presión, es cuando tenemos que pensar en como solucionar el golpeteo o martilleo que se escucha en el interior de la tubería, y cuando se realizan maniobras de abrir o cerrar válvulas. Una de las soluciones es abrir o cerrar lentamente.

En sistemas hidráulicos que poseen válvulas que actúan rapidamente, la forma de eliminar este ruido en la tubería es instalando equipos que regulen la presión en la tubería. Una de las formas más aceptadas es la instalación de las cámaras de equilibrio o chimeneas de equilibrio.

Estas chimeneas estan situadas lo más cerca posible a las válvulas que ejecutan una acción de abrir o cerrar.

Con esta forma de regular la onda de presión se logra transformar la energía cinética que lleva el fluido en la tubería a energía potencial, cuando el nivel de agua en la chimenea comienza a oscilar rapidamente, hasta conseguir su reposo. Esta forma de amortiguar una onda de presión peligrosa no es otra cosa sino una manera de proteger una tubería, un túnel o galería de presión que para su construcción se gastan millones de sucres y para su reparación tiempo y dinero, dejando de prestar servicios vitales como energía eléctrica o llevar agua en sistemas de bombeo.

Existen diferentes tipos de chimenea de equilibrio, las

de tanque simple, tanque con elevador, otras de derrame controlado, etc., pero todas con la misma idea de proteger y amortiguar. En nuestro caso se obtuvo la representación práctica de chimenea de orificio restringido, la misma que nos dió la experimentación suficiente para comprobar parte de la teoría. El tema de chimenea de equilibrio hoy en día significa una asesoría muy costosa por cuanto implica la intervención de especialistas en diseño tanto de Ingeniería Civil en Mecánica de Suelos como de Ingenieros Mecánicos.

CAPITULO 1

FLUJO NO PERMANENTE EN DUCTOS

1.1.- INTRODUCCION

Esta tesis tratará con algunos aspectos de transientes hidráulicas, variaciones de flujo y presión que ocurren cuando un estado estable cambia a otro estado estable. Estas transientes, producto de las perturbaciones que sufre el fluido, dan lugar a que en la tubería se presenten ruidos, fátiga, corrosión por cavitación, etc., que ponen en peligro el flujo de un fluido y al sistema que lo lleva.

Es precisamente estos cambios en el flujo que lo vuelven no permanente, y además interviene una nueva variable que es el tiempo.

En el flujo no permanente hablamos del término SURGE (oleaje) que es muy utilizado para cubrir tres tipos principales de transientes hidráulicas; como son golpe de ariete, oscilación de masa y oleaje de canal abierto.

Para que se establezca un sistema de alimentación a una turbina hidráulica es necesario que transcurra un tiempo durante el cual hay un rápido movimiento de ondas en el agua. Estos movimientos de ondas son a la velocidad del sonido y el fenómeno es conocido como golpe de ariete.

Si el agua es suministrada a través de túneles o

tuberías a las turbinas hidráulicas, las cuales tienen un tanque de oleaje o chimeneas de equilibrio, pueden ocurrir oscilaciones de masa de agua corriente abajo en los canales abiertos o en las tuberías.

Un tanque de oleaje "SURGE" ha sido definido como un tanque abierto conectado a un sistema de tubería. Un simple tanque de oleaje tiene muy poca resistencia de líquido dentro o fuera de él, y es dimensionado de manera que no sobrevengan derramamientos por paradas instantáneas o entrada de aire cuando hay demanda de energía hidráulica. Estos tanques simples, llamados a veces chimeneas de equilibrio, sirven de punto de reflexión de las ondas de presión, para proteger a los túneles o tuberías grandes de la excesiva oscilación de la onda de presión de corto período.

En resumen, la regulación de la velocidad de rotación de la turbina se la realiza por medio de un gobernador o regulador de velocidad; las variaciones de presión en un conducto forzado, causados por apertura o cierre brusco de la admisión en las turbinas, debido a su vez a demanda o supresión instantánea de una porción de la carga, se realiza por un regulador de presión o chimenea de equilibrio.

1.2.- ANTECEDENTES

Cuando intentamos entender el fenómeno de oleaje por presión es importante recordar que la presión en un sistema depende de la posición que ocurre en el sistema y del tiempo.

Las variaciones de presión que ocurren en un punto en un ducto son gobernados por la distancia desde ese punto al sitio donde es originada una onda de presión transiente.

La obtención de las ecuaciones diferenciales para el flujo inestable de líquidos en conductos elásticos están basados en el principio de conservación de la masa y del momento.

La forma de las soluciones de estas ecuaciones han variado con el paso de los años, desde las fases de aritmética y gráfica a la numérica y métodos de impedancia utilizados hoy en día.

Los progresos hechos hasta la actualidad en materia de fluidos no permanente han incluido:

- Desarrollo de las ecuaciones de movimiento y continuidad para el fluido inestable.
- El análisis del concepto de transición y reflexión de ondas.
- La ecuación para dar un valor aproximado a la velocidad de propagación de onda.
- El reconocimiento y su utilización de equipos supresores de oleajes tales como vasijas de aire,

válvulas de seguridad y cámaras de equilibrio.

Las cámaras de equilibrio conocidas como chimeneas de equilibrio encontramos que son muy utilizadas hoy en día en las plantas hidroeléctricas y de bombeo para el control de los cambios de presión como resultado de cambios rápidos en el flujo. Por ejemplo, cuando las compuertas de una turbina son cerradas en una planta de energía, la cual esta siendo alimentada por un largo túnel, la superficie del agua en la chimenea de equilibrio se levanta lentamente arriba del nivel original como si la energía cinética del flujo rechazado es convertido en energía potencial.

Tal conversión de energía reduce la relación del cambio de flujo y el golpe de ariete en la tubería forzada entre el túnel y el tanque chimenea.

Similarmente, con el movimiento de abrir las compuertas de la turbina, la energía es suministrada por la chimenea de equilibrio para la inmediata demanda de flujo de la turbina. Esta acción reduce el efecto del golpe de ariete a lo largo de la tubería forzada y ayuda a la turbina a coger su carga incrementándolo mas rápidamente.

En una planta de bombeo con una línea larga de descarga, una chimenea de equilibrio también puede ser usada para controlar efectivamente los cambios de presión en la línea de descarga resultante de

las paradas o arranques de una bomba. Por ejemplo, siguiendo a una rápida interrupción de una bomba, la chimenea de equilibrio provee energía con el suministro de fluido, para reducir la relación de cambio de flujo y el golpe de ariete en la línea de descarga. Al arrancar una bomba, la mayoría del flujo inicial desde la bomba entra a la chimenea y ésta acción reduce el efecto del golpe de ariete en una larga línea de descarga.

Para prevenir acciones inestables, la chimenea de equilibrio debe tener suficiente área de sección transversal. En el caso de una chimenea con un área demasiado pequeña, un cambio de carga en la turbina causaría continuas oscilaciones del nivel de agua en la chimenea, posiblemente con aumento en amplitud. Esto causaría inestabilidad en el sistema. En el caso contrario, al aumentar el área de la sección transversal de una chimenea en una planta de energía sucedería que la magnitud del oleaje será pequeño durante cambios de carga normales en la turbina. De ésta manera, la regulación de la velocidad de la turbina será difícil o hasta peligrosa.

CAPITULO 2

EL GOLPE DE ARIETE

2.1.- ORIGEN E IMPORTANCIA DEL FENOMENO

El golpe de ariete es un fenómeno que ocurre en las tuberías en que el fluido deja de ser incompresible y permanente y pasa a ser compresible y de régimen variable y la tubería ya no es rígida, pudiendo suceder este fenómeno transitoriamente.

Este fenómeno se produce en las tuberías cuando se cierra o se abre una válvula y al poner en marcha o parar una máquina hidráulica, o también al disminuir bruscamente el caudal suministrado a las turbinas hidráulicas acopladas al generador. Esto significa que si la velocidad de un líquido en una tubería es abruptamente disminuída por un movimiento de válvula el fenómeno encontrado es el denominado golpe de ariete. Por lo que debe proyectarse la instalación de manera que no se produzca un golpe de ariete excesivo que afecte a la tubería.

En la figura # 1 se representa una tubería de longitud L , espesor e , y diámetro interior D por el que circula agua proveniente de un reservorio y que termina en su extremo derecho con una válvula. Si se cierra ésta rápidamente, en virtud del principio de conservación de la energía, al disminuir la energía cinética, ésta se va transformando en un

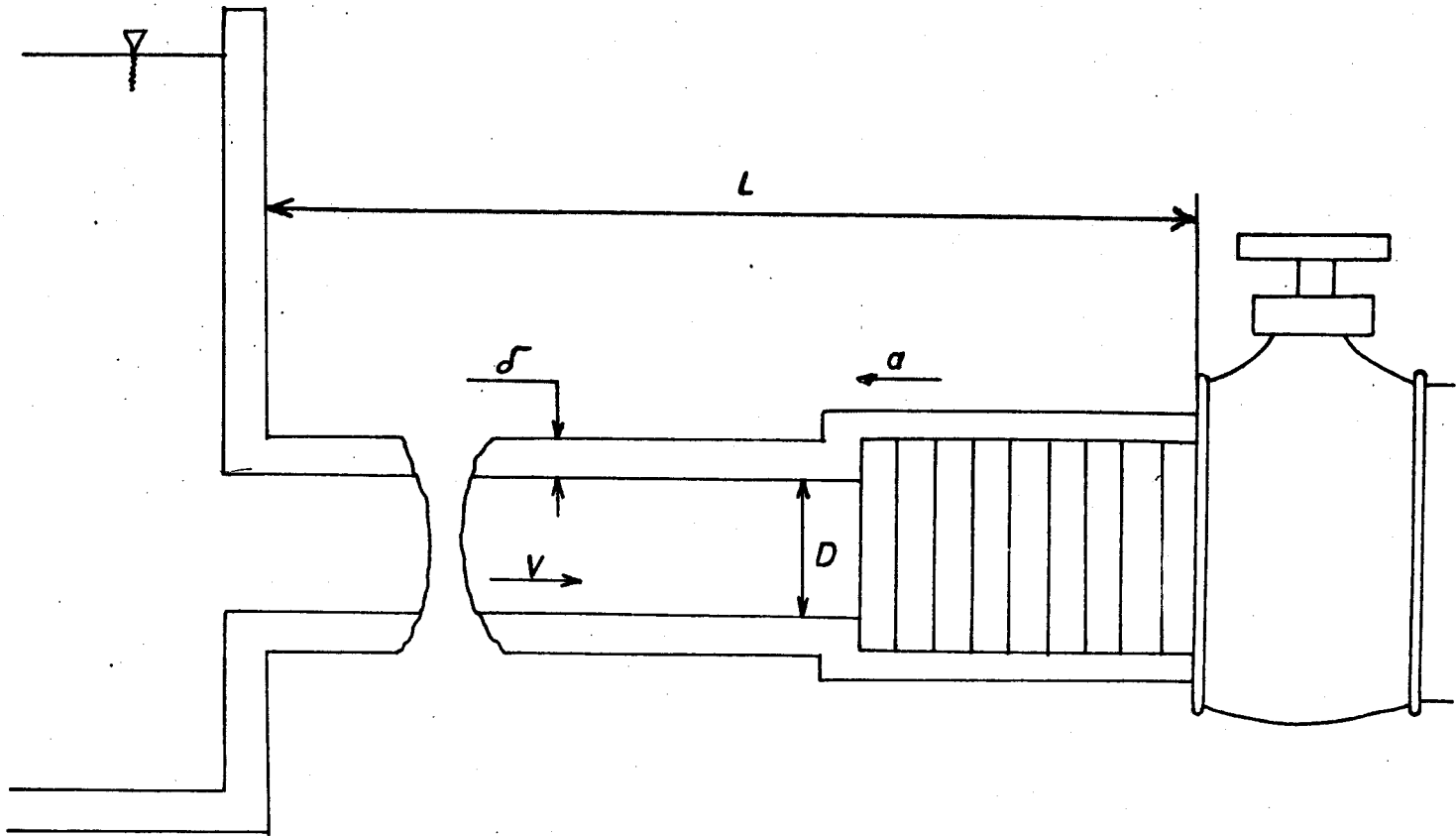


FIGURA 1

ONDA DE SOBREPRESION EN EL CIERRE INSTANTANEO
DE UNA VALVULA



trabajo de compresión del fluido que llena la tubería y en el trabajo necesario para dilatar ésta última; se ha producido una sobrepresión, o un golpe de ariete positivo.

Por el contrario, al abrir rápidamente una válvula se puede producir una depresión, o golpe de ariete negativo. Es decir, en la válvula se produce una onda de presión que viaja por la tubería, se refleja en el reservorio, vuelve a la válvula, de nuevo al reservorio y así sucesivamente, originando sobrepresión o depresiones en la tubería, por lo que se dilata y se contrae al paso de la onda. Siendo a la velocidad de la onda y L la longitud de la tubería, el tiempo que tarda la onda en recorrer una vez la distancia entre la válvula y la tubería es $t = L/a$.

El estudio de éste fenómeno nos hará ver de qué factores depende para poderlo aminorar, para calcular las sobrepresiones que se prevén en la instalación y calcular el espesor de la tubería para resistir a ésta sobrepresión. Por lo que se deduce que cualquier perturbación en la presión de un fluido se propaga en ondas y éstas ondas se mueven a una velocidad igual a la de propagación del sonido a través del fluido. Su magnitud se determina en la siguiente sección.

2.2.- TEORIA DEL GOLPE DE ARIETE Y SUS EFECTOS

El golpe de ariete es un término que se utiliza para describir el fenómeno producido por una súbita disminución en la velocidad del fluido en una tubería, causado por el movimiento de una válvula.

Cierre instantáneo:

Al hablar de cierre instantáneo se diría que es físicamente imposible cerrar una válvula instantáneamente, tal concepto es útil como una introducción a los casos de fluidos reales.

Por conveniencia empezaremos hablando de flujo estable en un ducto horizontal con la válvula parcialmente abierta. Ver fig. 2a, donde se asume que la válvula en N es cerrada instantáneamente.

En la fig. 2a vemos que la lámina de líquido próximo a la válvula será comprimida por la columna del líquido fluyendo contra ella y al mismo tiempo las paredes de la tubería alrededor de ésta lámina será estirada por el exceso de presión. La próxima lámina corriente aguas arriba será llevada al reposo y así sucesivamente. El líquido en la tubería no hace de cuerpo rígido incompresible porque el fenómeno está afectado por la elasticidad de la tubería y del fluido. Cuando se detiene el flujo, como resultado hay un incremento en la presión y continúa el movimiento del fluido corriente hacia arriba como una onda con una

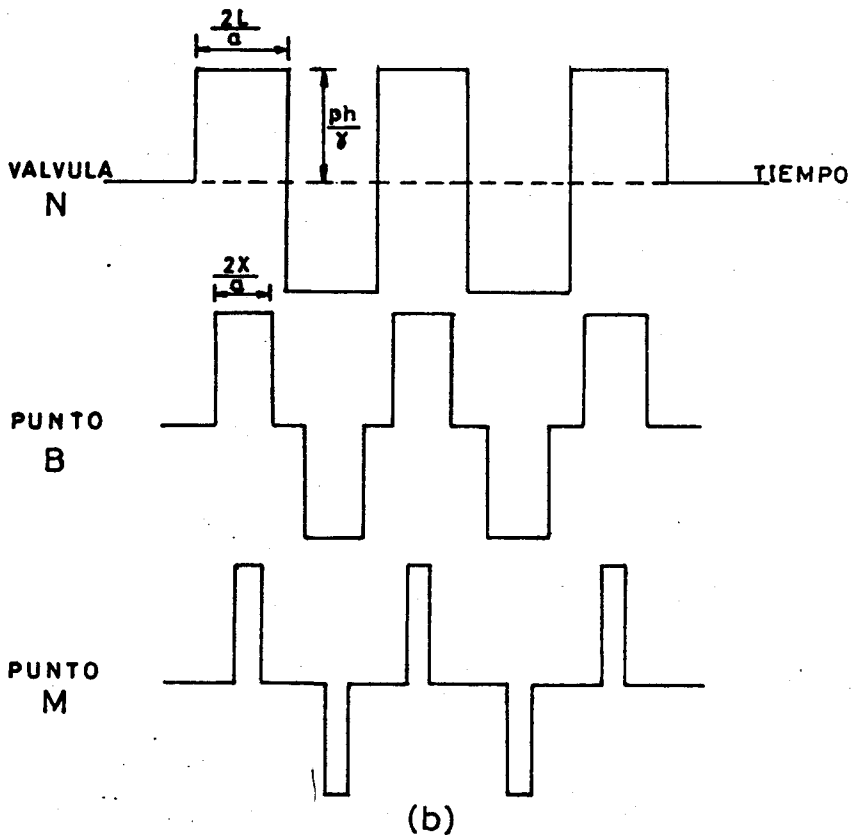
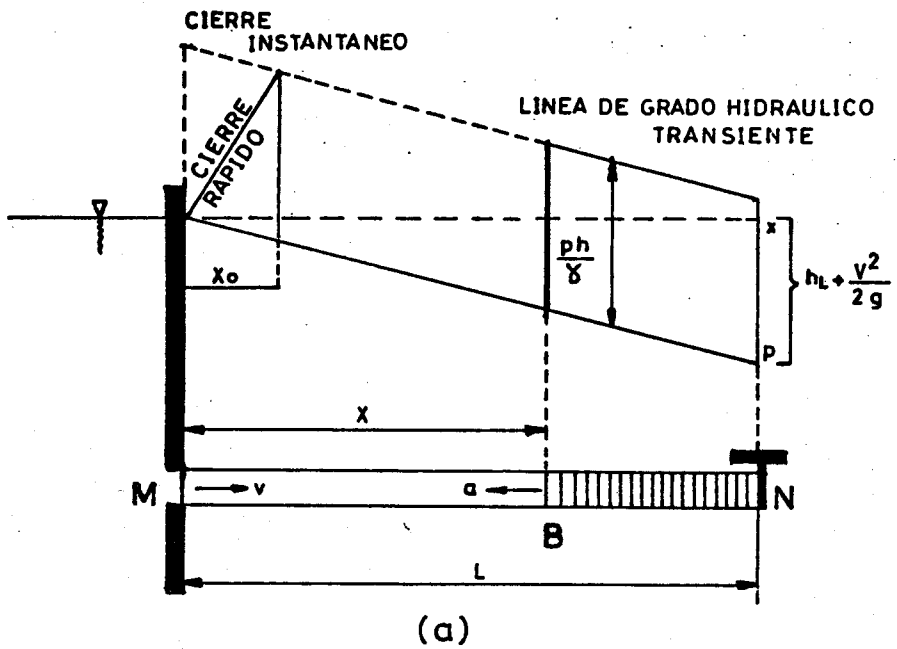


FIGURA 2

- a) Válvula al final de la tubería
- b) Cabezal de presión de golpe de ariete en: N, B y M

velocidad $a = 2L/T$.

Después de un corto intervalo de tiempo, la columna de líquido BN habrá sido llevada al reposo, mientras el líquido en la longitud BM todavía estará fluyendo con su velocidad y presión inicial. Cuando la onda de presión finalmente alcanza la entrada en M, la masa entera en la longitud L estará en reposo pero estará bajo un exceso de presión. Durante el viaje de la onda de presión desde N a M habrá una línea de grado hidráulico transiente paralela a la línea de grado hidráulico de flujo estable por XP pero a una altura Ph/T , arriba de aquel donde Ph representa la presión del golpe de ariete.

Como es imposible que la onda de presión se mantenga en M, ya que ahí la presión es mayor debido a la profundidad MX, de modo que cuando la onda llega a M, la presión cae en M instantáneamente al valor que tendría sin flujo. Pero el ducto está ahora a un exceso de presión, de modo que el líquido está comprimido y las paredes del ducto están estiradas, luego el líquido empieza a regresarse y la presión a disminuir, así sucesivamente hasta alcanzar el nivel XX.

En la figura 2b podemos observar los diferentes cabezales de presión, en N, B, y M como función del tiempo para un cierre de válvula instantáneo, despreciando los efectos de fricción y amortiguación.

El tiempo que tarda la onda de presión en viajar de regreso al reservorio y volver hasta la válvula está dado por la ecuación:

$$T_c = 2L/a \quad (1)$$

Donde L es la longitud del ducto y el exceso de presión permanece constante para un cierre de válvula instantánea durante este tiempo.

Como resultado de lo anterior podemos conocer la sobrepresión en un cierre instantáneo de válvula, esto sucede en un $t=0$.

$$p = \delta * a * v$$

$$p = 2 * \delta * L/T_c * v$$

- CIERRE LENTO.

Como no sucede el cierre instantáneo en la realidad, entonces hablamos de sobrepresión en cierre lento de la válvula y se obtiene:

$$p = 2 * K * \delta * L * v/T_c \quad (1.a)$$

Donde $K = 1$ a 2 para tubería elástica, en cierre lento (normalmente inferior a 1.5).

De donde se deduce las siguientes consecuencias prácticas.

El peligro del golpe de ariete en una instalación es tanto mayor:

- Cuanto mayor sea la longitud de la tubería,
- Cuanto mayor sea la velocidad del líquido en la tubería; y,

- Cuanto más rápido sea el cierre de la válvula. Luego los flujos estables, oscilatorios o periódicos ocurren en cada uno de los intervalos de tiempo llamado el período de oscilación.

2.2.1.- DERIVACION MATEMATICA DE LAS ECUACIONES DE FLUJO MOMENTANEO,

La ecuación del momento inestable es aplicado, primero a un volumen de control conteniendo una sección de la tubería, luego la ecuación de continuidad es desarrollada para el fluido en la tubería, luego se introducen los efectos de la relación de Poisson, para los cuales se requieren definición de los medios que soportan la tubería.

En la fig. 3a si se desprecia fricción y pérdidas menores, en el instante que la válvula es cerrada, el fluido adyacente es llevado desde V_0 al reposo, por el impulso de la mayor presión ejercida en la cara de la válvula. Tan pronto como la primera capa es llevada al reposo, la misma acción es aplicada a la próxima capa llevándola al reposo. De ésta manera, una onda pulso de alta presión es visualizada como viajando corriente aguas arriba con alguna velocidad

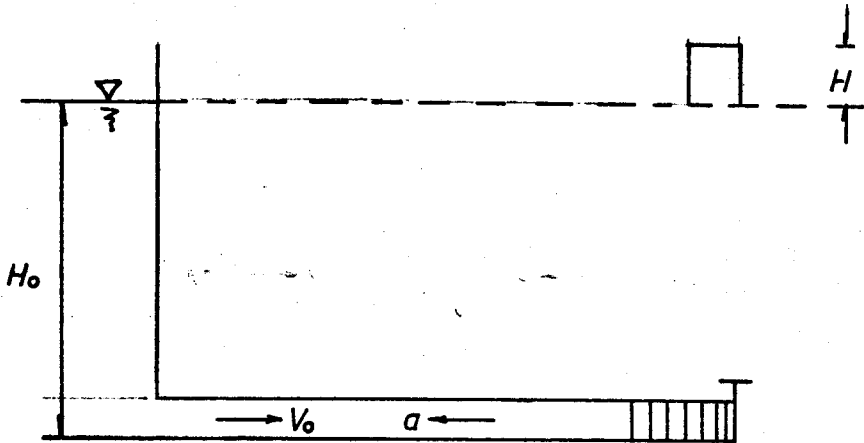


FIGURA 3(a)

(a) Onda pulso que produce un cambio de cabezal

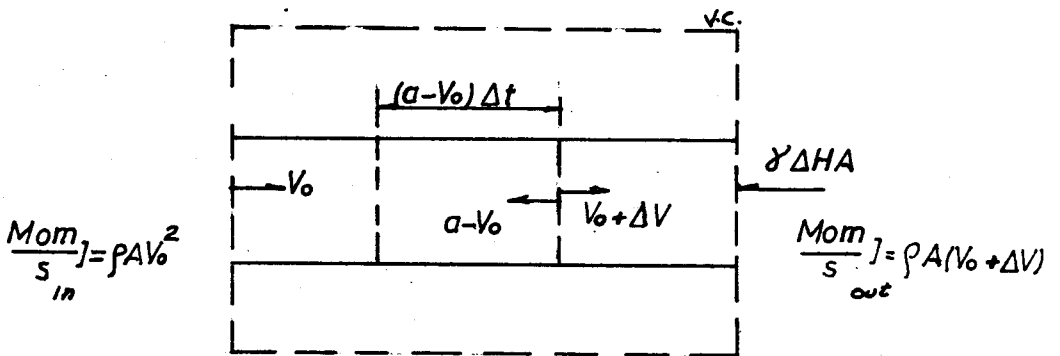


FIGURA 3(b)

(b) Ecuación de momento aplicada a un volumen de control

de onda sónica a y con una suficiente presión para aplicar recién el impulso al fluido para llevarlo al reposo.

La ecuación de momento es aplicada a un volumen de control fig.3b dentro del cual el frente de onda se mueve a la izquierda con una velocidad absoluta de $(a-V_0)$ debido a un pequeño cambio en el ajuste de la válvula.

El cambio de cabezal ΔH , en la válvula, está acompañado por un cambio de velocidad ΔV . La ecuación del momento para la dirección x , establece que la resultante en x de la componente de la fuerza en el volumen de control es igual a la variación en tiempo del incremento del momento x dentro del volumen de control mas el flujo neto del momento en x del volumen de control.

$$-\rho \Delta H A = \delta A (a - V_0) \Delta V + \delta A (V_0 + \Delta V)^2 - \delta A V_0^2 \quad (2)$$

La masa de fluido $\delta A (a - V_0)$ cambia su velocidad por ΔV en un segundo. Pero despreciando la pequeña cantidad que contiene ΔV^2 , la ecuación se reduce a:

$$\Delta H = -a \frac{\Delta V}{g} \left[1 + \frac{V_0}{a} \right] \approx -a \frac{\Delta V}{g}$$

Pero (V_0/a) es muy pequeño comparado con 1 para líquido en ductos metálicos. Si el flujo está completamente detenido $\Delta V = -V_0$ y $\Delta H = aV_0/g$.

Si la válvula está al final corriente abajo de un gran ducto y si es cerrada por incrementos, la ecuación llega a ser:

$$\Sigma \Delta H = - \frac{a}{g} \Sigma \Delta V \quad (4)$$

La cual ayuda para movimientos de válvula, tan largos como menores al tiempo de $(2L/a)$. Para ajustes, en la compuerta aguas arriba, una derivación similar nos muestra que $\Delta H = a \Delta V/g$ de modo que:

$$\Sigma \Delta H = \pm \frac{a}{g} \Sigma \Delta V \quad (5)$$

La ecuación (5) describe el cambio del flujo relacionado a un cambio en cabezal, o lo que es lo mismo cuando la presión se incrementa en un ducto rígido:

$$p = \delta * V_0 * a \quad (6)$$

Esta presión es de golpe de ariete y el cabezal de presión es: $h = p / \delta g$.

El signo (-) de la ecuación (5) debe usarse para ondas viajando aguas arriba y el signo (+) para ondas viajando corriente hacia

abajo. Siendo ésta la ecuación básica del golpe de ariete.

DETERMINACION DE LA MAGNITUD DE LA VELOCIDAD DE ONDA.-

Con referencia a la fig. 4, si la compuerta al final del ducto, corriente aguas abajo, es rápidamente cerrada, el ducto se puede alargar en una longitud ΔS , dependiendo de como está soportado. Podemos asumir que se mueve esta distancia en L/a segundos, o tiene la velocidad $\Delta S * a/L$. Así la velocidad del fluido en la compuerta ha sido cambiada por $\Delta V = \Delta S * a/(L-V)$. Durante L/a segundos después del cierre de compuerta la masa que entra al ducto es $\delta * A * V_0 * L/a$, la cual es adecuada dentro del ducto por el incremento de su área de sección transversal, llenando el volumen extra debido a la extensión del ducto ΔS , y por la compresión del líquido debido a su mayor presión σ :

$$\delta * A * V_0 * L/a = \delta * L * \Delta A + \delta * A * \Delta S + L * A * \Delta \delta \quad (7)$$

Llevando $\Delta V = \Delta S * a/L - V_0$ en eliminación de V_0 , la ecuación (7) se simplifica a:

$$- \Delta V/a = \Delta A/A + \Delta \delta/\delta$$

ahora, usando la ecuación (4) para elimi-

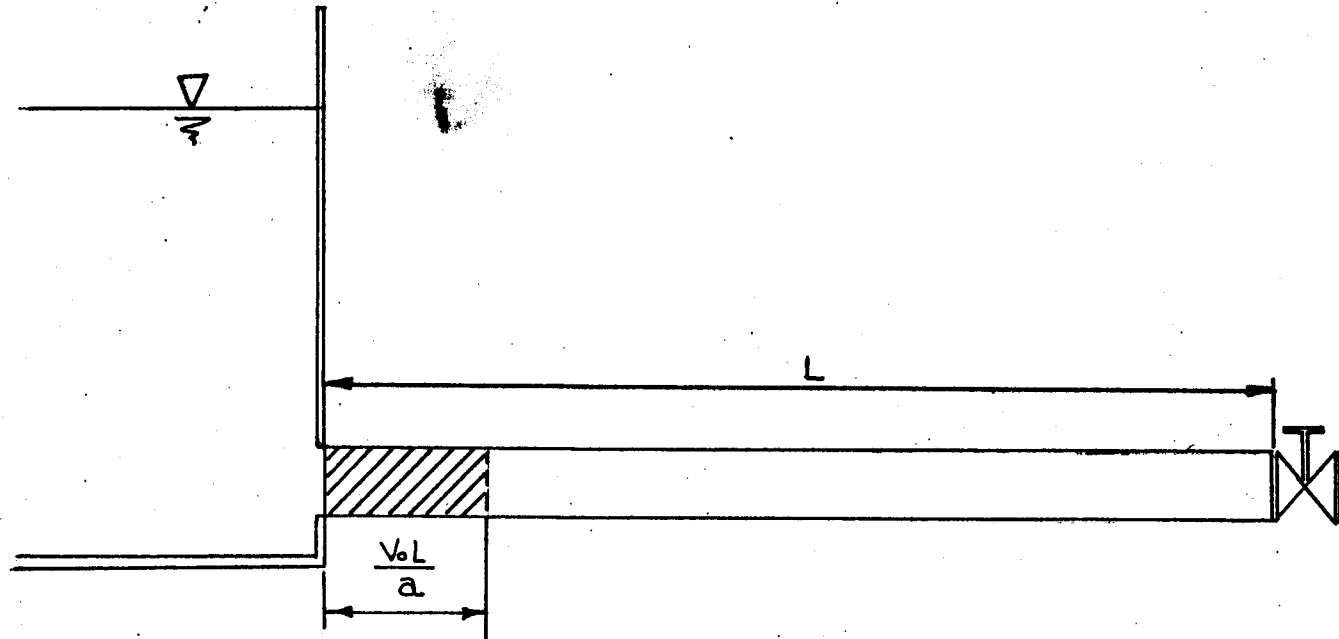


FIGURA 4

Relación de continuidad en un ducto

nar ΔV

$$a^2 = \frac{g * \Delta H}{\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \delta}{\delta}} \quad (8)$$

Si el ducto es soportado de modo que no pueda extenderse, entonces $\Delta S = 0$ y la misma ecuación (8) es obtenida con o sin juntas de expansión. Pero utilizando el módulo de elasticidad K del fluido, definido por la siguiente relación:

$$K = \frac{\Delta p}{\frac{\Delta \rho}{\rho}} = - \frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}} \quad (9)$$

Para el agua a temperatura y presión ordinarias, $K = 21000 \text{ Kg/cm}^2$.

La ecuación puede arreglarse como:

$$a^2 = \frac{\frac{K}{\delta}}{1 + \frac{K}{A} * \frac{\Delta A}{\Delta P}}$$

$$a^2 = \frac{\frac{K}{\delta}}{1 + K \frac{\Delta A}{\Delta P * A}} \quad (10)$$

Para ductos de paredes delgadas $\Delta A / \Delta P$ es muy pequeño y $a = \sqrt{K/\delta}$ es la velocidad acústica de una pequeña perturbación en un fluido infinito.

Un cilindro de pared delgada es aquel en el

que puede suponerse que las tensiones están uniformemente distribuidas en todo el espesor de la pared. Los recipientes a presión, tanques, tuberías pueden considerarse de este modo. Ver figura 5a.

Dos tipos de tensiones, existen en tales cilindros. La primera es tensión tangencial, debido a la presión interna sobre las paredes del cilindro. La segunda es la tensión longitudinal, que aparece debido a la acción de la presión interna sobre los extremos del cilindro.

La presión "p" se ejerce lateralmente en el interior de un cilindro de espesor e y diámetro interno D, como indica la figura 5b. La fuerza que tiende a separar las dos mitades del cilindro es pD, por unidad de longitud del mismo $F = pDL$. Esta fuerza está equilibrada por la tensión tangencial o circunferencial que actúa uniformemente sobre las dos áreas sometidas a tensión. tenemos que:

$$p D = 2 e \sigma_2$$

$$\sigma_2 = p D / 2 e$$

$$\sigma_2 = \text{Tensión tangencial o Circunferencial}$$

La tensión longitudinal se encuentra a partir de la consideración de las fuerzas

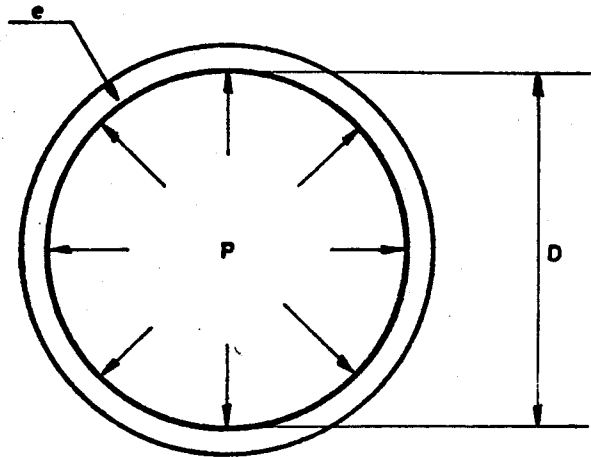


FIGURA 5a

La presión interna "P" origina una tensión tangencial

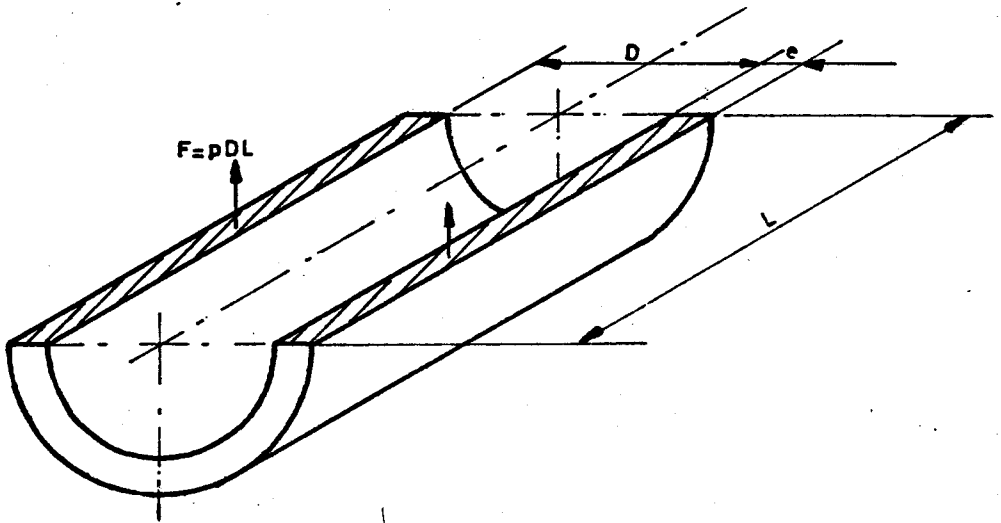


FIGURA 5b

Determinacion del valor "F" en cilindro de pared delgada

que actúan sobre los extremos de un cilindro cerrado. Ver figuras 6a y 6b. Esta es $p(\pi D^2/4)$ y debe igualarse al producto de la tensión longitudinal (porque actúa paralelamente al eje longitudinal del cilindro) por el área sobre la que actúa. tendremos entonces:

$$p \cdot \pi D^2 / 4 = \sigma_1 (\pi D e)$$

$$\sigma_1 = p D / 4 e$$

σ_1 = Tensión longitudinal o Axial.

Con las siguientes suposiciones:

1. Si e/D es de 1 - 10 es cilindro delgado
2. La tensión se distribuye
3. Las tensiones de flexión son despreciables
4. El material obedece a la Ley de Hooke, donde la σ admisible ha de ser menor al límite de proporcionalidad, con el objeto de que se aplique siempre la relación lineal entre tensiones y deformaciones.

Para ductos de paredes muy flexibles, el valor de 1 en el denominador es pequeño y no es importante de modo que la ecuación (10) se puede aproximar como:

$$a = \sqrt{\frac{A p}{\delta A}} \quad (11)$$

Las situaciones de apoyo en un ducto de pa-

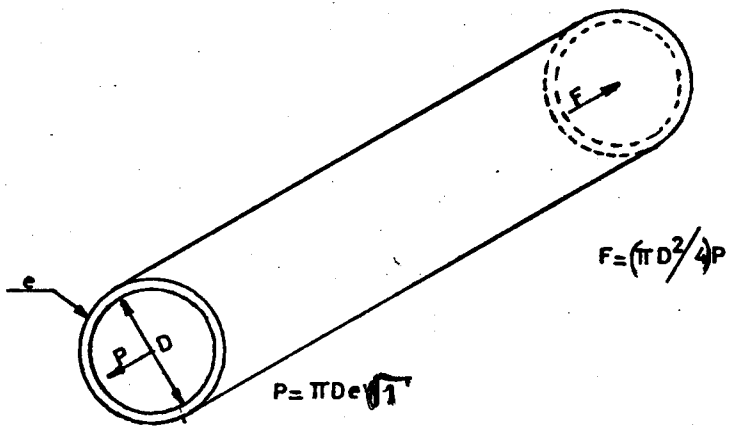


FIGURA 6a

Presión interna igual fuerza en tensión axial

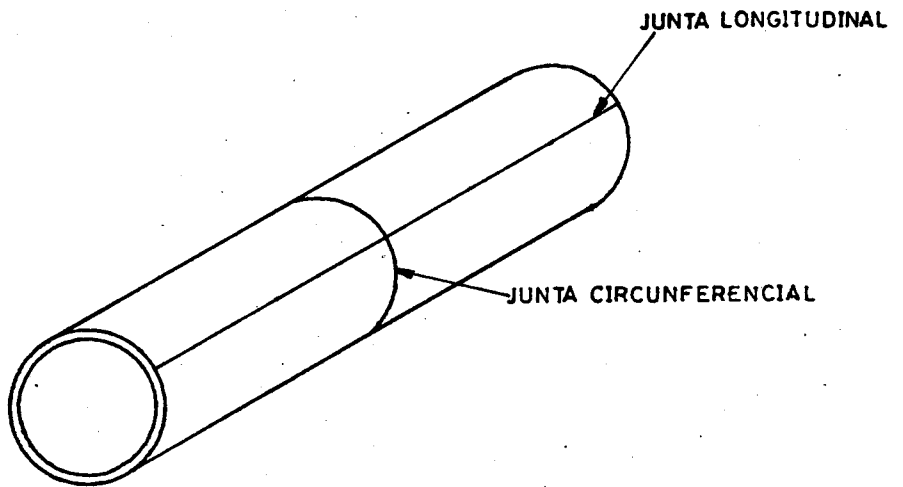
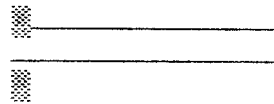


FIGURA 6b

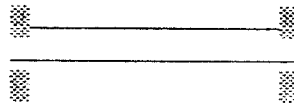
Determinación de fallas en las juntas

red delgada son examinadas y la fórmula de velocidad de onda es desarrollada en los siguientes casos:

a) Ducto anclado solo al final corriente arriba.



b) Ducto anclado totalmente contra movimiento axial.



c) Ducto anclado con juntas de expansión total.



El término $\frac{\Delta A}{A} \frac{\Delta p}{p}$ debe ser evaluado para los tres casos. Primero la relación de Poisson's μ es definido por:

$$\mu = \frac{\text{deform. unitaria lateral } \epsilon}{\text{deform. unitaria axial } \epsilon_1} = - \frac{\epsilon}{\epsilon_1} \quad (12)$$

El cambio en área es el resultado de una deformación total lateral o circunferencial, ϵ_T , luego:

$$\Delta A = \Delta \epsilon * \pi * D * D/2$$

o

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \frac{\Delta \epsilon_T}{\epsilon_T}$$

En los cuales:

$$\epsilon_T = \epsilon_2 + \epsilon$$

$$\epsilon_T = \epsilon_2 - \mu \epsilon_1 \quad (13)$$

Esfuerzos y deformaciones están relaciona-

dos por los módulos de elasticidad de Young

E, así:

$$\sigma_2 = \sigma_2 / E \quad (14)$$

$$\sigma_1 = \sigma_1 / E$$

σ_1 = Tensión axial unitaria (longitud.)

σ_2 = Tensión lateral unitaria (circunfer.)

Los tres casos tienen la misma relación para esfuerzo de tensión lateral σ_2 en las paredes del ducto.

Caso a:

Para ducto anclado al final corriente aguas arriba, obtengo C_1 en la ecuación (11).

$$\frac{\frac{\Delta A}{A} \frac{\Delta p}{\Delta p}}{\Delta p} = \frac{2 \frac{\Delta \epsilon_r}{\Delta p}}{\Delta p} = \frac{2}{\Delta p} (\Delta \epsilon_2 - \mu \Delta \epsilon_1)$$

$$\frac{2}{\Delta p E} (\Delta \sigma_2 - \mu \Delta \sigma_1) = \frac{D}{E e} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right)$$

==>

$$C_1 = 1 - \frac{\mu}{2} ; y, a = \frac{\sqrt{\frac{k}{\delta}}}{\sqrt{1 + \frac{k D}{E e} C_1}} \quad (14)$$

Caso b:

Para un ducto anclado totalmente:

$\epsilon_1 = 0$ y $\sigma_1 = \mu \sigma_2$ de modo que:

$$\frac{\frac{\Delta A}{A} \frac{\Delta p}{\Delta p}}{\Delta p} = \frac{2}{\Delta p E} (\Delta \sigma_2 - \mu^2 \Delta \sigma_2)$$

$$= \frac{D}{E e} (1 - \mu^2)$$

====>

$$C_1 = 1 - \mu^2 \quad \text{y} \quad a = \frac{\sqrt{\frac{k}{\delta}}}{\sqrt{1 + \frac{k D}{E e} C_1}} \quad (15)$$

Caso c:

Para juntas de expansión enteras:

$$\sigma_1 = 0 :$$

$$\frac{\Delta A}{A \Delta p} = \frac{2 \Delta \sigma_2}{\Delta p E}$$

$$= \frac{D}{E e}$$

====>

$$C_1 = 1 \quad \text{y} \quad a = \frac{\sqrt{\frac{k}{\delta}}}{\sqrt{1 + \frac{k D}{E e}}} \quad (16)$$

Resumiendo escribimos la velocidad de onda como:

$$a' = \frac{\sqrt{\frac{k}{\delta}}}{\sqrt{1 + \frac{k D}{E e} C_1}} \quad (17)$$

La velocidad de onda para grandes ductos de acero puede ser tan baja como 1000 m/seg. En ductos pequeños de alta presión la velocidad de onda puede ser 1200 a 1400 m/seg.

Para nuestro caso, $E = 2.11 \times 10^{10} \text{ Kg}_f/\text{cm}^2$; $K = 2.1 \times 10^8 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $D = 0.0532$ y $e = 0.0035$ m. Si $C_1 = (1 - \mu/2)$, porque está anclado de un lado, tenemos:

$$a = 1352 \text{ m/seg}$$

El valor de μ se tomó de la tabla que se muestra a continuación.

ELASTICIDAD DE LOS MATERIALES USADA PARA PAREDES DE DUCTOS.

MATERIAL	RELAC. POISSON'S (μ)
Aleación de Aluminio	0.33
Bronce	0.36
Concreto	0.1-0.3
Cobre	0.34-0.37
Hierro	0.21-0.30
Acero	0.28
Plomo	0.43

Ahora, conocida la celeridad de onda, se puede calcular la sobrepresión en un cierre instantáneo de válvula o en un cierre lento de válvula que fue lo que se habló en la sección anterior.

2.3.- CHIMENEA HIDRAULICA DE EQUILIBRIO COMO SOLUCION AL PROBLEMA.

Uno de los medios de eliminar el golpe de ariete es permitir al líquido que oscile dentro de una cámara. Con una cámara de equilibrio tan cercana a la válvula como sea posible, aunque aparezcan olas entre el depósito y la cámara de equilibrio se evitará que aparezcan altas presiones o sobrepresiones.

Las cámaras de equilibrio más llamadas chimeneas de equilibrio pueden clasificarse en sencillas, de orificios y diferenciales.

La chimenea de equilibrio sencilla tiene una abertura igual a su sección que comunica la tubería con la atmósfera y debe ser del tamaño adecuado para que el líquido no rebose (a menos que se le provea de un vertedero) ni llegue a estar vacía para que no permita al aire entrar en la tubería. Su tamaño debe de ser tal que no entre en resonancia con el regulador que actúa sobre la válvula. El período de oscilación de una chimenea sencilla es relativamente largo (ver figura 7).

La chimenea de equilibrio de orificio tiene una abertura restringida, es decir un orificio de comunicación entre la tubería y la Chimenea y por consiguiente permite el cambio de presión más rápido en la tubería que en la chimenea de equili-

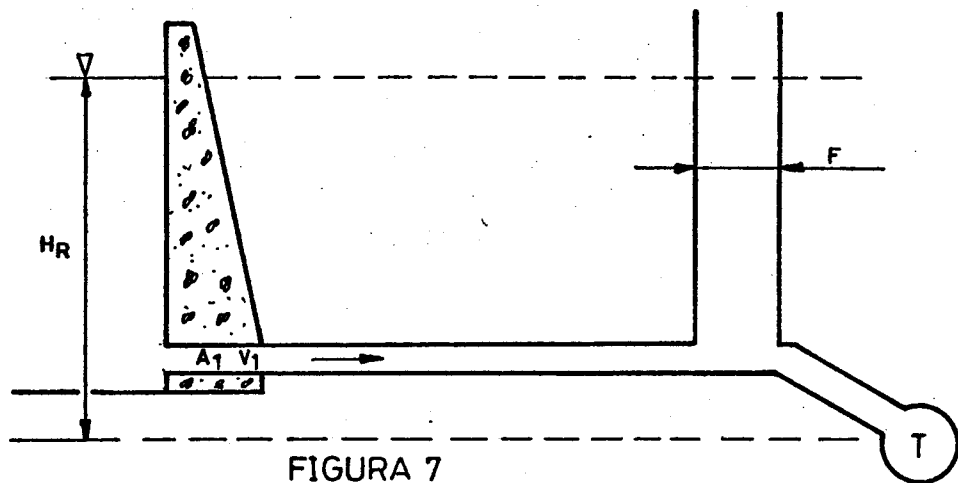


FIGURA 7

Chimenea de equilibrio sencilla

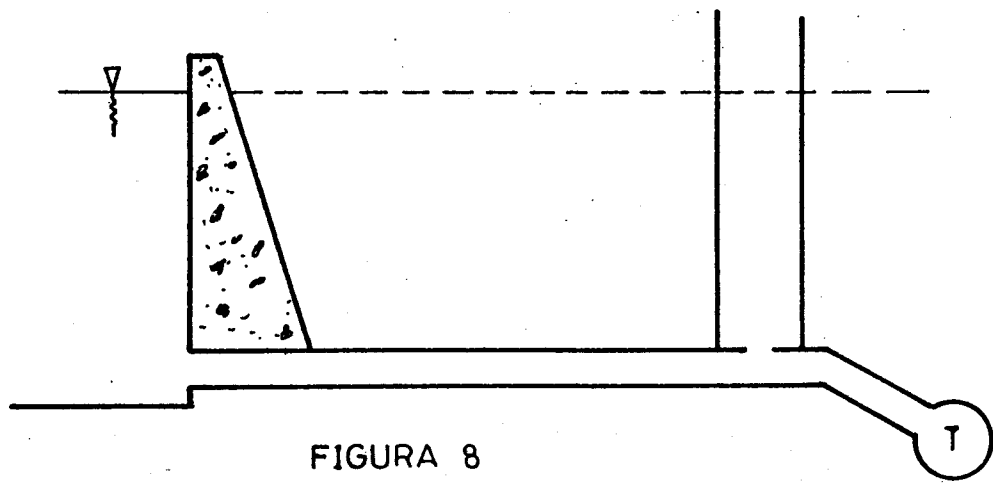


FIGURA 8

Chimenea de equilibrio de orificio

brio sencilla. (Ver figura 8).

Estas chimeneas de orificio o estranguladas, proveen un orificio restringido en la base del tanque, con el fin de hacer decrecer la amplitud del oleaje en el tanque y también para efectos de reducción en forma rápida de la oscilación de masa del líquido.

En los últimos años, estos tanques estrangulados se han hecho muy populares por el motivo que dan una economía por encima del 40% comparada con los tanques simples, debido a la reducción de la amplitud del oleaje.

Las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la velocidad en la restricción y los efectos de la amortiguación son más grandes para grandes cambios de carga.

La forma más simple de estrangulación es una placa de orificio, y una longitud de ducto de diámetro reducido también resulta en un tanque de estrangulación de flujo. (Ver figura 9).

Cuando el tanque chimenea con estrangulación tiene que ver con grandes oleajes descendentes, tales como ocurre cuando la demanda por agua en las turbinas aumenta desde el flujo cero a flujo total, puede ocurrir el peligro de que se rompa la columna de agua, si la pérdida es grande, en estos casos la estrangulación puede ser arreglada de forma curva

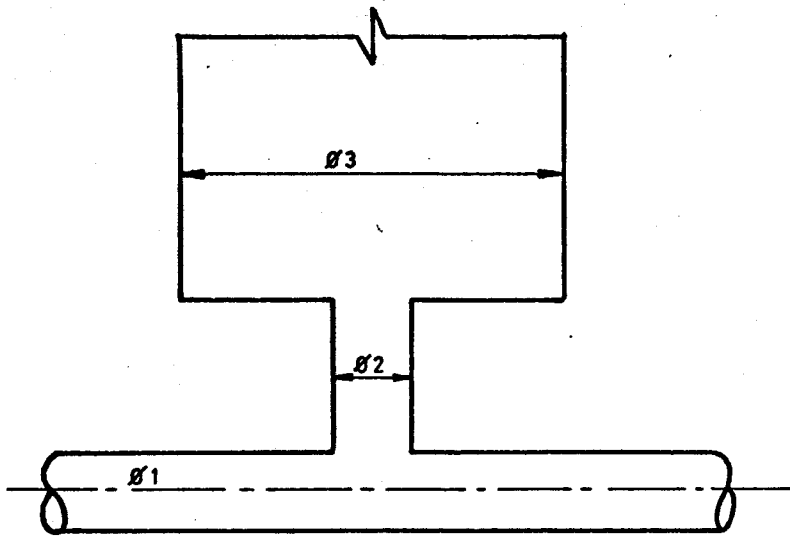


FIGURA 9

Tanque de estrangulación

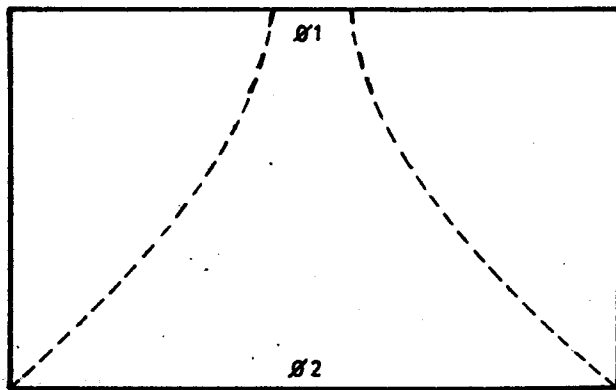


FIGURA 10

Forma de estrangulación en la base de la chimenea

en la parte superior y cuadrada en la menor.

Alternativamente, si el tanque es diseñado para completar interrupción de flujo, el estrangulado puede ser arreglado como en la figura 10.

Una chimenea de equilibrio diferencial es en efecto dos cámaras de equilibrio, una cámara de equilibrio sencilla y una cámara de equilibrio de orificio, pueden ser combinadas como en la figura 11 o pueden ser separadas como en la figura 12.

La chimenea diferencial separada fue desarrollada por R. J. Johnson, ésta consta de un corto tramo vertical de ducto, de igual diámetro que el túnel, que une al túnel y a la chimenea, la cual está formada por el tanque de mayor diámetro que el túnel y se comunica con el corto tramo vertical por una corona circular. A su vez, el tanque lleva en toda su extensión un tubo de acero, de menor diámetro que el túnel, llamado el elevador que comunica directamente con el tramo de unión chimenea-túnel.

En consecuencia, la elección de la cámara de equilibrio o chimenea más conveniente para una situación cualquiera, se hará después de un estudio económico detallado del sistema de tuberías y de las condiciones del terreno.

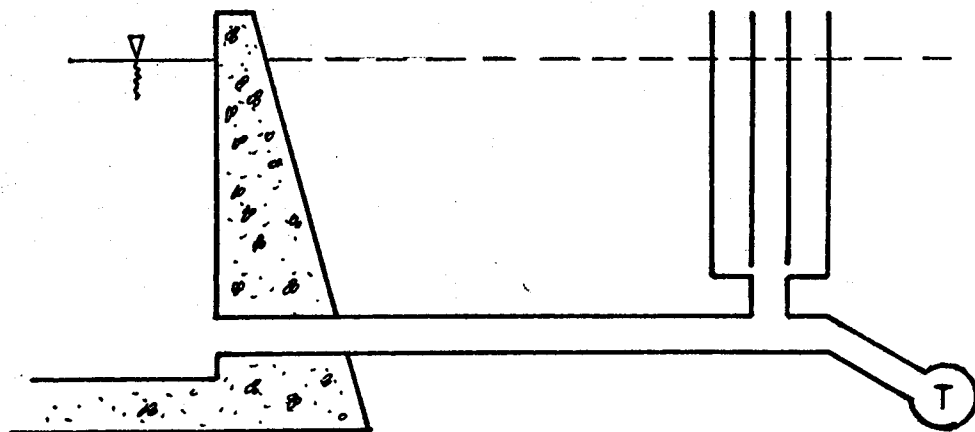


FIGURA 11

Chimenea de equilibrio diferencial

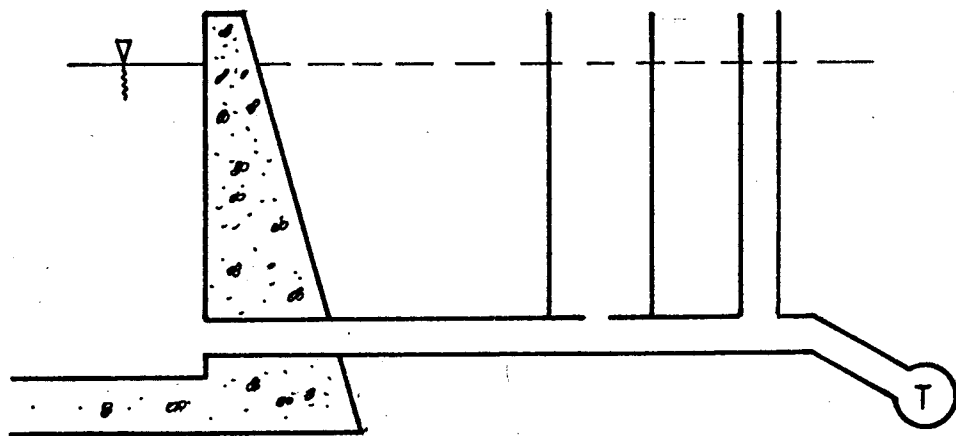


FIGURA 12

Chimenea de equilibrio diferencial separada

CAPITULO 3

ANALISIS TEORICO DEL MOVIMIENTO AMORTIGUADO Y RESULTADOS

3.1.- ECUACIONES FUNDAMENTALES QUE INTERVIENEN EN EL ANALISIS DEL FLUJO.

3.1.1.- TEORIA DE LA COLUMNA DE AGUA RIGIDA: ECUACION BASICA.

Cuando el movimiento del fluido es inestable, esto es cuando la descarga en cada sección está variando rápidamente desde un instante al próximo, rápidos cambios de presión ocurren en el interior de la tubería y la Ecuación de Bernoulli no es mayormente aplicable, a causa del golpe de ariete y del sonido de martilleo, el cual acompaña con frecuencia al fenómeno. A fin de obtener la ley física básica del golpe de ariete, figura 13, se considera los efectos del cambio rápido en el flujo para una línea de tubería que está conectado a un reservorio en el lado superior y del otro lado una válvula compuerta para regular la descarga a la atmósfera.

En este análisis se asume lo siguiente:

- 1.- El agua es incompresible.
- 2.- Las paredes de la tubería no se deforman.

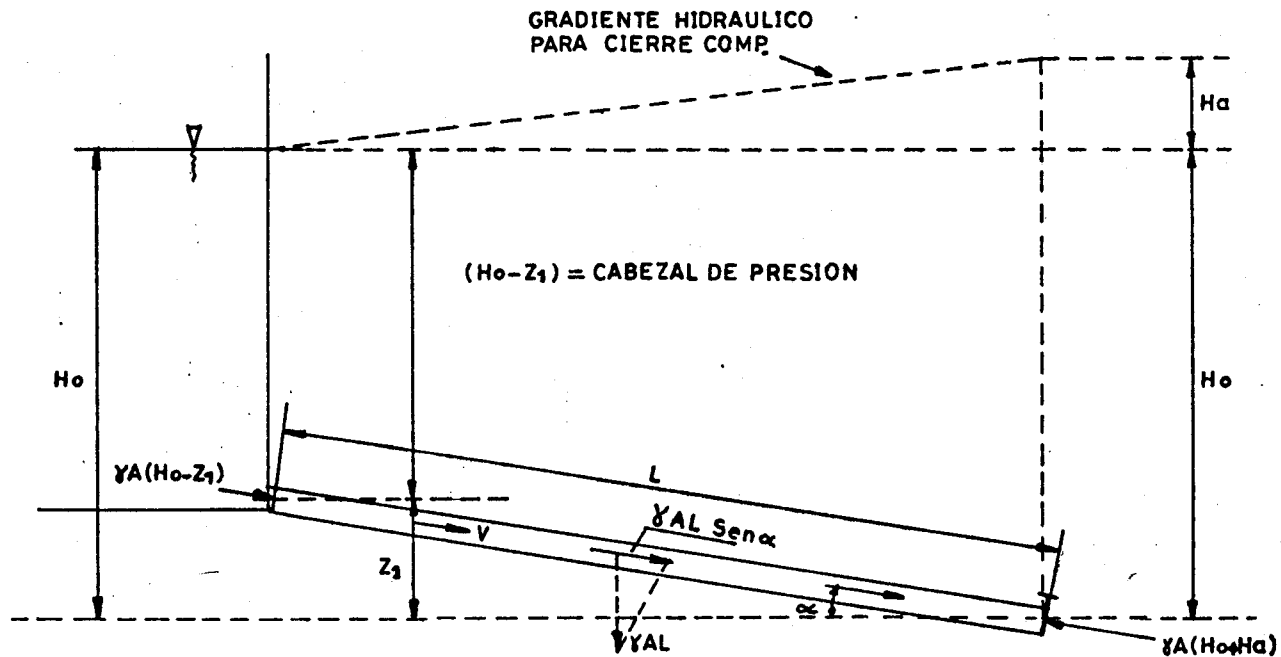


FIGURA 13

Gradiente hidráulico para cierre de compuerta



- 3.- La línea de la tubería permanece llena de agua en todo momento y la presión mínima interior en la tubería está en exceso de la presión de vapor de agua.
- 4.- Las pérdidas hidráulicas y el cabezal de velocidad son despreciables comparados con los cambios de presión.
- 5.- La velocidad del agua es uniforme en la dirección del eje sobre alguna sección transversal del ducto.
- 6.- La presión es uniforme.
- 7.- El nivel del reservorio permanece constante durante el tiempo de movimiento de la compuerta.

Si el flujo en la compuerta de control es alterado, una fuerza externa desbalanceada actuará en la compuerta sobre la masa de la columna de agua. La magnitud de ésta fuerza desbalanceada se determina usando la segunda Ley de Newton del movimiento. La desaceleración, o la razón en la cual la velocidad decrece por unidad de tiempo es $-dV/dt$, donde V es medida positiva en la dirección del flujo. La masa de agua en la longitud entera de la línea de la tubería es $\rho A L/g$. Si H_u se designa al cabezal desacelerativo o cabezal de elevación en la

compuerta, la fuerza actuando sobre la columna de agua, según la figura 13, es:

$$T * A * [(H_0 + H_a) - (H_0 - Z_1) - L \text{ sen } \alpha]$$

Donde $L \text{ sen } \alpha = Z_1$, la fuerza resultante desbalanceada sobre la columna de agua es

$$F = T * A * H_a$$

De la segunda ley de Newton del movimiento

$\Sigma F = m * a$ se obtiene la siguiente ecuación:

$$T * A * H_a = T * \frac{A * L}{g} \left(- \frac{dV}{dt} \right)$$

de donde:

$$H_a = - \frac{L}{g} * \frac{dV}{dt} \quad (18)$$

denominado Cabezal Desacelerativo.

Para decir que ésta ecuación es relativa a la aceleración del agua es necesario considerar previamente que hay dos teorías, la anteriormente explicada, teoría de la columna rígida y la de la columna elástica. De éstas, la segunda es la más exacta pero más difícil de ser calculada, siendo la primera la más empleada en cálculos de primera aproximación.

3.1.2.- ECUACION DE LA ENERGIA.

Cuando el flujo en una tubería es inestable, la ecuación de la energía tiene

un término denominado el cabezal acelerativo $(L/g)(dV/dt)$, el cual se debe tener en cuenta para el efecto de la aceleración del fluido.

En fluidos inestables, en un punto particular de la línea de corriente, en un instante particular de tiempo, expresamos la aceleración como:

$$V(dV/dt) + dV/dt$$

Aplicando $\Sigma F = m \cdot a$ al elemento cilíndrico de la figura 14, obtenemos:

$$-dp dA - \rho g dA dz - \tau(2\pi r) ds = \delta ds dA [V(dV/ds) + (dV/dt)] \quad (19)$$

En este caso:

$$dA = \pi \cdot r^2$$

Sustituyendo dA y dividiendo toda la ecuación para $-\delta \cdot \pi \cdot r^2$ nos da:

$$\frac{dp}{\rho} + V dV + g dz + ds \cdot \frac{dV}{dt} = - \frac{2 \tau ds}{\delta \cdot r} \quad (20)$$

$ds \cdot dV/dt =$ aceleración causada por inestabilidad del fluido.

$$\text{Si } p = \rho \cdot g \cdot h = \rho \cdot h$$

La ecuación 20 puede expresarse como:

$$\frac{dp}{\rho} + \frac{dV^2}{2g} + dz + \frac{ds}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = - \frac{2 \tau ds}{\rho \cdot r} \quad (21)$$

Esta ecuación se emplea en ambos fluidos inestables compresibles e incompresibles



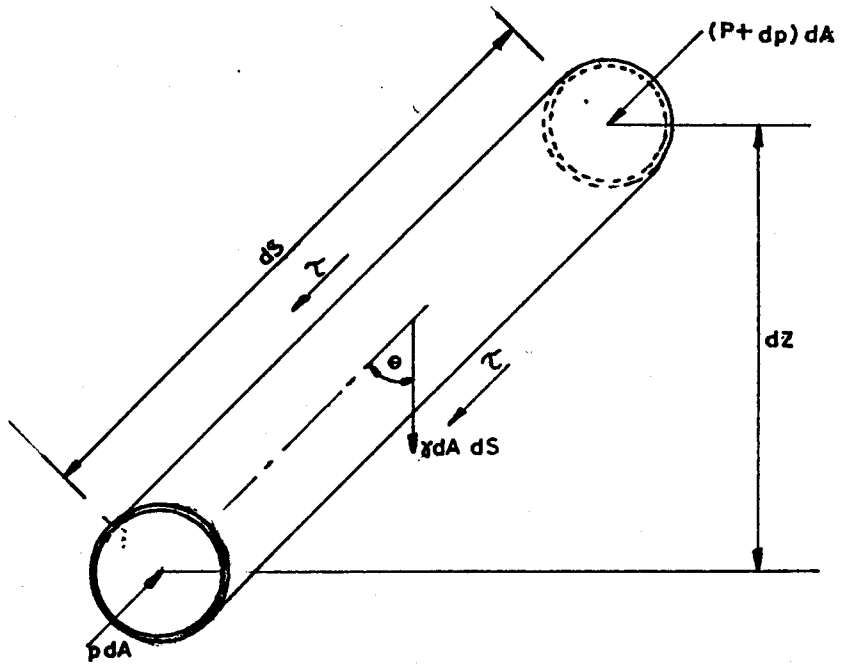


FIGURA 14

Elementos de un tubo de corriente (Fluido real)

reales. Sin embargo, una vez que en una ecuación de estado relacionamos ρ a p y T debe introducirse antes la integración si estamos tratando con un fluido compresible. Para un fluido incompresible ($\rho = \text{cte}$) podemos integrar directamente.

Integrando desde la sección 1 hasta la sección 2, donde la distancia entre ellas es L , obtenemos:

$$\frac{P_2}{\rho} - \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + \int_1^2 \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} = \frac{2 \tau L}{\rho * r}$$

o

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 - \frac{2 \tau L}{\rho * r} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \int_1^2 \frac{L}{g} \frac{dV}{dt}$$

Para el caso de un ducto circular de radio (r_0), se reconoce el término $2 * L * \tau / \rho * r$ como la pérdida de cabezal en la tubería sobre la longitud L (h_L). Así obtenemos la ecuación de la energía aplicable a fluidos inestables e incompresibles:

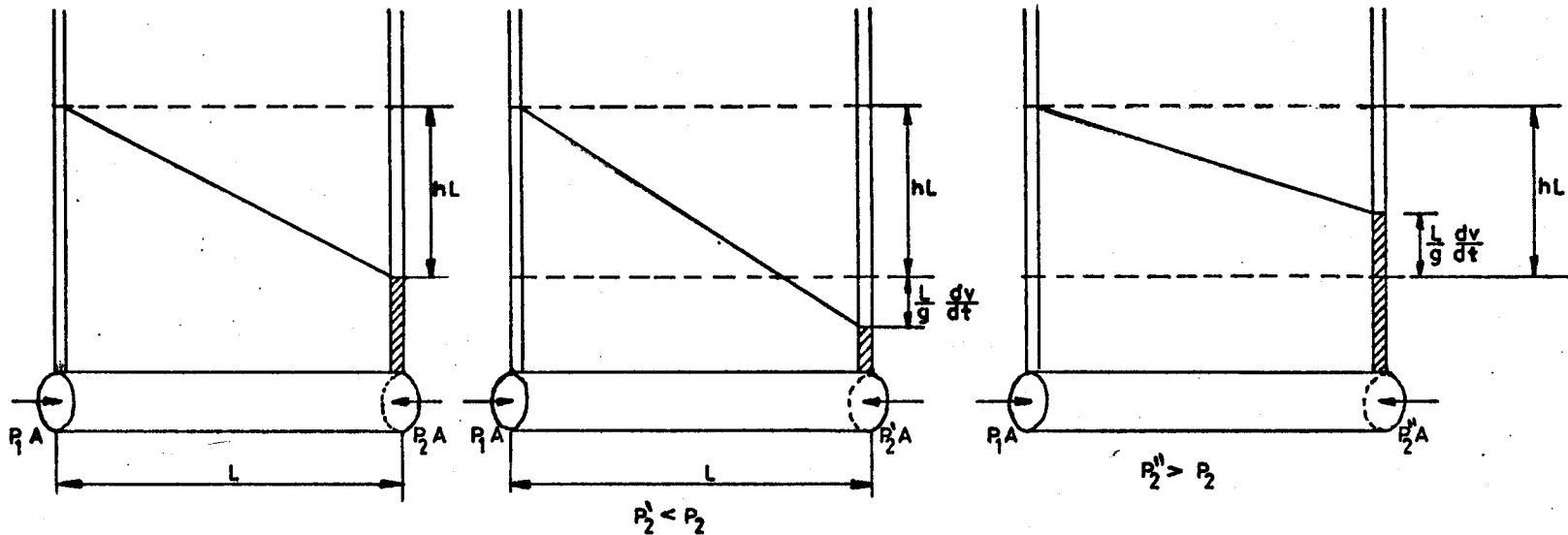
$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 - h_L = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \int_1^2 \frac{L}{g} \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{L}{g} \frac{dV}{dt}$$

(22)

Si la tubería consiste en dos o más tuberías en serie, un término $(L/g)(dV/dt)$ debería aparecer para cada tubería, como las pérdidas de cabezal en cada tubería.

Para aclarar lo anterior en el dibujo de la figura 15 se presentan 3 casos de fluido incompresibles en flujo inestable en tuberías horizontal: En el primer caso hay un flujo estable y en los dos restantes el flujo es inestable. El análisis de las figuras indican que en la misma razón de flujo instantáneo, la presión es despresionada en los dos casos si la aceleración es positiva o incrementada si es negativa.



FLUJO ESTABLE

$$\Sigma F = m \cdot a = 0$$

$$P_1 A - P_2 A = hL$$

$$hL = \frac{\tau_0 PL}{\gamma A}$$

FLUJO INESTABLE

$$\left(\frac{dv}{dt} > 0\right)$$

$$\Sigma F = m \cdot a \neq 0$$

$$\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2'}{\gamma} = hL + \frac{L}{g} \frac{dv}{dt}$$

FLUJO INESTABLE

$$\left(\frac{dv}{dt} < 0\right)$$

$$\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2''}{\gamma} = hL + \frac{L}{g} \frac{dv}{dt}$$

$$\left(\frac{dv}{dt} \text{ es negativo}\right)$$

FIGURA 15

Flujo estable e inestable de un fluido incompresible en un ducto horizontal

3.2.- ECUACION DEL MOVIMIENTO AMORTIGUADO

Considerando la ecuación de la energía (ecuación 22) donde se señalan pérdidas a lo largo de una tubería, encontramos un valor h_{LT} , que nos señala las pérdidas totales y el cabezal desacelerativo.

Por lo tanto para el respectivo análisis del sistema, lo dividimos en tres partes. La primera corresponde al reservorio y en segundo lugar la tubería hasta las válvulas y de las válvulas hasta el tanque chimenea.

Se observa en la figura 16 que aplicando la ecuación de la energía sin cabezal desacelerativo entre el punto 0 y el punto 1 en el reservorio se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{P_0}{\rho} + h_0 + \frac{V_0^2}{2g} = \frac{P_1}{\rho} + (-h_{LT} - h_3 - h_2 + h_1) + \frac{V_1^2}{2g} + K_1 \frac{V_1^2}{2g}$$

Donde:

$P_0 = 0$ (Presión atmosférica)

$V_0 = 0$ (No hay velocidad en la superficie)

$h_0 = 0$

$k_1 =$ pérdida a la entrada

$(L/g)(dV/dt) = 0$ (No hay cabezal desacelerativo)

$h_{LT} = k_1(V_1^2/2g)$ (k_1 es coeficiente de pérdida a la entrada).

Y se obtiene la siguiente relación:

$$h_{LT} + h_3 + h_2 - h_1 = \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + K_1 \frac{V_1^2}{2g}$$

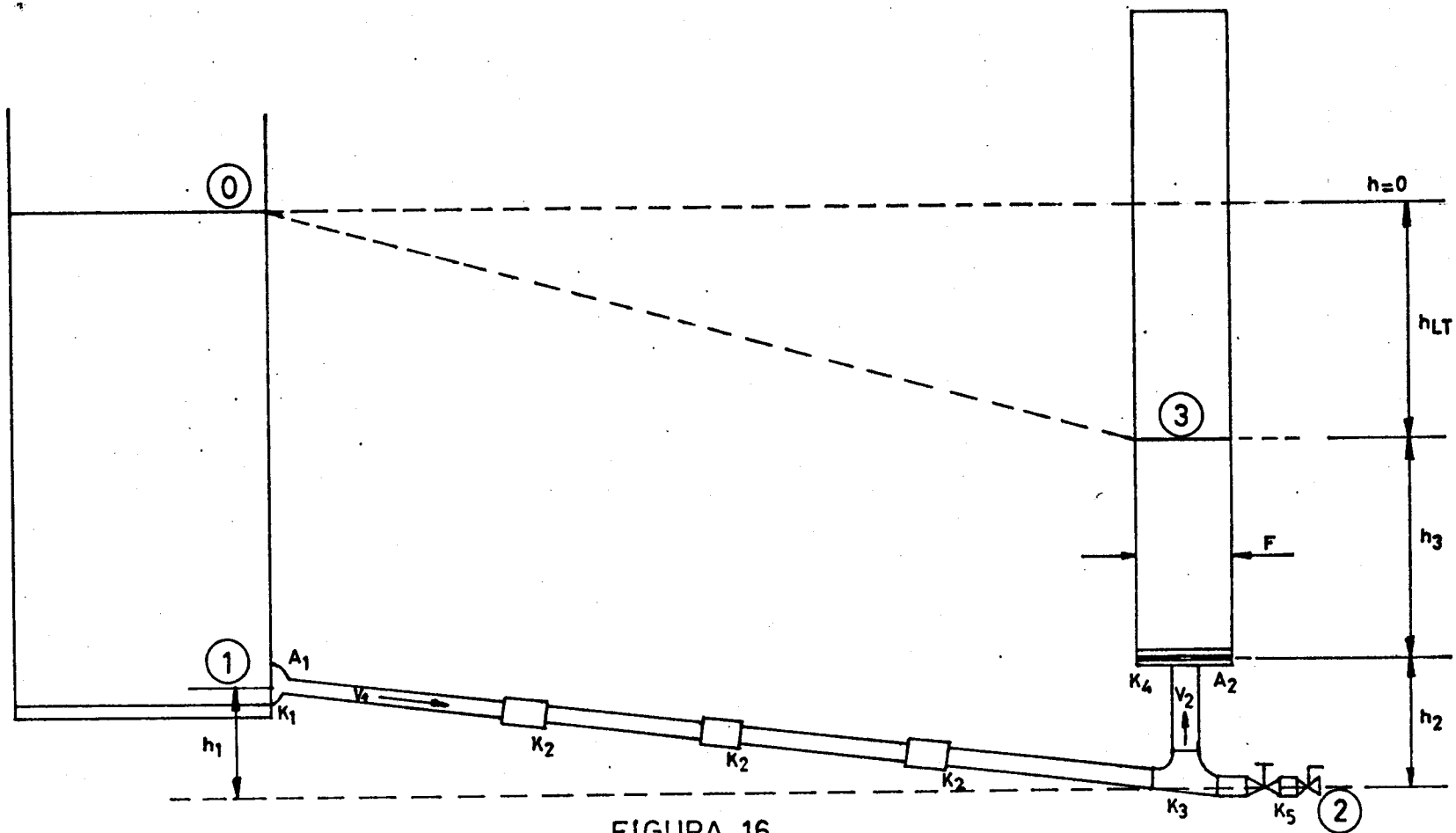


FIGURA 16

Representación esquemática de la chimenea de equilibrio con los niveles en operación normal

Si despejamos

$$P_1/\Gamma = h_{LT} + h_3 + h_2 - h_1 - (V_1^2/2g) - (k_1 V_1^2/2g) \quad (23)$$

Analizando la figura 16 desde el punto 1 hasta el 2, se obtiene la siguiente ecuación de energía:

$$\begin{aligned} \frac{P_1}{\Gamma} - h_{LT} - h_3 - h_2 + h_1 + \frac{V_1^2}{2g} &= \frac{P_2}{\Gamma} - h_{LT} - h_3 - h_2 \\ + \frac{V_2^2}{2g} + 3 K_2 \frac{V_2^2}{2g} + K_3 \frac{V_2^2}{2g} + f &= \frac{L}{D} \frac{V_2^2}{2g} \end{aligned} \quad (24)$$

Si se reemplaza la ecuación 23 en la ecuación 24 se obtiene la siguiente relación:

$$\begin{aligned} h_{LT} + h_3 + h_2 - h_1 - \frac{V_1^2}{2g} - K_1 \frac{V_1^2}{2g} - h_{LT} - h_3 - h_2 + \\ h_1 + \frac{V_1^2}{2g} &= -h_{LT} - h_3 - h_2 + (1+3K_2+K_3+K_4+f\frac{L}{D}) \frac{V_2^2}{2g} \end{aligned}$$

Despejando queda la siguiente ecuación:

$$h_{LT} + h_3 + h_2 = (1+3k_2+k_3+k_4+f_1\frac{L}{D}) \frac{V_2^2}{2g} + K_1 \frac{V_1^2}{2g} \quad (25)$$

Ahora se analiza la figura 16 desde el punto 2 al 3

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{\Gamma} - h_{LT} - h_3 - h_2 + \frac{V_2^2}{2g} &= \frac{P_3}{\Gamma} - h_{LT} + \frac{V_3^2}{2g} - \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \\ f_2 - \frac{L}{D} \frac{V_2^2}{2g} & \end{aligned}$$

despejando se obtiene:

$$-(h_3+h_2) = -\frac{V_2^2}{2g} - \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} + f_2 \frac{L}{D} \frac{V_2^2}{2g}$$

Cambiando de signo se tiene:

$$h_3 + h_2 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} - f_2 \frac{L}{D} \frac{V_2^2}{2g} \quad (26)$$

Si reemplazo la ecuación 26 en la ecuación 25 se obtiene:

$$h_{LT} + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} - f_2 \frac{L}{D} \frac{V_2^2}{2g} = K_1 \frac{V_1^2}{2g} + (1 + 3K_2 +$$

$$K_3 + K_4 + f_1 \frac{L}{D}) \frac{V_2^2}{2g}$$

Despejando y reemplazando los coeficientes $k_2, k_3, k_4, f_1 * L/D, f_2 * L/D$ por C_2 y K_1 por C_1 se obtiene la siguiente relación:

$$h_{LT} - C_1 V_1^2 - C_2 V_2^2 + \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} = 0$$

Pero si consideramos que h_{LT} es un cabezal de pérdidas que va a oscilar a partir del cierre de válvulas luego lo reemplazo por h y analizo como:

$$h - C_1 V_1^2 - C_2 V_2^2 + \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} = 0 \quad (27)$$

Ahora analizo continuidad en la base de la chimenea, el flujo que viene de la tubería es igual al flujo que va hacia las válvulas menos el que queda en la chimenea, luego:

$$A_1 * V_1 = A_2 * V_2 - Q_3 \quad (28)$$

Pero el flujo en la chimenea es el producto de la sección transversal de la chimenea F por la variación del nivel del tanque chimenea dh/dt y es el mismo flujo como en la tubería, luego:

$$F \frac{dh}{dt} = A_2 V_2$$

entonces:

$$V_2 = \frac{F}{A_2} \frac{dh}{dt} \quad (29)$$

Y su derivada:

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{F}{A_2} \frac{d^2h}{dt^2} \quad (30)$$

Si despejamos la velocidad V_1 en la ecuación 28 y reemplazo la velocidad V_2 de la ecuación 29 se obtiene:

$$V_1 = \frac{F \frac{dh}{dt} - Q}{A_1} \quad (31)$$

Si reemplazamos las ecuaciones 29, 30 y 31 en la ecuación 27 se obtiene:

$$h - C_1 \frac{1}{A_1^2} F^2 \frac{dh}{dt} - 2FQ \frac{dh}{dt} + Q^2 - C_2 \frac{F}{A_2} \frac{dh}{dt} + \frac{L F}{g A_2} \frac{d^2h}{dt^2} - \frac{dQ}{dt} = 0$$

Desarrollando y reordenando se obtiene:

$$\frac{L F}{g A_2} \frac{d^2h}{dt^2} + 2C_1 \frac{F Q}{A_1^2} \frac{dh}{dt} + h = C_1 Q^2 + C_2 \frac{F}{A_2} + C_1 \frac{F}{A_1^2}$$

$$\frac{dh}{dt} + \frac{L F}{g A_2} \frac{dQ}{dt}$$

$$\Psi_{1-2} = - \frac{C_1 V_2 A_2^2 g}{A_1^2 L} \pm \sqrt{\left[\frac{C_1 V_2 A_2^2 g}{A_1^2 L} \right]^2 - \frac{A_2 g}{F L}}$$

Para analizar la discriminante le damos valores al radical y obtenemos un valor < 1 , el mismo que es $- 0.144$.

Si se conoce que para un valor < 1 la solución es:

$$h_c = e^{at} [A \cos bt + B \sin bt]$$

Donde:

$$a = - C_1 V_2 \frac{A_2^2 g}{A_1^2 L}$$

$$b = \sqrt{\frac{A_2 g}{F L}}$$

serán las constantes a utilizarse en el radical.

Luego la ecuación a analizarse sera:

$$h_c = e^{-\frac{C_1 V_2 g A_2^2}{A_1^2 L} t} \left[A \cos \sqrt{\frac{A_2 g}{F L}} t + B \sin \sqrt{\frac{A_2 g}{F L}} t \right] \quad (34)$$

Para encontrar los valores de los coeficientes A y B, se lo hace de las condiciones límites para un tiempo $t=0$.

En la chimenea se tiene un valor $A=H-(h_{LT}+LdV/gdt)$.

Del apéndice A encuentro un valor $A = h(0) = - 0.294$.

Para encontrar el valor B, analizo una segunda condición límite para un $t=0$, $dh/dt = 0$ no hay variación de nivel en la chimenea.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{d}{dt} (e^{-at}) (A \cos bt + B \sin bt) + e^{-at} \frac{d}{dt} (A \cos bt + B \sin bt)$$

$$0 = -a e^{-at} (A \cos bt + B \sin bt) + e^{-at} [-bA \sin bt + bB \cos bt]$$

$$B = - \frac{C_1 V_2 \frac{A_2^2 g}{A_1^2 L} (A)}{\dots}$$

$$\sqrt{\frac{A_2 g}{F L}}$$

Luego la ecuación característica es:

$$h_c = e^{-(C_1 V_2 A_2^2 g / A_1^2 L) t} \left[-A \cos \left[\sqrt{\frac{A_2 g}{F L}} t \right] + \frac{C_1 V_2 A_2^2 g}{A_1^2 L} \frac{(-A)}{\sqrt{\frac{A_2 g}{F L}}} \right] \quad (35)$$

A la ecuación anterior hay que agregarle la solución particular, donde se tiene:

$$h_p = -J = -C_1 V_2^2 g A_2^3 / F L A_1$$

Reemplazando los valores constantes obtengo una solución general de la siguiente forma:

$$h = e^{-(C_1 V_2 A_2^2 g / A_1^2 L) t} \left[-A \cos \left[\sqrt{\frac{A_2 g}{F L}} t \right] + \frac{C_1 V_2 A_2^2 g}{A_1^2 L} \frac{(-A)}{\sqrt{\frac{A_2 g}{F L}}} \right] - C_1 \frac{g V_2^2 A_2^3}{F L A_1^2} \quad (36)$$

3.3.- ALTURA MAXIMA DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO

Para hallar el máximo levantamiento de la onda de agua en el tanque chimenea se hacen algunas consideraciones tales como:

a) Que las pérdidas en la tubería en este caso $C_1V_1^2$ y $C_2V_2^2$ son igual a cero, luego, no hay fricción.

b) Que la h_{max} a obtenerse es ideal, para un tanque sin restricción.

Si las pérdidas son iguales a cero, de la ecuación de la energía (27) obtengo que:

$$(L/g)(dV/dt) + h = 0$$

Ahora de la ecuación de continuidad de flujo (28) permitiendo cierre completo de compuerta, el flujo de agua en el tanque chimenea es el mismo como aquel que si fuera de la tubería, esto es de la ecuación 29 se obtiene:

$$F \frac{dh}{dt} = A_2 * V_2 \implies V_2 = \frac{F}{A_2} * \frac{dh}{dt} \quad y,$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{F}{A_2} * \frac{d^2h}{dt^2}$$

La solución de las ecuaciones anteriores se desarrolló con las siguientes condiciones límites:

Cuando $t=0$; $h=0$ y $dh/dt = 0/A_2$

Donde se obtiene la siguiente ecuación diferencial:

$$(LF/gA_2)(d^2h/dt^2) + h = 0$$

Luego:

$$\frac{d^2h}{dt^2} + \frac{A_2 g}{F L} h = 0 \quad (37)$$

La ecuación característica es la siguiente:

$$m^2 + (A_2 * g / F * L) = 0$$

Cuya solución es la siguiente:

$$m_{1-2} = \pm \sqrt{\frac{A_2 g}{F L}} i$$
$$h = A \cos \sqrt{\frac{A_2 g}{F L}} t + B \operatorname{Sen} \sqrt{\frac{A_2 g}{F L}} t$$

Si $t=0 \implies A=0$

Ahora para encontrar el coeficiente B para un $t=0$, derivo y obtengo $dh/dt(0) = Q/A_2$ y obtengo que:

$$B = \frac{Q}{A_2} \sqrt{\frac{F L}{A_2 g}}$$

Luego

$$h = \frac{Q}{A_2} \sqrt{\frac{F L}{A_2 g}} \operatorname{Sen} \sqrt{\frac{A_2 g}{F L}} t$$

Luego para un tiempo cualquiera, obtenemos altura máxima en la chimenea sin tomar en cuenta fricción:

$$h_{\max} = \frac{Q}{F} \sqrt{\frac{F L}{A_2 g}} \quad (38)$$

Donde F es el área del tanque chimenea.

Ver figura 17 donde se observan las limitaciones de nivel de oscilación con el fin de evitar derramamiento de agua en el caso de elevarse a un máximo nivel o en el caso contrario cuando se rompe

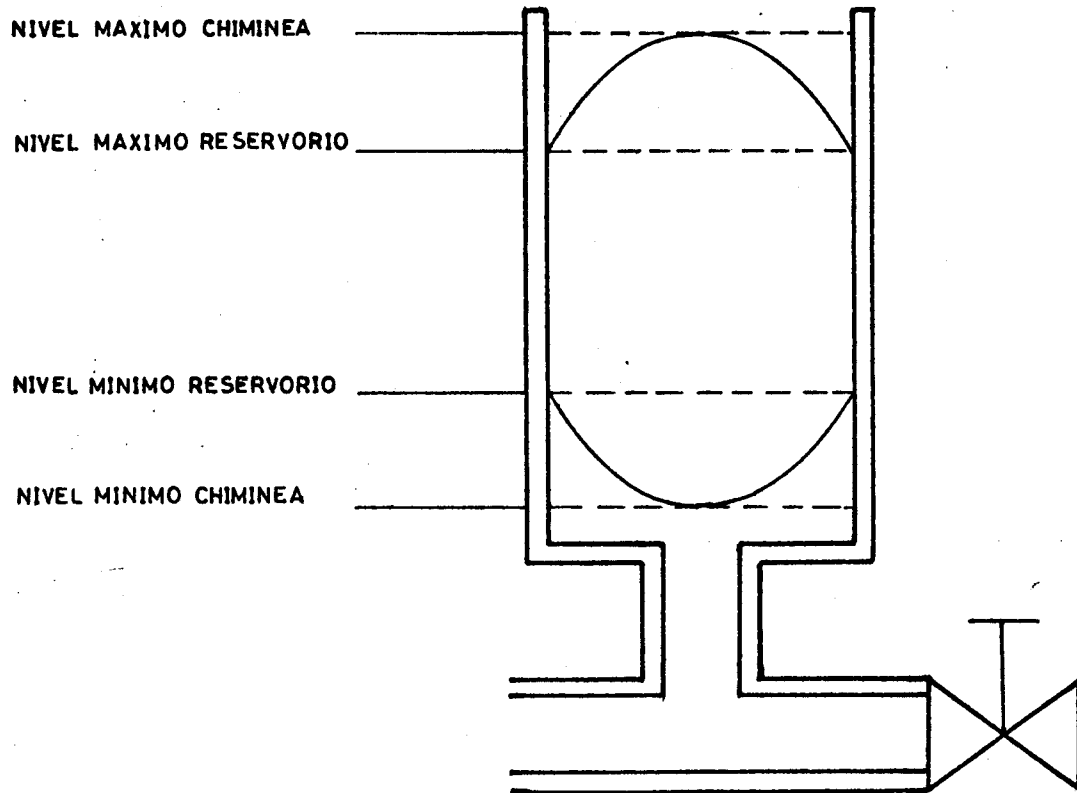


FIGURA 17

Curva de máxima y mínima elevación en la chimenea de equilibrio

la continuidad del flujo con la entrada de aire.

La ecuación de altura máxima es más exacta si incluimos la fricción en el resultado general, porque se retarda la velocidad del nivel de agua en el tanque chimenea y por lo tanto la elevación de la columna de líquido cuya fórmula sería la siguiente:

$$h_{\max} = V \sqrt{\frac{F L}{g A_2} + C^2}$$

Donde $C = KV^2$ y K sería un coeficiente de fricción ideal.

En las figuras 18 y 19 podemos observar el caso de los niveles que se obtienen en la chimenea después de un arranque de turbinas o en el caso de paro de las mismas mas denominadas altura de parada y de arranque en la chimenea de equilibrio.

Para el cálculo de la altura máxima del tanque se utilizó la ecuación 38 y mediante el uso del valor de la ecuación de Thoma esto es A_{TH} (desarrollado en la sección 4.3) se pudo obtener un valor de altura del tanque chimenea.

Si $F = A_{TH}$

$$h_{\max} = \frac{V A}{A_{TH}} \sqrt{\frac{A_{TH} L}{g A_2}}$$

Si el área A_2 es igual al del área A_1 y la velocidad es de 1.6 obtenida en la sección 4.2 y $L = 15.83$ se obtiene: $A_{TH} = 0.093 \text{ m}^2$.

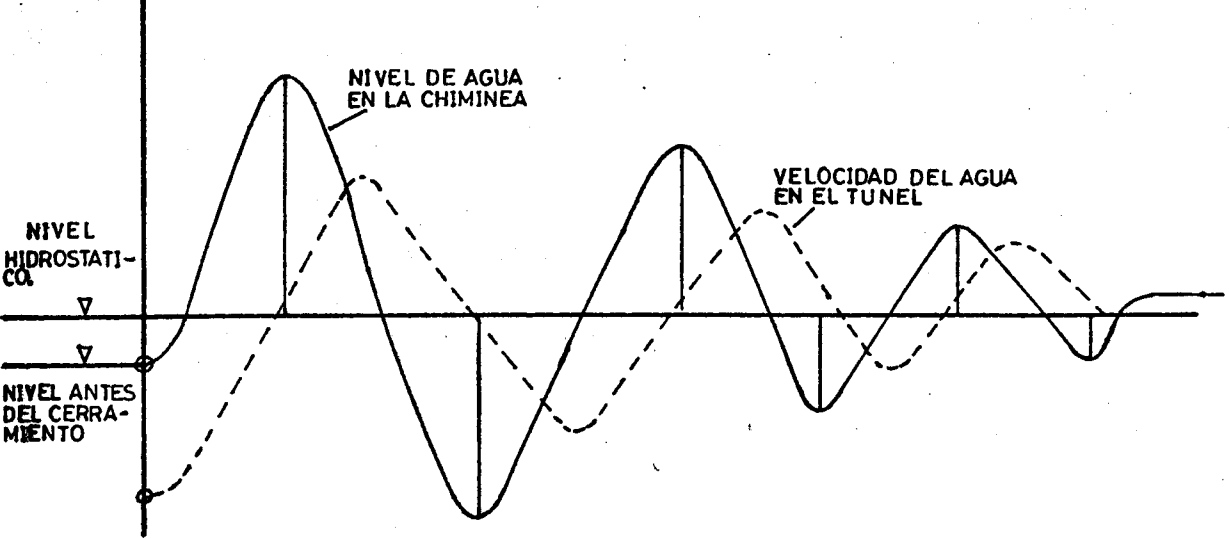


FIGURA 18

Representación de las oscilaciones de nivel de agua en una chimenea con brusco cerramiento de las compuertas.

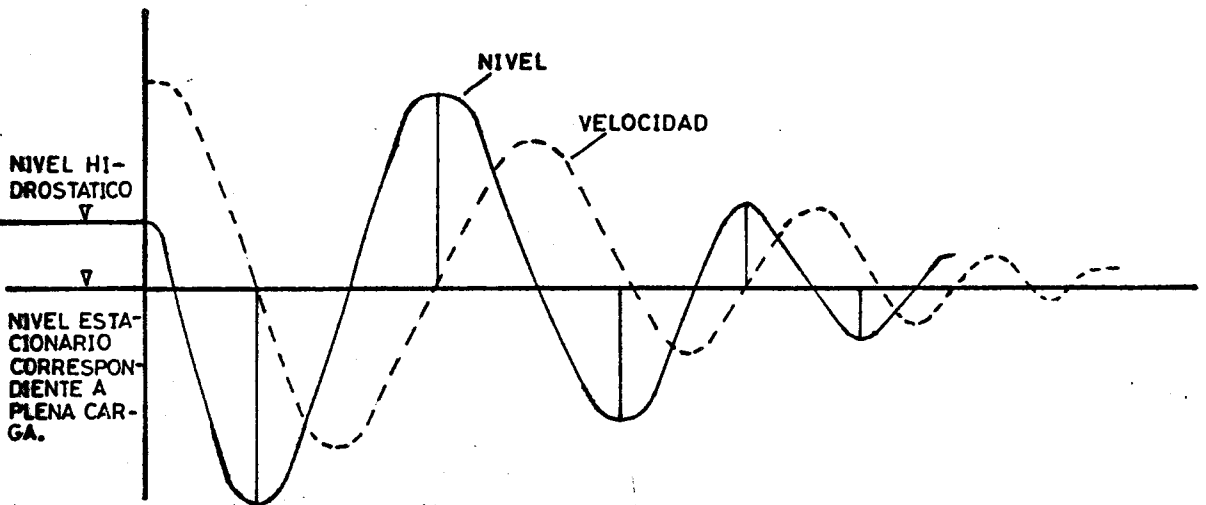


FIGURA 19

Representación de las oscilaciones del nivel de agua. con brusca apertura de compuertas.

$h_{max} = 1.02$ mts.

Si se considera el nivel en el reservorio de 1.6 el

$h_{total} = 2.62$ mts.

En la realidad se construyó de 2.58 mts. por la facilidad que brindaba el material, éste es de 2.4 mts de alto en acrílico y 0.18 mts. de material galvanizado.

3.4.- PERIODO DE ESTABILIZACION DE LA ONDA AMORTIGUADA.

1. SIN FRICCION

Del análisis de la ecuación diferencial del movimiento amortiguado(37); se obtuvo una ecuación sin fricción (38):

$$\frac{L}{g} \frac{dV}{dt} + h = 0$$

De esta ecuación diferencial lineal homogénea, de segundo orden, se obtuvo una solución en senos y cosenos:

$$h = A \cos \frac{2 \pi}{T} t + B \sin \frac{2 \pi}{T} t \quad (39)$$

Reemplazando el periodo de amortiguación:

$$T = \sqrt{A_2 * g / F * L}$$

Se obtiene de la ecuación 38:

$$h = A \cos \sqrt{\frac{A_2 g}{F L}} t + B \sin \sqrt{\frac{A_2 g}{F L}} t \quad (40)$$

Comparando las ecuaciones 39 y 40 notamos que:

$$\frac{2 \pi}{T} = \sqrt{\frac{A_2 g}{F L}}$$

Donde se obtiene que T es el periodo de estabilización de la onda, obtenida en función del área del tanque (F), longitud de la tubería y Área de la tubería (ecuac. 41).

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{F L}{A_2 g}} \quad (41)$$

Graficamente podemos observar (ver figura 20) los

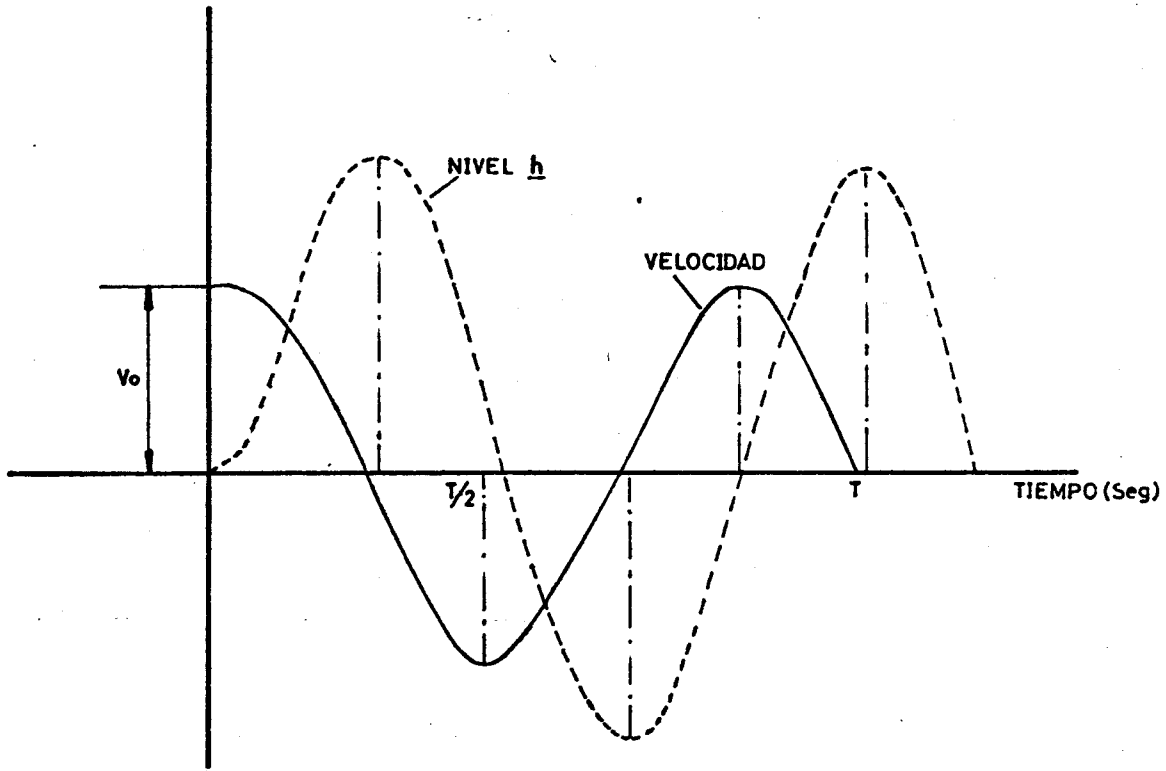


FIGURA 20

Períodos de oscilacion de nivel h y velocidad V

períodos de las oscilaciones para velocidad V y nivel h en una chimenea sin fricción, esto es, los niveles oscilan sin amortiguarse.

2. CON FRICCIÓN

Cuando analizamos el período de estabilización con fricción, debemos hablar de amortiguación de la onda de presión en el tanque, la misma que se observa en el nivel del tanque (ver figura 21), esto es cuando las oscilaciones comienzan a sucederse, debemos pensar que llegarán a estabilizarse a un nivel igual al del reservorio en el caso de un cierre de válvula o en el caso contrario a un nivel con pérdidas.

De la ecuación 35 comparando con el período de estabilización se puede indicar que el período de onda amortiguada es:

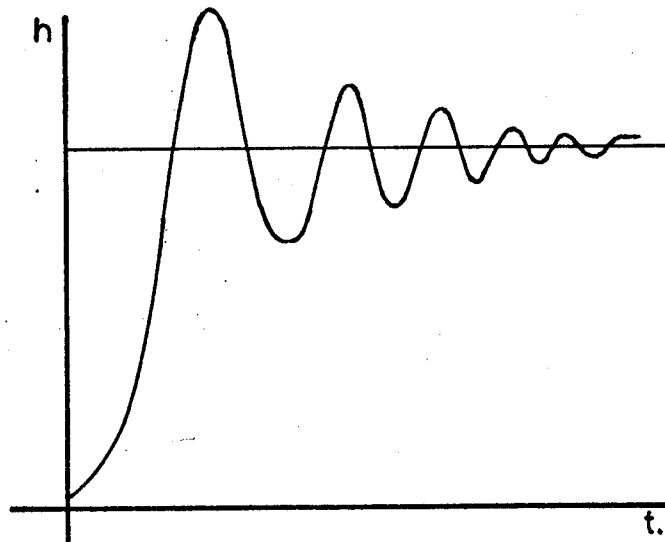
$$\frac{2 \pi}{T} = \sqrt{\frac{A_2 g}{F L} - \left[\frac{C_1 V_1 g A_2}{L A_1} \right]^2}$$

Despreciando el 2º término por ser pequeño con respecto al 1º del radical, obtengo 4 períodos para diferentes diámetros de orificios en la base de la chimenea de equilibrio.

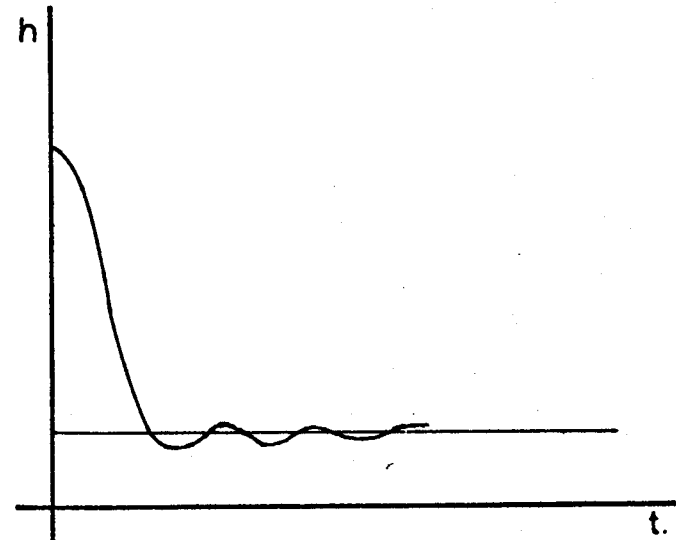
$$T = \frac{2 \pi}{\sqrt{\frac{A_2 g}{F L}}}$$

$$\sqrt{\frac{A_2 g}{F L}}$$

$$T_1 = 16.5 \text{seg (Período de oscilación, para } A_1 = .00196)$$



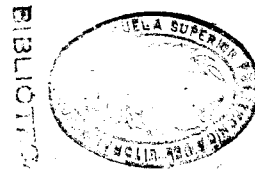
a) OSCILACIONES CON CIERRE DE VALVULA



b) OSCILACIONES CON ABERTURA DE VALVULA

FIGURA 21

Oscilación de la onda de presión en el tanque chimenea hasta su equilibrio



$T_2 = 22.1\text{seg}$ (Período de oscilación, para $A_2=.0011$)

$T_3 = 33.0\text{seg}$ (Período de oscilación, para $A_3=.00049$)

$T_4 = 67.8\text{seg}$ (Período de oscilación, para $A_4=.00012$)

$$h_1 = e^{-0.0182t} [-0.294\cos 0.38t - 0.048\sin 0.38t] - 0.006$$

Para obtener otras ecuaciones modelos, variamos A_2 porque se cambia el diámetro del orificio y se mantiene la velocidad. Luego para $A_2 = 0.0011 \text{ m}^2$:

$$h_2 = e^{-0.00574t} [-0.294\cos 0.285t - 0.020\sin 0.285t] - 0.001$$

Para un orificio de $D_3 = 0.025$ obtengo un $A_2 = 0.00049 \text{ m}^2$ y la ecuación del modelo teórico será:

$$h_3 = e^{-0.00114t} [-0.294\cos 0.190t - 0.006\sin 0.190t] - 0.000$$

Para un orificio de $A_2 = 0.00012 \text{ m}^2$, la ecuación modelo se convierte en:

$$h_4 = e^{-0.00007t} [-0.294\cos 0.094t - 0.00075\sin 0.094t] - 0.000$$

Estas tres ecuaciones h_2 , h_3 y h_4 son el resultado de dar valores a las variables de la ecuación modelo h_1 (ecuación 36).

En el apéndice B se muestra el programa que se utilizó para la obtención de los datos de las 4 ecuaciones mencionadas anteriormente, y en el apéndice B encontramos los gráficos de los resultados.

modificación del proyecto, por dificultades o imprevistos de los materiales o por otras razones.

En nuestro caso, cuando se planteó el tema, se consideró una estructura que soporte un tanque a una altura de 2 metros con una tubería de 15 metros de largo. Durante el proyecto, se cambió la altura del tanque y el lugar de la instalación.

En la fase de construcción se elevó la altura original del tanque, se situó definitivamente el lugar del montaje y se cambió la forma del tanque chimenea, quedando de sección cuadrada. Cuando quedó definitivamente instalado el equipo, se empezó con las pruebas de fugas, calibración y ajustes, hasta obtener los datos experimentales.

La estructura sirvió después para fijar el tanque chimenea y soportar la tubería y las válvulas a la vez. Cumpliéndose así un cambio en la idea original del ante proyecto.

4.2.- SELECCION DE ELEMENTOS.

a) TUBERIA.-

La tubería (túnel de aducción o. galería de presión en una central hidráulica), debe ser lo suficientemente rígida para soportar cambios de dirección de flujo o golpes de ariete. Por lo tanto, todas las captaciones para una central hidroeléctrica, tomadas desde un embalse o reservorio se hacen por un conducto a presión, generalmente llamado túnel, que conduce el agua hasta un punto conveniente, desde el cual se continúa por tubería forzada (gran pendiente), ramificada al final para llevar el agua a las distintas turbinas que integran el sistema generador de la Planta. Según la longitud, velocidad del agua y la elasticidad del material en la tubería, puede que se situen como reguladores de presión y de caudal. Para nuestro caso, la tubería seleccionada fué de hierro galvanizado, con suficiente espesor para resistir la presión ejercida por el cabezal estático del reservorio más la presión producida por el golpe de ariete y para evitar la corrosión por estar expuesta al medio ambiente.

* No hay longitud óptima, sin embargo para un rendimiento óptimo la longitud debe ser:

$$150 < L/D < 1500$$



La boca de admisión a la tubería, está construida con una reducción galvanizada de 4" a 2", que permite la entrada uniforme de agua a la tubería mediante un cambio gradual en la sección, para eliminar la turbulencia.

Se utilizó tubería galvanizada de 2" de ϕ ($D_{ext} = 0.0532m$), 3.5mm de espesor de aproximadamente 15.83 m desde el reservorio hasta las válvulas. La tubería tiene uniones simples, 1 unión univergal y 1 brida. Ver figura (22).

La tubería está firmemente apoyada sobre ángulos con abrazaderas en U, distanciadas para evitar flexiones por el peso del agua y por la tubería. A la instalación de la tubería se le dió suficiente caída, un gradiente pequeño, para darle flujo suficiente como para volverlo turbulento. Para el cálculo de la velocidad en la tubería, se tomó la ecuación de la energía y se hizo cero al término acelerativo por cuanto el caudal en la chimenea es nulo, ya que se supone que no está instalada y las válvulas permanecen abiertas.

Luego se tiene:

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + (Z_1 - Z_2) = h_{Lm} + h_L \quad (42)$$

De las condiciones del sistema se tiene:

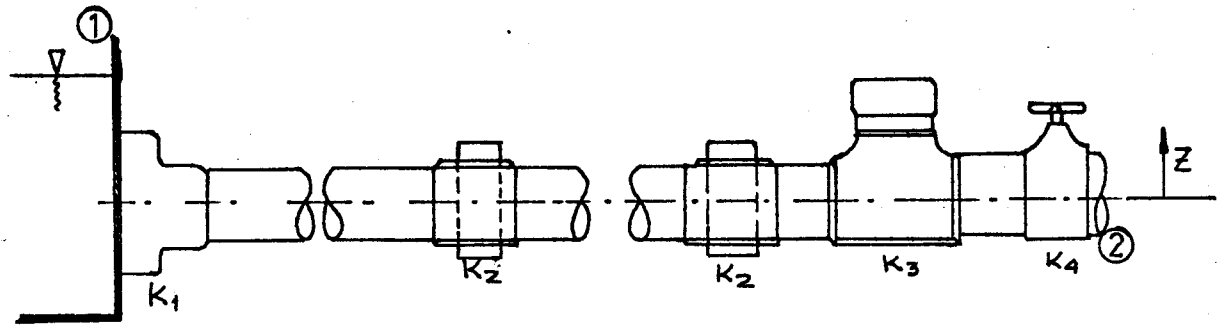


FIGURA 22

Conexion de la tubería al reservorio y accesorios

Si:

$$P_1 = 0$$

$$P_2 = 0$$

$$V_1 = 0$$

$$Z_1 - Z_2 = h$$

$$h_{Lm} = K_1 \frac{V_2^2}{2g} \text{(entrada)} + K_2 \frac{V_2^2}{2g} \text{(uniones)} + K_3 \frac{V_2^2}{2g} \\ + K_4 \frac{V_2^2}{2g} \text{(válvula)}$$

$$h_L = f \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} \text{(tubería)}$$

Reemplazando en la ecuación (42) obtengo:

$$h = \frac{V_2^2}{2g} (K_1 + K_2 + \frac{f \cdot L}{D} + 1 + K_3 + K_4)$$

Despejando velocidad obtengo:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{K_1 + K_2 + \frac{f \cdot L}{D} + 1 + K_3 + K_4}}$$

Si:

$K_1 = 0.5$ (coeficiente a la entrada de la tubería)

$K_2 = 0.5$ (coeficiente de las uniones)

$K_3 = 1.5$ (coeficiente a la entrada de la tee)

$K_4 = 0.25$ (válvula compuerta abierta).

$f = 0.028$ (asumido)

Se obtiene:

$$V_2 = 1.560 \text{ m/seg.}$$

Con esta velocidad se obtiene un Reynolds de:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = 92521$$

$$\nu_{\text{agua con } T = 25^{\circ}\text{C}} = 0.897 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$$

Este valor de Reynolds corresponde a flujo turbulento.

De la tabla 2 del Apéndice A, para una tubería nueva:

$$\frac{e}{D} = 0.002819$$

Del diagrama de Moody se obtiene $f = 0.026$ (ver figura 22'), luego tenemos una $V_2 = 1.6 \text{ m/seg.}$

b) BOMBAS.-

Para mantener las condiciones del sistema estable y poder tomar lecturas de los diferentes cabezales, tanto en el reservorio como en la chimenea de equilibrio, y por la continua escasez de agua, se instaló un tanque recolector o reservorio pequeño al final de la tubería de PVC, y se conectaron un par de bombas para hacer del sistema un circuito cerrado.

Para su selección se procedió de la siguiente manera:

Para determinar la velocidad se instaló un tubo pitot de cobre de 1/8" y una toma de presión posterior. Luego se tomó los datos de altura de presión dinámica y altura de presión estática, obteniéndose la velocidad del flujo. (Ver fig. 23).

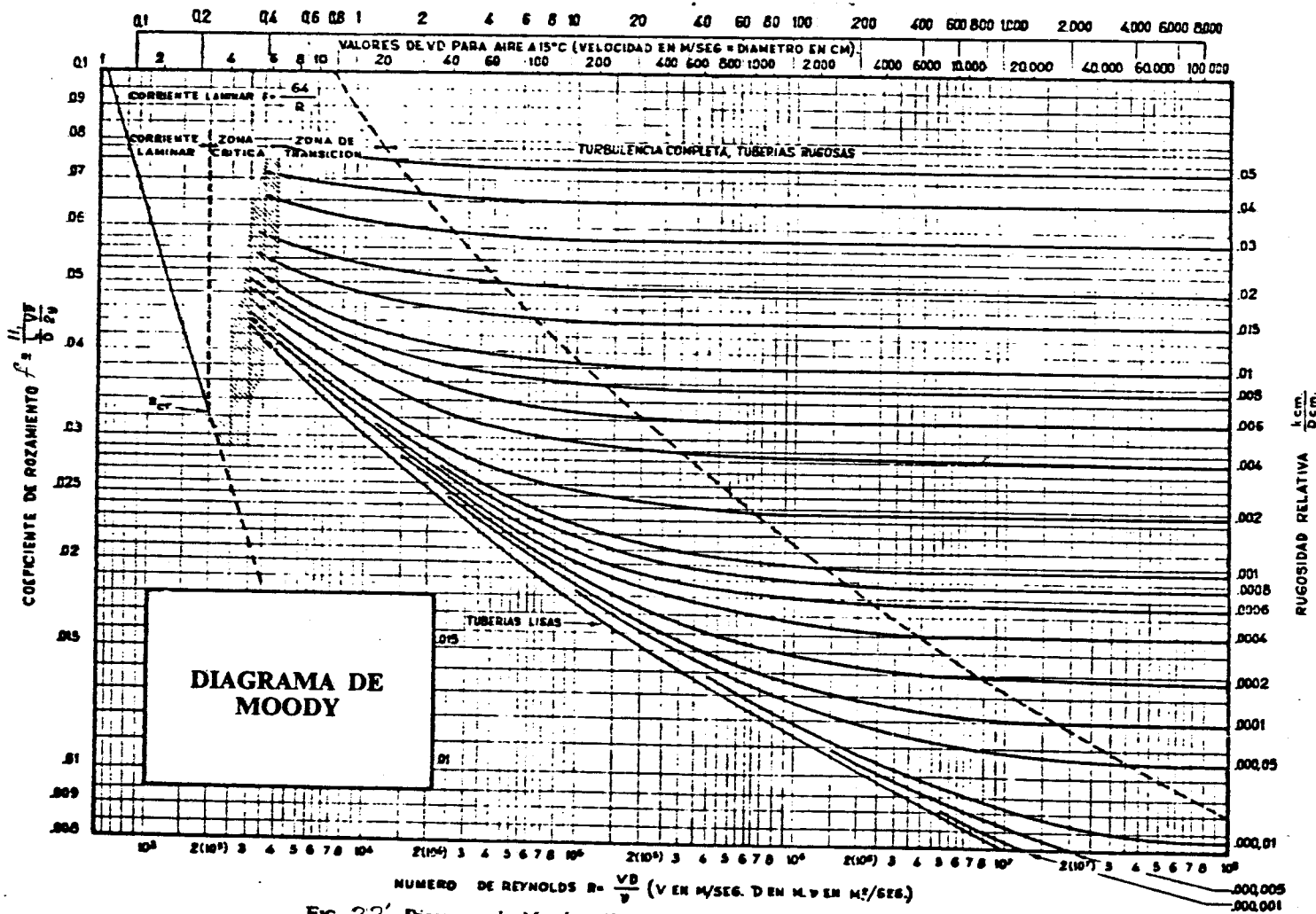


FIG. 22' Diagrama de Moody. (Por cortesía de Ediciones del Castillo, S. A.)

La velocidad se la determinó a partir de la ecuación de Bernoulli para un tubo de corriente, se tomó entre los puntos A y B de la figura 23. En el punto B = punto de estancamiento, la velocidad es cero, despreciando las pérdidas, tenemos:

$$\frac{P_A}{\Gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A = \frac{P_B}{\Gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + Z_B$$

$$V_B = 0$$

$$Z_A = Z_B = 0$$

$$\frac{P_A}{\Gamma} = H_A$$

$$H_A + \frac{V_A^2}{2g} = H_B \implies V_A = \sqrt{2 * g * (H_A - H_B)}$$

$$V_A = V_2 = C \sqrt{2 * g * [(P_B / \Gamma) - (P_A / \Gamma)]}$$

$$\text{Si, } P = \delta * g * h = \Gamma * h$$

$$V_2 = C \sqrt{2 * g * (H_A - H_B)}$$

Donde C=coeficiente de pitot = 0.8, dado por Spink (11).

$$V_2 = 0.8 \sqrt{2 * g * \Delta h}$$

Para un h promedio de 0.200 m se obtuvo:

$$V_2 = 1.584 \text{ m/seg}$$

Comparado con el valor de cálculo, concluimos que están cerca y lo aplicamos sin tomar en cuenta mas pérdidas:

$$Q = V_2 * A = 55 \text{ GPM}$$

En el sistema disponemos de 2 bombas centrífugas

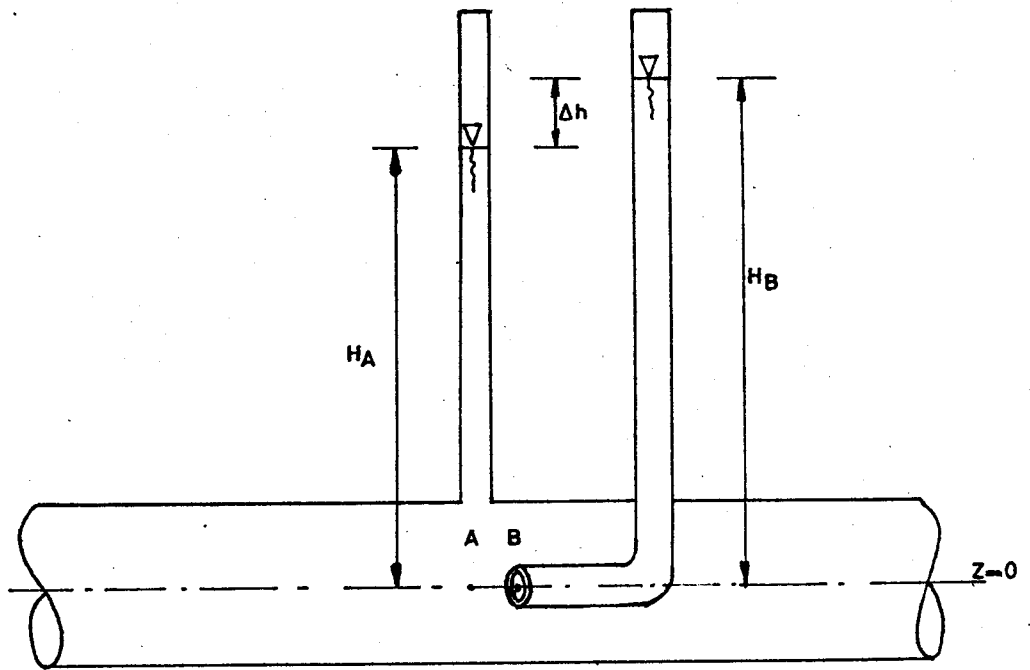


FIGURA 23

Instalación de un tubo pitot en una tubería

de 378 watt una a la descarga de la recolección o reservorio y otra sumergible en el interior del reservorio, con las cuales se pudo mantener un nivel constante en el tanque grande y tomar las lecturas, tanto de cabezal en el tanque como de pérdidas de carga en la chimenea.

c) VALVULAS.-

El equipo experimental necesitaba de válvulas. Se realizó un pequeño estudio para las consideraciones en el diseño porque las válvulas son elementos indispensables en cualquier sistema que maneje fluidos, siendo su función conectar o aislar componentes de un sistema, regulando la presión, modificando flujos, etc.

En la actualidad, se fabrican válvulas de diferentes materiales, tales como bronce, hierro fundido, aluminio, acero inoxidable, plástico, etc.

En nuestro experimento se necesitó una válvula de compuerta y otra de bola.

VALVULA DE COMPUERTA

Se utilizó este tipo de válvula porque se requería un dispositivo que permita interrumpir o cortar el paso de un fluido en una línea, esto es, para mantenimiento, reparación, etc.

Estas válvulas no deben ser usadas para regular paso de fluido, porque la velocidad del fluido



en una válvula parcialmente abierta, causa desgaste en los asientos y en el disco propiamente dicho. Este desgaste causa que con el tiempo tiendan a vibrar y ocasionar un fuerte ruido en la línea. Por lo tanto, en condiciones normales de operación, la válvula deberá permanecer totalmente abierta o totalmente cerrada, ver figura 24.

El tiempo normal requerido para abrir o cerrar una válvula de compuerta es aproximadamente la mitad del requerido en una válvula de globo y su caída de presión es mínima. Su instalación es independiente del sentido del flujo.

La operación de una válvula de compuerta se basa mediante un disco que se mueve verticalmente, en forma perpendicular a la línea del fluido y que asienta en medio de dos anillos para cerrar el flujo. El vástago roscado y el volante mueven el disco para abrir y cerrar la válvula, ver figura 24. El volumen del flujo va en relación directa con el número de vueltas en el volante. El disco puede ser sólido o seleccionado en forma de curva o ser disco doble.

La válvula de compuerta puede ser utilizada en compresores, condensadores de vapor de líneas de agua, vapor y químicos, sistemas de drenajes, líneas de derivación (By pass) y en líneas a gas

de baja presión.

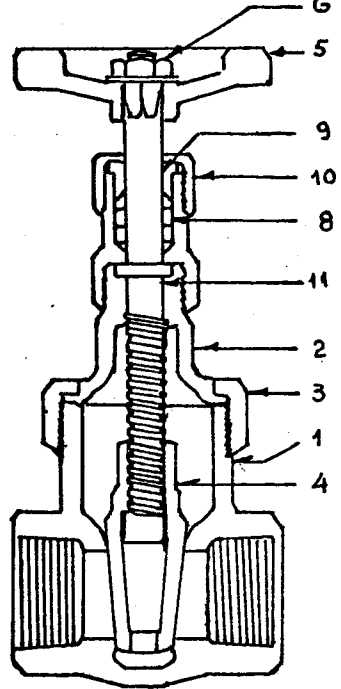
VALVULA DE BOLA

La otra válvula que se utilizó fue de bola del tipo de cierre rápido. Estas válvulas consisten principalmente de una bola perforada y asientos diseñados para embonar con ella y por lo general la abertura de la bola no es menor que el diámetro interior del tubo conectado. De esta manera, el flujo no tiene obstrucción y por lo tanto, virtualmente no hay pérdida de presión, ver figura 25.

Los tipos más comunes de válvulas de bola son: De asientos flotantes, de bola y asientos flotantes y de asientos y bolas flotantes con resortes.

La mayor parte de los asientos se hacen de goma buna o teflón (el buna no debe usarse para válvulas cuya temperatura de trabajo sea mayor de 82 °C). Los sellos de la válvula son del tipo "O Ring" (anillo de caucho) o de empaques corrientes.

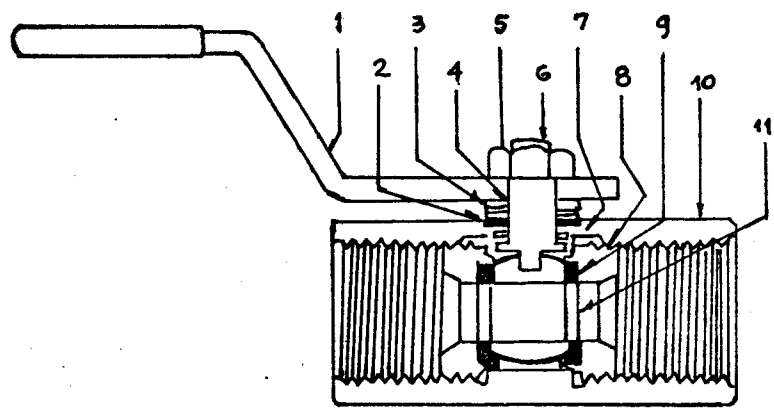
En algunos tipos, los asientos y los sellos pueden inspeccionarse o retirarse sin quitar de la línea el cuerpo de la válvula. Otros tipos permiten mantenimiento solo para fugas en el asiento. Un tercer tipo necesita retirarse de la línea para su reparación o mantenimiento. La



1	Cuerpo
2	Casquete
3	Tuerca casquete
4	Disco
5	Galleta
6	Tuerca
8	Empaње
9	Gland: Sello
10	Prensa
11	VASTAGO

FIGURA 24

Valvula compuerta y sus partes



N.	Partes
1	Palanca
2	Anillo
3	Secudor
4	Arandela
5	Tuerca
6	Vástago
7	Sello
8	Rosca
9	Asiento
10	Cuerpo
11	Bola

FIGURA 25

Valvula de bola y sus partes

posición de la palanca de mando indica la posición de la bola (abierta o cerrada). La válvula se abre o se cierra con 1/4 de vuelta a la palanca.

d) RESERVORIOS

La clasificación de las centrales según la altura del salto es la más importante, porque es el salto más que ninguna otra característica la que determina tanto la obra civil (represa, canal de derivación, conducto forzado, central) cuanto el tipo de turbina, así como la velocidad del grupo y el tipo de alternador.

- Salto de pequeña altura.

Altura neta $H_n < 14.99$ m.

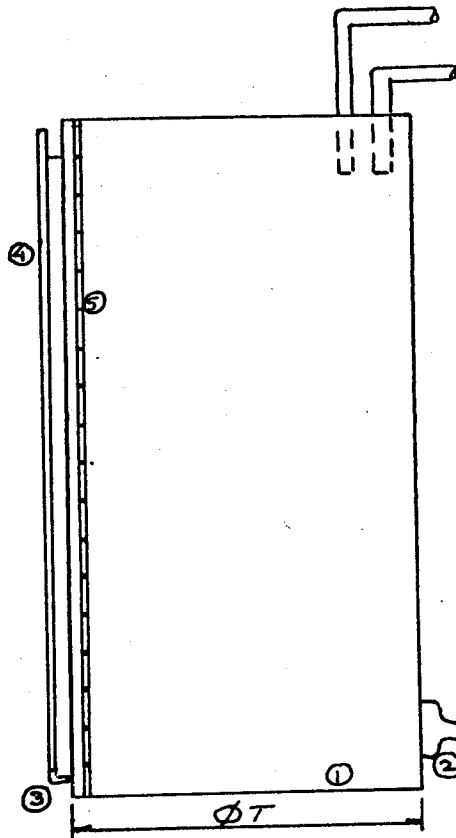
- Salto de mediana altura.

15.00 m. $< H_n < 49.99$ m.

- Salto de gran altura.

$H_n \geq 50$ m.

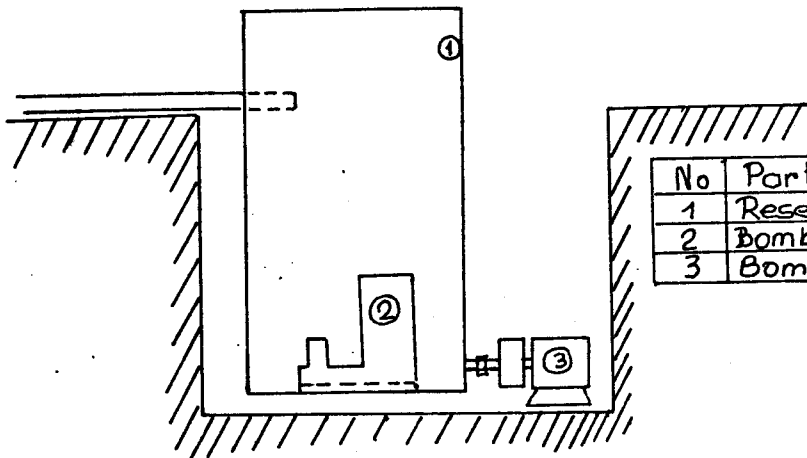
En nuestro caso, resultó un salto de pequeña altura, para esto se construyeron 2 tanques o reservorios. El reservorio mayor figura 26 sirvió de represa y se lo construyó de plancha negra de 1/8" de espesor, de 0.710 mts. de diámetro y 1.8 mts. de largo. La plancha fue rolada y soldada, incluyendo los drenajes y la descarga en forma de reducción galvanizada roscable. Se le instaló un conector de bronce con manguera



No	Partes
1	Reservorio mayor
2	Reduccion 4"x2"
3	Conector bronce
4	Manguera
5	Cinta metrica

FIGURA 26

Construcción reservorio mayor y sus accesorios



No	Partes
1	Reservorio menor
2	Bomba Sumerg.
3	Bomba

FIGURA 27

Instalacion del reservorio menor y los equipos de reposicion bajo tierra

transparente y cinta graduada.

El reservorio pequeño se construyó para recoger la descarga y volver a reutilizar el fluido. A este reservorio se le conectaron las dos bombas, una a la descarga del tanque y la otra bomba en su interior, ver figura 27.

Este reservorio fue situado por debajo de los niveles del patio del CETE.

4.3.- CONSTRUCCION DE LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO

Cuando se empezó la construcción de la chimenea se pensó en una chimenea transparente y redonda para observar las oscilaciones, pero al no existir material de vidrio en las dimensiones requeridas se construyó en plancha de acrílico transparente de sección cuadrada, considerando los mismos parámetros del área de sección transversal redonda. Así, se construyó la primera chimenea en plancha de 2 mm de espesor. Ante los continuos reventones en forma longitudinal que sufría la base de la chimenea durante la iniciación de las pruebas, especialmente cuando se abría la válvula de control rápidamente a un 100% de flujo, se pensó en una nueva chimenea de más espesor y que resistiera a los reventones.

A la nueva chimenea se procedió a colocarle refuerzos en las esquinas donde se unían las planchas de acrílico y también en la base que nace después de la tubería. La figura 28 nos muestra como quedó construida la sección transversal de la nueva chimenea. La figura 29 también nos muestra como se pudo fijar la base de la chimenea a la tubería galvanizada y los distintos cambios de orificio para las diferentes pruebas.

La nueva chimenea se la construyó en plancha

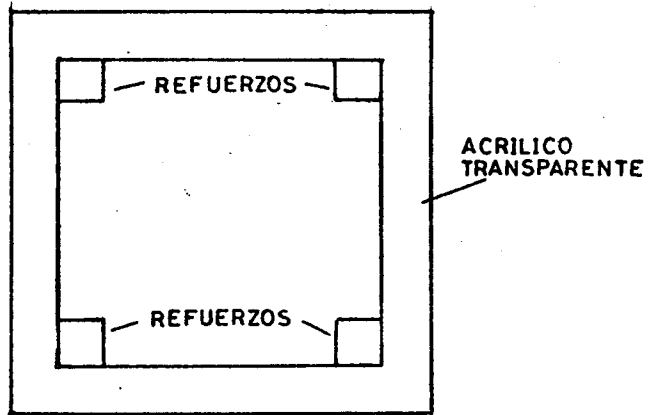


FIGURA 28

Sección transversal de la chimenea de equilibrio

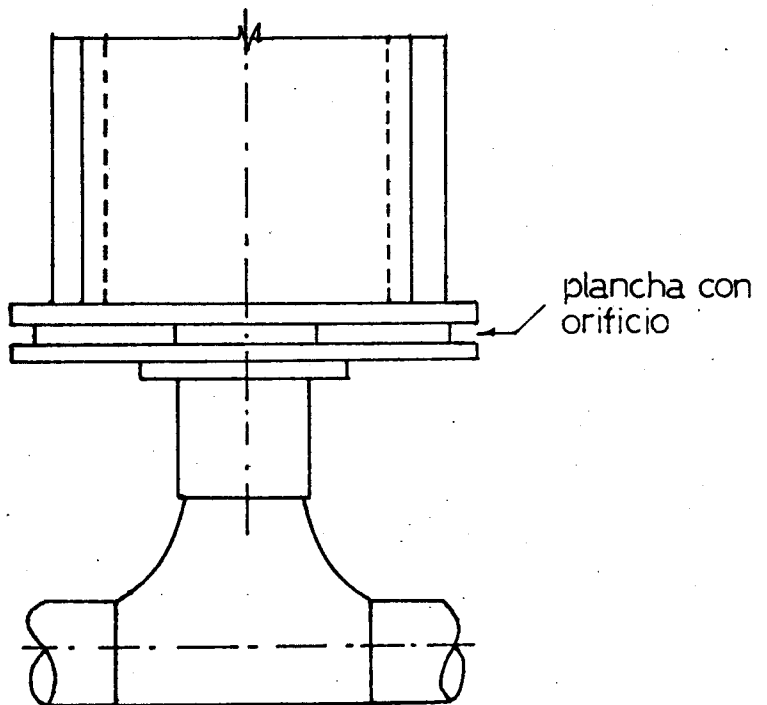


FIGURA 29

Base de la chimenea que se une a la tubería

Como una de las consideraciones para el dimensionamiento de la chimenea era que tenía que ser de suficiente altura para prevenir sobreflujo para todas las condiciones de operación, a menos que un derrame por sobreflujo esté previsto, se decidió construirla del largo que daba la plancha de acrílico, esto es, de 2.4 mts. de largo.

Otra condición es que la chimenea debía estar localizada lo más cerca posible a la planta de energía o bombeo.

Otra consideración en la chimenea fué que tenía que ser lo suficientemente baja, de tal manera que durante su operación no admita aire hacia la tubería forzada o en la línea de descarga en las plantas de bombeo.

Otra de las consideraciones para el funcionamiento y dimensionamiento de una chimenea de equilibrio se basan en la fórmula de Dieter Thoma (1).

$$A_m = A * L / 2 * g * C * H_m$$

Donde C es el coeficiente de las pérdidas y viene dado por:

Las pérdidas por la entrada, la tee, velocidad y una fricción de 0.026 para un flujo turbulento, encontrado en la sección 4.2, establece que:

$$C = \frac{1 + K_1 + K_2 + (f * L / D)}{2g}$$



BIBLIOT

$$C = \frac{1 + 0.5 + 1.5 + (0.026 \cdot 15.83 / 0.0532)}{2g}$$

$$C = 0.547$$

Como no se conoce la dimensión de la chimenea queda como resultado:

$$CV^2 = H_f L$$

Donde:

$H_f L$ = Pérdida mínima de carga

V = Velocidad equivalente hacia la chimenea

H_m = Nivel en el reservorio mayor - Nivel de válvula de regulación - Pérdida máxima de la unidad.

$$H_m = H - H_{LT} = H - CV^2$$

Lo que es lo mismo:

$$A_m = L \cdot A_1 / 2 \cdot g \cdot C (H - CV^2)$$

$$A_m = L \cdot A_1 / 2 \cdot g \cdot C \cdot H_m$$

Donde tenemos que $K_1 = 0.5$ (coef. de pérdidas en la entrada), $K_2 = 1.5$ (coef. de pérdidas en la tee).

Si se toma la pérdida de carga, a lo largo de la tubería hasta la chimenea, se obtiene $C = 0.547$.

Como experimentalmente se obtuvo una velocidad de 1.484 y teóricamente en la sección 4.2 se obtuvo una velocidad de 1.6, se tomó una velocidad de 1.5 m/seg para realizar los cálculos. Con esta velocidad se encontró:

$$A_m = \frac{(2.22 \times 10^{-3})(15.83)}{2(9.81)\{1.6 - [0.547(1.5)^2]\}(0.547)}$$

$$A_w = \frac{(m^2)(m)}{(m/s^2)(m - [s^2/m(m/s)^2])(m)}$$

$$A_w = 0.00878 \text{ m}^2$$

Si $A = L^2$, obtengo:

$$L = 0.0937 \text{ m.}$$

Como se mencionó anteriormente la chimenea se construyó de sección cuadrada, de tal manera que el valor de L es igual a 0.092 m por lado.

Su área resultante fue de $F = 0.00846 \text{ m}^2$.

Comparando con la sección 2.3, vemos que para nuestro caso resultó la construcción de una chimenea de equilibrio de orificio restringido, como se lo puede observar en las fotos del apéndice C.

En la foto #1 observamos el equipo construido, en la foto #2 se muestra la oscilación del nivel de agua en la chimenea, en la foto #3 podemos observar los discos que se utilizaron para variar el área en la base de la chimenea.

CAPITULO 5

PRUEBAS EXPERIMENTALES

5.1.- OSCILACION DEL NIVEL DE AGUA EN LA CHIMENEA DE EQUILIBRIO.

Antes de empezar las pruebas, se calibró los niveles de los tanques, tanto del reservorio mayor como el de la chimenea de equilibrio. La calibración se la hizo colocando a su alrededor una escala graduada en centímetros y en medios centímetros. Como nivel inferior se tomó el punto central de la válvula de control, como se puede observar en la figura 30.

Con el reservorio lleno y la chimenea llena de agua, por vaso comunicante, se tomó como lectura constante la base de la chimenea, esto es 18 cms, que consiste de un neplo, una tee y una base cuadrada de acrílico con rosca para tubo de 2" de diámetro, como se observa en la figura 31.

Podemos ver en la figura 32 la línea piezométrica que se construyó a lo largo de la tubería, desde el reservorio hasta el tanque chimenea. Podemos notar que las pérdidas a la entrada de la tubería son notorias, reduciendo el cabezal. En las uniones hay pocas pérdidas de altura y en la tubería también es notoria la pérdida de altura.

Las alturas de presión se las tomó con mangueras de plástico transparentes de 1/8" de diámetro

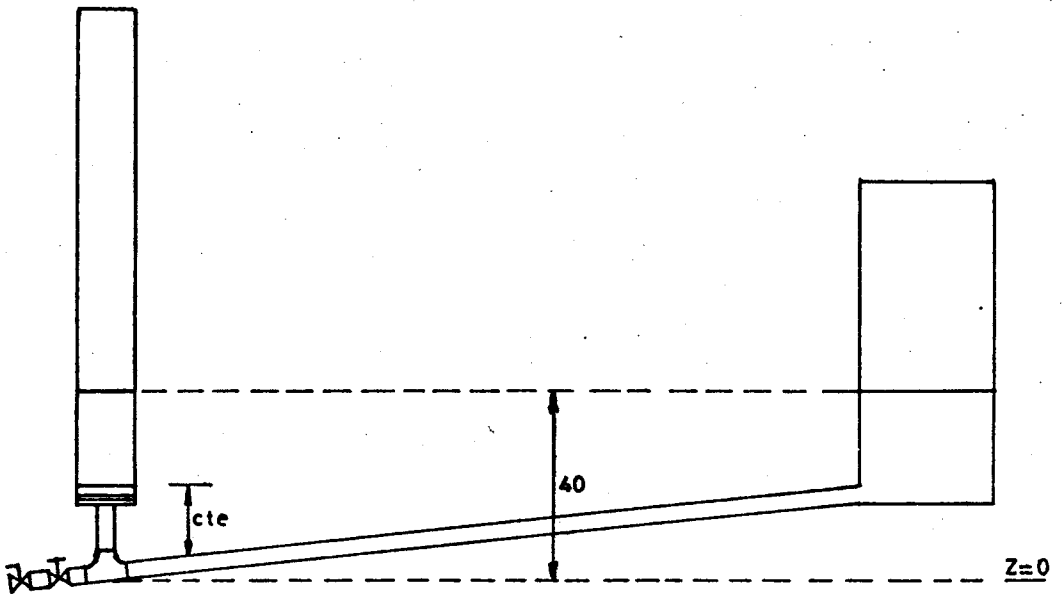


FIGURA 30

Calibración de cotas en dos tanques

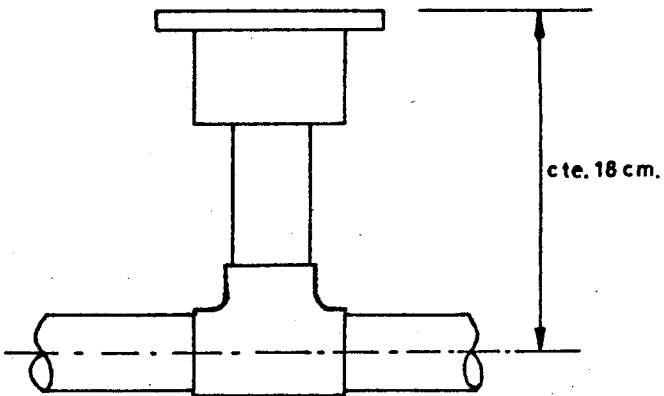


FIGURA 31

Cota constante en la base de la chimenea de orificio restringido

interior, situadas a 1 metro c/u a lo largo de la tubería.

Ya con los niveles graduados en el reservorio, se procedió a la primera prueba. Esta consistió en abrir las válvulas de control rápidamente, prender las bombas y esperar hasta que los niveles se normalicen. Luego se tomó lectura del nivel en la chimenea, en el reservorio y en los tubos de pitot. Una vez que se anotó estas lecturas se procedió a cerrar manual y rápidamente la válvula de bola. Parando las bombas casi al mismo tiempo, se procedió a tomar las lecturas de oscilación del nivel de agua en la chimenea y del tiempo con un cronómetro.

Los resultados de la toma de datos experimentales para el orificio de 50 mm de diámetro, generó la obtención de 4 tablas de oscilaciones de nivel, cuyas oscilaciones las podemos observar en los gráficos # 1, 2, 3 y 4, los mismos que se encuentran a continuación de las tablas de resultados 1, 2, 3 y 4.

Luego, se procedió a variar las cotas del tanque reservorio y a tomar las lecturas de nivel y tiempo para 15 oscilaciones, necesarias para llegar a una amortiguación notoria. En la tabla de resultados #5 se observa los valores experimentales para el cabezal en el reservorio, en la chimenea, las

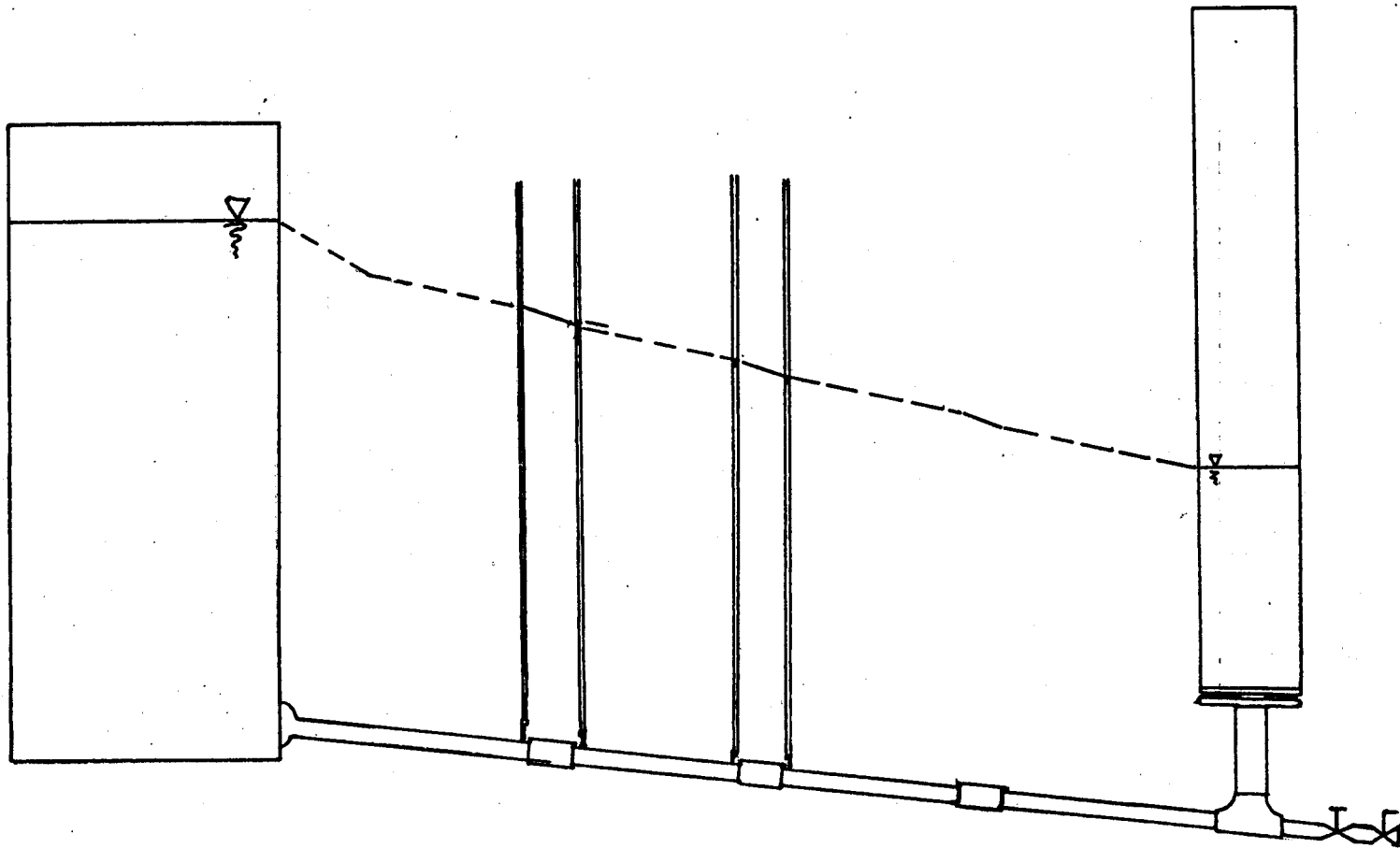


FIGURA 32

Línea de alturas piezométrica de la tubería

pérdidas, el pitot, la velocidad, el flujo y el tiempo de las oscilaciones, permaneciendo éste casi constante.

En otra prueba se elevó mucho mas el tanque reservorio y se procedió a construir otra tabla de datos, observándose que no varió la pendiente hidráulica pero si los otros datos, ver tabla de resultados #6.

5.2.- DECAIMIENTO DE LAS OSCILACIONES EN LA CHIMENEA HIDRAULICA.

A medida que se realizaron las pruebas y se cambiaba de diámetro la placa de orificio, las oscilaciones del nivel de agua sufrían un decaimiento. Esto lo podemos observar en los gráficos de amortiguación, donde se usa para más del 75% de la altura de la chimenea para oleaje máximo hasta llegar a un mínimo de altura de pérdida en la chimenea. Si se disminuye el nivel de agua entraría aire en la chimenea y el sistema se volvería inestable, que es lo que no se desea en la construcción de una chimenea hidráulica.

En las tablas de resultados #7, #8 y #9 se presentan los datos de amortiguación para un orificio de 37.5 mm, con sus respectivos gráficos, y en las tablas #10 y #11, con sus gráficos, para orificios de 25 mm y 12 mm. En estos diámetros la amortiguación sucede casi en línea ascendente hasta un nivel de equilibrio, en un número de oleaje mínimo de amortiguación de onda.

De lo anteriormente observado podemos señalar el decaimiento de las oscilaciones a medida que se reduce el diámetro en la base de la chimenea de equilibrio.

Del decaimiento de las oscilaciones podemos decir que se necesitan 15 oscilaciones para un orificio

de 50 mm de diámetro; 12 oscilaciones para un orificio de 12.5 mm de diámetro; 10 oscilaciones para un orificio de 25mm de diámetro y aproximadamente 6 oscilaciones para un orificio de 12.5 mm de diámetro, que son, en promedio, las mas facilmente observables y graficables.

En la tabla #12 se procedió a variar el cabezal inicial de pruebas en el reservorio para un orificio de 37.5 mm y se obtuvo una serie de datos para el cabezal en la chimenea de equilibrio, pérdidas, pitot, velocidad, flujo y tiempo, notándose en ésta última una variación mínima.

EVALUACION DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Modelo Experimental: Operación y observaciones en sus elementos.

a) TIEMPO DE CIERRE DE LA VALVULA DE BOLA O CONTROL:

Para cierre rápido o instantáneo tenemos que:

$$t_c < 2L/a$$

Para cierre lento de válvula tenemos que:

$$t_c > 2L/a$$

Luego, si $L = 15.83 \text{ m}$ y $a = 1352 \text{ m/seg}$ (según sección 2.2), $t_c = 0.023 \text{ seg}$ ó 23 milisegundos:

Nuestro tiempo de cierre manual de válvula resultó estar entre $0.48\text{s} < t_c < 0.54\text{s}$. Luego $t_c = 0.54\text{s} > 0.023\text{s}$, de la ecuac.(1.a) $p = 1.42 \text{ Kg/cm}^2$, el resultado fué que todos los cierres de válvulas fueron lentos, porque no se disponía de válvulas capaces de actuar rápidamente y todo cierre se lo hizo manualmente.

b) NIVELES EN LA CHIMENEA

Para un $d = 50 \text{ mm}$, el nivel máximo de onda llegó a la cota $h_{\max} = 1.960 \text{ m}$, que cubrió el 77% del tanque chimenea, estabilizandose en una cota $h = 1.615 \text{ m}$.

Luego, con un nivel mínimo $h_{\min} = 1110\text{m}$. en el reservorio se alcanzó una onda con un h_{\max} de 1.480m ., que equivale al 57% del tanque chimenea, y se estabilizó en un h normal = 1100 m . Siendo su $h_{\min} - ch = 0.330 \text{ m}$.

Esta altura fué suficiente para nuestras pruebas porque no hubo derramamiento de líquido como tampoco entrada de aire, situaciones peligrosas para el sistema.

c) ESTABILIZACION DE LA ONDA

Cuando se trabajó con un orificio de 0.050 m. la onda tardó aproximadamente 226 seg., dividiendo para su período $T = 15.56$ seg. se obtiene que la onda osciló aproximadamente 13.7 veces hasta amortiguarse, lo cual concuerda con los gráficos 1, 2, 3 y 4, donde observamos que se requiere de 14 a 15 períodos para que la onda se estabilice.

Es importante notar que todas las ondas nacen en un punto muy inferior al de su estabilización final.

d) VARIACION DE VELOCIDAD

Si observamos los valores del tubo pitot en la tabla 5, notamos que el factor 0.82 es aceptable para obtener velocidades ya que sus valores se asemejan al real, midiendo 5 Gal/seg en 6.43 seg. se obtuvo una velocidad promedio de $V = 1.484$ m/seg.

e) VARIACION DE PENDIENTE HIDRAULICA

Pendiente hidráulica es $n = h_L/L$, donde h_L son las pérdidas y L la longitud.

Si damos valores a las pérdidas y a la longitud observamos que n no cambia. Este resultado es lógico porque si se varía el nivel del tanque las pérdidas mayores y menores continuaran siendo iguales. Esto lo

podemos ver en la tabla 6 donde lo que varía es solo el cabezal h del reservorio, lo demás no se ve afectado.

f) VARIACION DE DIAMETRO EN LA BASE DE LA CHIMENEA

f_1) Para un diámetro $d = 37.5\text{mm}$ se obtuvo 3 gráficos de oscilación, # 7, 8, y 9, de los cuales podemos señalar lo siguiente:

- Que $H_{\max} = 1.850\text{m}$; $H_{\min} = 0.250\text{m}$, representando el 71.7% del tanque y el 10.85% respectivamente.
- El período de estabilización $T = 15.1$ seg aumentó, y la oscilación de la onda disminuyó en aproximadamente 12 oscilaciones o períodos.
- La amplitud de la onda disminuyó en un 56% con respecto a la del orificio de 50mm.
- Se observa que según como van disminuyendo los niveles en el reservorio también disminuyen las velocidades calculadas a partir de las mediciones en el tubo de pitot.

f_2) Para un $d=25$ mm, se observa el gráfico #10 donde la máxima oscilación alcanza a elevarse hasta en un 10% de la cota del reservorio: $h_{\max} = 1.520$ m, para un h reposo = 1.430 m. El período de amortiguación es mayor, pero su amortiguación tarda menos, $T = 28$ seg, la mitad del tiempo para los $d = 50$ y 37.5 mm.

f_3) Para un $d = 12.5$ mm., en la gráfica #11 observamos que la amortiguación se alcanza casi en un solo

período, por cuanto lo que se tarda en alcanzar la primera onda es lo necesario para amortiguarse, el resto de la onda varía muy poco su amplitud.

La primera oscilación se consigue en 10 seg. y en los demás períodos casi no hay amplitud visible, lo que demuestra que la onda se amortigua en una sola onda.

Módulo teórico.

En la sección 3.2 encontramos una ecuación amortiguada, la misma que al darle valores se encontró que la oscilación empieza con un pequeño valor para un $t=0$, $h=0.294$ m y a medida que pasa el tiempo $t=t_1$, la ecuación modelo

$$h = e^{-0.018t_1} [-0.294 \cos 0.38 t_1 - 0.014 \sin 0.38 t_1]$$

continúa funcionando, incluso su $T = 2 / 0.38 = 16.5$ seg nos indica que para razones de análisis sirve como modelo teórico ya que se aproxima a la realidad. Cuando variamos su área A_2 , notamos que la ecuación no tiende a amortiguarse, y su amplitud no disminuye con el tiempo.

El parámetro $C_1 = K_1 V_1^2$ es importante en la ecuación porque al actuar como exponente, su valor influirá directamente en la amortiguación.

Encontramos que los períodos ($T_1=16.5$; $T_2=22.1$; $T_3=33$; $T_4=67$ seg) en la ecuación teórica están en relación con los períodos de las pruebas experimentales y sus valores se aproximan en 98%, 93%, 85% y 54% respectivamente.

Sin embargo de lo anterior, consideramos necesario que el

estudio teórico se lo amplie a objeto de profundizar su alcance y cubrir el rango que puede alcanzarse con nuestro equipo experimental.



BIBLIOT

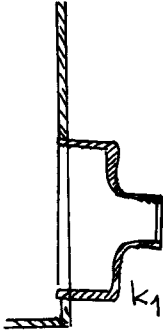
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1º. La construcción de un equipo experimental para estudiar la amortiguación de la oscilación de una onda a través de una chimenea de equilibrio es posible.
- 2º. La construcción del equipo experimental proporciona la oportunidad de asimilar conocimientos prácticos donde se asientan los conocimientos teóricos adquiridos. El equipo experimental construido es confiable.
- 3º. El equipo experimental construido puede ser utilizado para fines didácticos, tanto demostrativos como experimentales.
- 4º. La construcción del equipo ha sido de características muy económicas.
- 5º. Se debe construir otros equipos experimentales que estudian situaciones prácticas de ingeniería como en el presente caso.
- 6º. El equipo construido puede ser utilizado para otras pruebas experimentales, al utilizar chimeneas de diferentes secciones o formas.
- 7º. Se pueden realizar otras investigaciones con el mismo equipo, efectuando cambios en sus elementos.
- 8º. Este trabajo experimental ha permitido poner en práctica los ajustes del modelo teórico en base a los resultados en las pruebas generales por un modelo experimental.

CALCULO DE LAS CONSTANTES C₁ Y C₂

CONSTANTE C₁ PARA LA ENTRADA DE LA TUBERIA DE HIERRO GALVANIZADO.

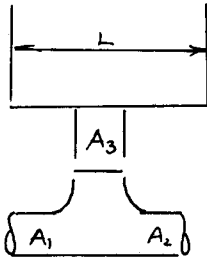
$$C_1 = \frac{K_{\text{Entrada}}}{2g}$$



$$C_1 = \frac{0.5}{2(9.81)}$$

$$C_1 = 0.025$$

Por continuidad en la Tee: se obtuvo f en la chimenea.



$$V_3 A_3 = A_2 V_2$$

$$V_3 = 1.489 (0.00196/0.0084)$$

$$V_3 = 0.35$$

$$D_h = 4 A/P = 4 L^2/4 L = L$$

$$Re = (0.35 * 0.092) / 0.897 * 10^{-6}$$

$$Re = 35897$$

$$e/D = \text{liso} \implies f = 0.024$$

CONSTANTE C_2 PARA LA VELOCIDAD V_2 , LA TEE, LAS UNIONES,
LA TUBERIA Y LA CHIMENEA.

$$C_2 = \frac{1 + K_2 + K_3 + K_4 + fL/D + K_5 + fL/D}{2g}$$

$$C_2 = \frac{1 + 1.5 + 0.05 + fL/D + K_4 + fL/D}{2g}$$

$$C_2 = \frac{2.55 + 0.026 \frac{15.83}{0.0532} + 0.25 + 0.024 \frac{2.4}{0.092}}{2(9.81)}$$

$$C_2 = 0.568$$

CALCULO DE PERDIDAS PARA UN $\phi = 50$ mm.

$$\begin{aligned} h_{LT} &= C_1 V_1^2 + C_2 V_2^2 \\ &= (0.025)(1.484)^2 + (0.568)(1.484)^2 \\ &= 0.055 + 1.250 \\ &= 1.305 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h(0) &= -H + h_{LT} \\ &= -1.6 + 1.305 \\ &= -0.294 \end{aligned}$$

APENDICE B

PROGRAMA PARA GRAFICAR UNA OSCILACION DE ONDA EN UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO.

10 REM " OSCILACIONES DE NIVEL EN UNA CHIMENEA DE EQUILIBRIO"

20 SCREEN 2

30 FOR I = 0 TO 200 STEP 2

40 X = EXP((-I)*(0.403))

50 Y1= (- 0.294 *(COS((I)*(0.403))))

60 Y2= (- 0.0146 *(SIN((I)*(0.403))))

70 Y3= X * (Y1+Y2)

80 NEXT I

90 PRINT Y3

VALORES TEORICOS DE OSCILACION DE ONDA AMORTIGUADA OBTENIDOS A PARTIR DEL PROGRAMA ANTERIOR PARA ECUACION MODELO h_1 , h_2 , h_3 y h_4 .

h_1	h_2	t
- 0.294	- 0.294	0
0.258126	- 0.2553631	2
0.1329437	- 0.1377462	4
3.074325E -02	2.027681E-02	6
0.1720004	0.168372	8
0.2421512	0.2604525	10
0.2212322	0.2689945	12
0.1230798	0.1932228	14
- 0.0119661	0.0587466	16
0.1332731	- 9.104847E-02	18

0.1986515	- 0.2089707	20
0.1887701	- 0.2588673	22
0.1124284	- 0.2266785	24
- 1.451225 E-03	- 0.1243336	26
0.1022503	0.0145697	28
0.1622956	0.1457639	30
0.1603889	0.228397	32
0.1015585	0.2377304	34
1.072981 E-02	0.172509	36
- 7.753846E-02	5.482129E-02	38
- 0.1320253	- 7.733876E-02	40
- 0.1357191	- 0.1823137	42
- 9.087204E-02	- 0.227893	44
- 1.684653E-02	- 0.2011711	46
5.797448E-02	- 0.1121456	48
0.1069179	9.929084E-03	50
0.1143893	0.1261279	52
8.064271E-02	0.2002466	54
2.057737E-02	0.210062	56
- 4.259105E-02	0.1539643	58
- 8.617248E-02	5.099204E-02	60
- 9.603852E-02	- 6.558884E-02	62
- 0.0710466	- 0.1590127	64
- 2.253501E-02	- 0.2005897	66
3.058729E-02	- 0.1784947	68
0.0690983	- 0.1010827	70
8.032398E-02	5.183043E-03	72

6.218658E-02	0.1090802	74
2.320014E-02	0.1755302	76
- 2.130238E-02	0.1855804	78
- 5.510191E-02	0.137368	80
- 6.692608E-02	4.729233E-02	82
- 5.411138E-02	- 5.552795E-02	84
- 2.294662E-02	- 0.13865	86
0.0141932	- 0.1765264	88
4.367607E-02	- 0.1583401	90
5.555133E-02	- 9.105056E-02	92
4.683066E-02	3.18479E-03	94
2.206246E-02	9.428548E-02	96
- 8.815236E-03	0.1538332	98
- 3.438894E-02	0.1639227	100
- 4.593337E-02	0.1225215	102
- 4.032666E-02	4.374525E-02	104
- 2.076759E-02	- 4.692286E-02	106
4.806184E-03	0.1208593	108
2.687455E-02	0.1553225	110
3.783287E-02	0.140431	112
3.456297E-02	0.0819624	114
1.922699E-02	8.104085E-04	116
- 1.871993E-03	8.145098E-02	118
- 2.082371E-02	0.1347901	120
- 0.0310368	0.1447666	122
- 2.949155E-02	0.1092455	124
- 1.756339E-02	4.036748E-02	126

- 2.2459E-04	- 3.957077E-02	128
0.0159767	- 0.10532	130
2.535675E-02	- 0.1366413	132
0.0250577	- 0.1245214	134
1.586547E-02	- 7.373634E-02	136
1.674651E-03	- 1.04531E-03	138
- 0.0121156	7.032263E-02	140
- 2.062751E-02	0.1180796	142
- 2.120361E-02	0.1278265	144
- 1.419621E-02	9.737836E-02	146
- 2.630546E-03	3.716931E-02	148
9.058858E-03	- 3.329664E-02	150
1.670482E-02	- 9.175064E-02	152
1.787132E-02	- 0.1201857	154
1.259825E-02	- 0.110391	156
3.213638E-03	- 6.629723E-02	158
- 6.655233E-03	- 2.471977E-03	160
- 1.346366E-02	6.067758E-02	162
- 0.0150044	0.1034187	164
- 1.109923E-02	0.1128487	166
- 3.519735E-03	8.677477E-02	168
4.77971E-03	3.415614E-02	170
1.079603E-02	- 2.794913E-02	172
1.254932E-02	- 7.990448E-02	174
9.715131E-03	- 0.1056929	176
3.623854E-03	- 9.784381E-02	178
- 3.328931E-03	- 5.957526E-02	180

- 8.609284E-03	- 3.545058E-03	182
- 1.045616E-02	5.232195E-02	184
- 8.453645E-03	9.055882E-02	186
- 3.584376E-03	9.960833E-02	188
2.218134E-03	7.730301E-02	190
6.824141E-03	3.132954E-02	192
8.679073E-03	- 2.339751E-02	194
7.316238E-03	- 6.956551E-02	196
3.446365E-03	- 0.0929311	198
- 1.377794E-03	- 8.670504E-02	200

h_3	h_4	t
- 0.294	- 0.294	0
- 0.2746261	- 0.2889101	2
- 0.216247	- 0.2736418	4
- 0.1273505	- 0.2487361	6
- 2.073004E-02	- 0.215073	8
0.0883563	- 0.1738412	10
0.1843687	- 0.1264957	12
0.2536993	- 7.470636E-02	14
0.2866001	- 2.029922E-02	16
0.2785534	3.480793E-02	18
0.2308909	8.867318E-02	20
0.1505778	0.139399	22
4.919509E-02	0.1851989	24
- 5.872932E-02	0.2244604	26
- 0.1578024	0.255802	28

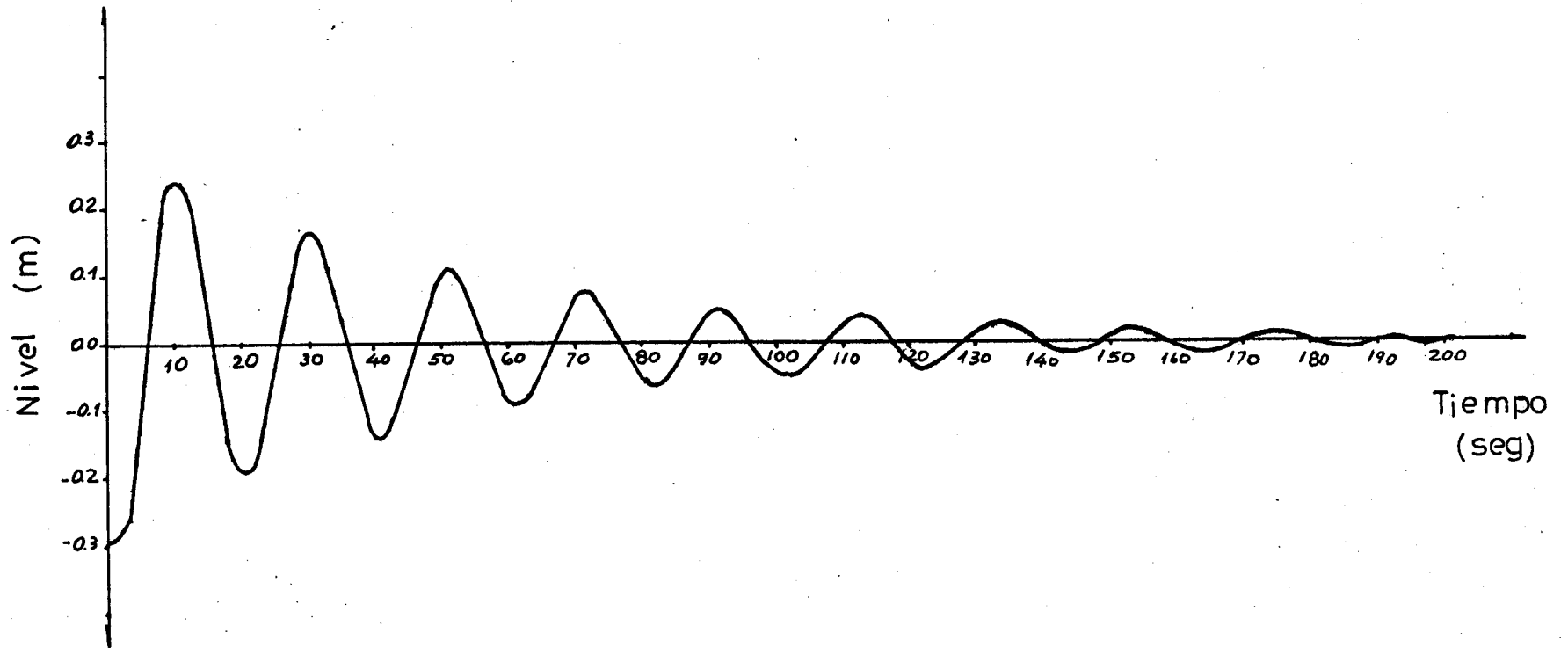
- 0.2339615	0.2781216	30
- 0.2764695	0.2906354	32
- 0.2794283	0.2929051	34
- 0.2425968	0.2848536	36
- 0.171399	0.2667675	38
- 7.612622E-02	0.239287	40
2.954974E-02	0.2033827	42
0.1305384	0.1603224	44
0.2124854	0.1116251	46
0.263812	5.900823E-02	48
0.2773513	4.327098E-03	50
0.2513476	- 5.049132E-02	52
0.1896827	- 0.1035152	54
0.101297	- 0.152877	56
- 1.106457E-03	- 0.1968382	58
- 0.1028865	- 0.2338516	60
- 0.1895575	- 0.2626148	62
- 0.2488506	- 0.2821167	64
- 0.2724496	- 0.2916727	66
- 0.2571578	- 0.290949	68
- 0.2053289	- 0.2799738	70
- 0.124507	- 0.2591368	72
- 2.632935E-02	- 0.2291748	74
7.514985E-02	- 0.1911464	76
0.1654697	- 0.1463934	78
0.2318238	- 9.649491E-02	80
0.2648758	- 4.321023E-02	82

0.2600719	1.158205E-02	84
0.2182684	6.595076E-02	86
0.1455846	0.1179805	88
5.250688E-02	0.1658388	90
- 4.762127E-02	0.2078402	92
- 0.1405154	0.2425065	94
- 0.212984	0.2686185	96
- 0.2548045	0.2852583	98
- 0.2601632	0.2918424	100
- 0.228463	0.2881415	102
- 0.1643849	0.2742889	104
- 7.719832E-02	0.2507757	106
2.058131E-02	0.2184329	108
0.1149859	0.1784028	110
0.1925926	0.1320975	112
0.2424308	8.115103E-02	114
0.2575319	2.735943E-02	116
0.2359043	- 2.738118E-02	118
0.180794	- 8.114183E-02	120
0.1001979	- 0.1320282	122
5.705611E-03	- 0.1782483	124
- 8.916893E-02	- 0.2181751	126
- 0.1709189	- 0.250403	128
- 0.2279663	- 0.273799	130
- 0.2523029	- 0.2875411	132
- 0.2406133	- 0.2911479	134
- 0.1947251	- 0.284495	136

- 0.1213266	- 0.2678198	138
- 3.099075E-02	- 0.2417125	140
6.334525E-02	- 0.2070958	142
0.1482352	- 0.1651918	144
0.2116372	- 0.117479	146
0.2446241	- 6.563996E-02	148
0.2426384	- 1.150283E-02	150
0.2061221	4.302444E-02	152
0.1404299	9.602074E-02	154
5.504665E-02	0.1456187	156
- 3.778454E-02	0.1900718	158
- 0.1248143	0.2278153	160
- 0.1936807	0.2575213	162
- 0.2346635	0.2781451	164
- 0.242055	0.2889626	166
- 0.2149561	0.2895955	168
- 0.1573814	0.2800243	170
- 7.766498E-02	0.260589	172
1.274362E-02	0.2319775	174
0.1009277	0.1952001	176
0.1743433	0.1515552	178
0.2226069	0.102582	180
0.2389623	0.0500084	182
0.221227	- 4.312489E-03	184
0.1720803	- 5.846621E-02	186
9.866128E-02	- 0.1105447	188
1.153257E-02	- 0.1587136	190

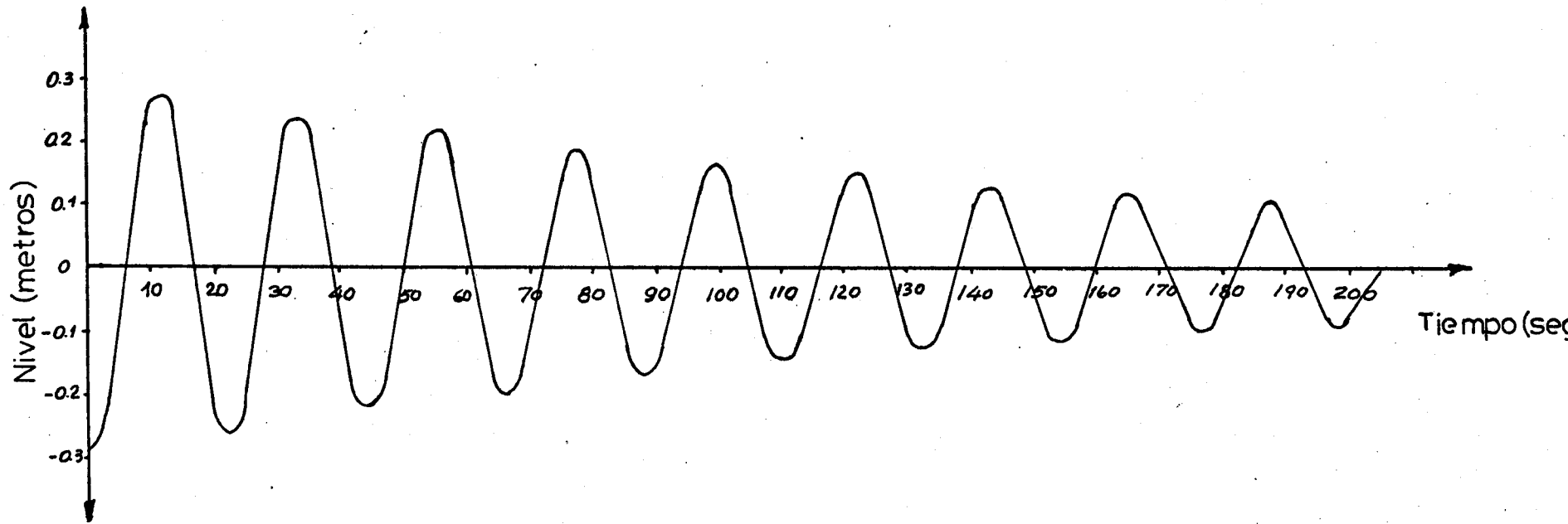
- 7.684223E-02	- 0.2012771	192
- 0.1538764	- 0.2367363	194
- 0.208655	- 0.2638441	196
- 0.2334827	- 0.2816478	198
- 0.2249608	- 0.2895226	200





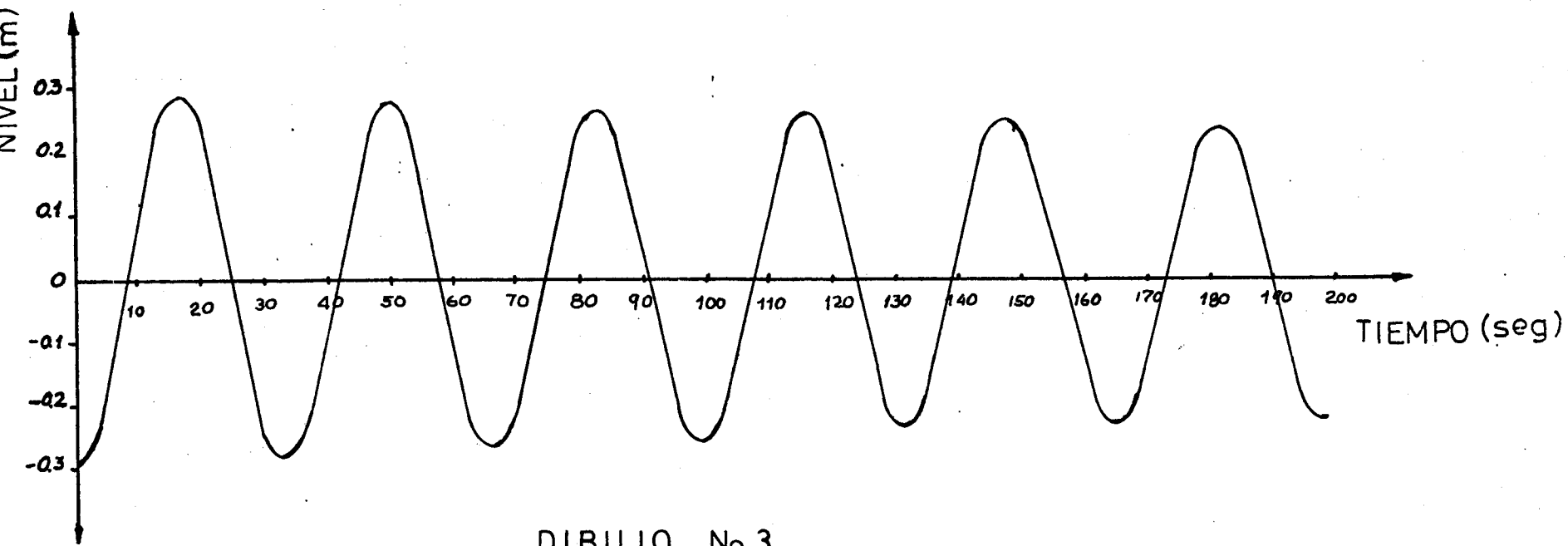
DIBUJO No1

Onda amortiguada de la ecuacion modelo h_1



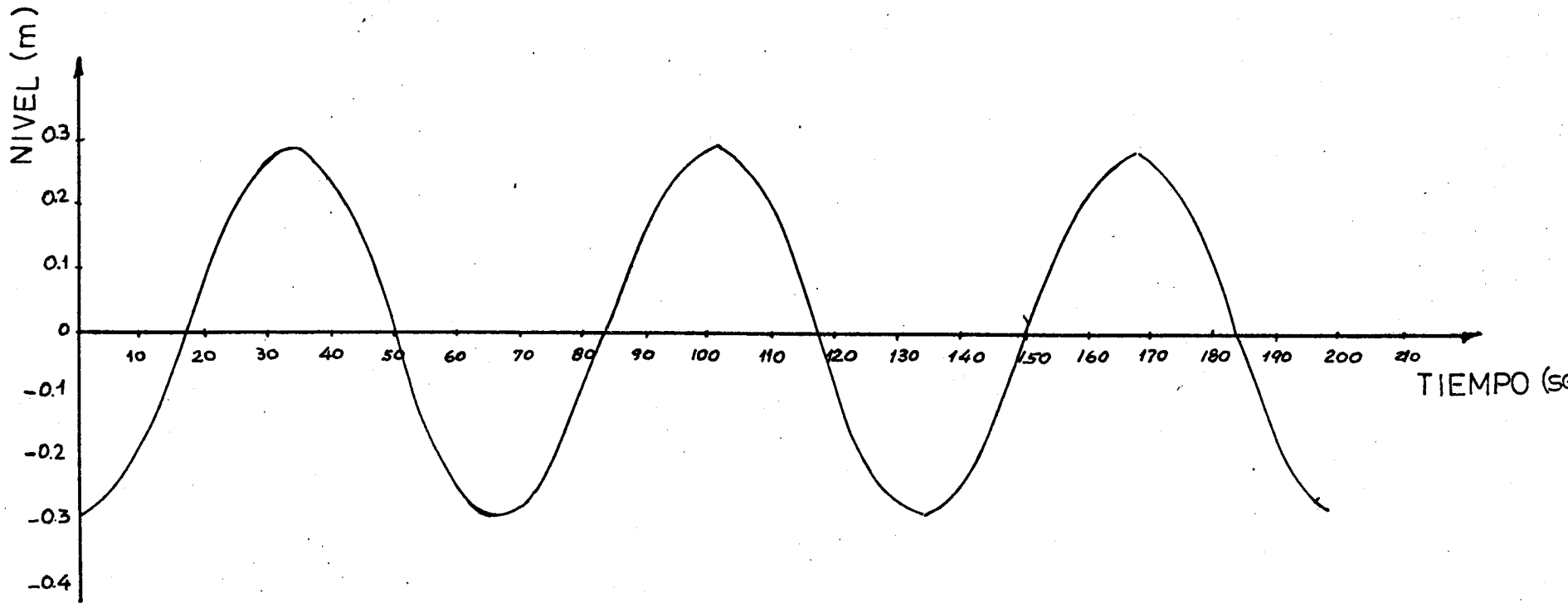
DIBUJO N° 2

Oscilación de onda de la ecuación modelo h_2



DIBUJO No 3

Oscilacion de onda de la ecuación modelo h_3



DIBUJO N. 4

Oscilaciones de onda de la ecuación modelo h_4

BIBLIOTECA



APENDICE C

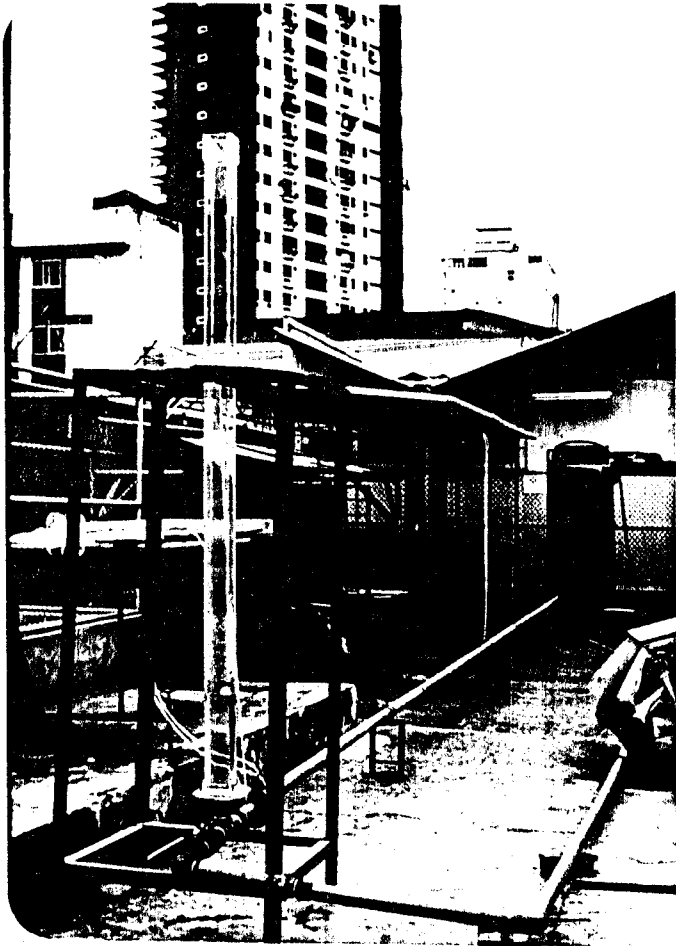


Foto N.º1 Equipo de experimentación

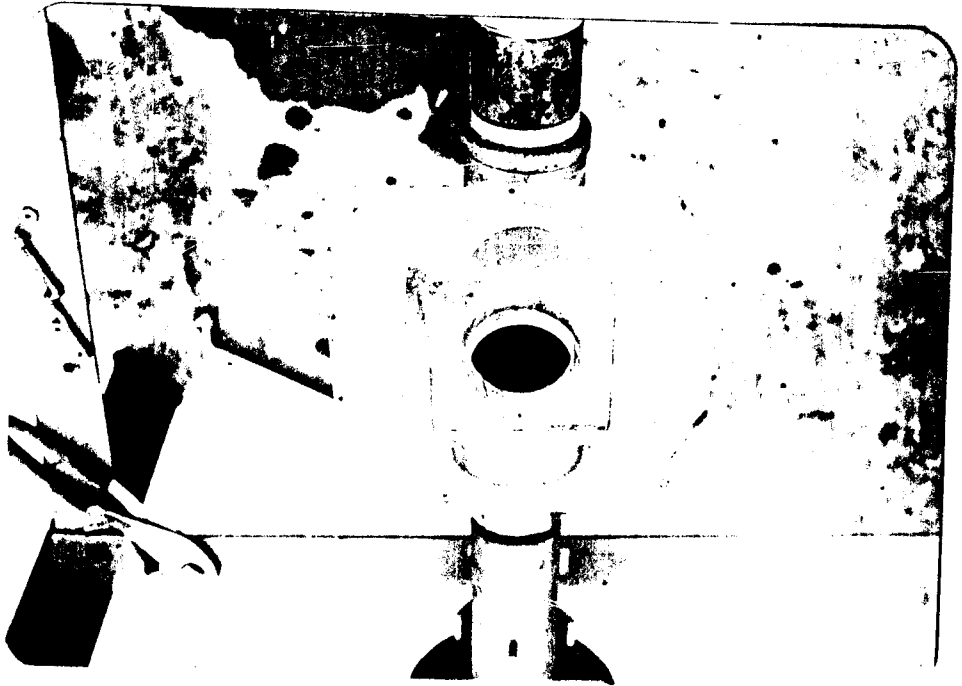


Foto N.º 2 Base de la chimenea

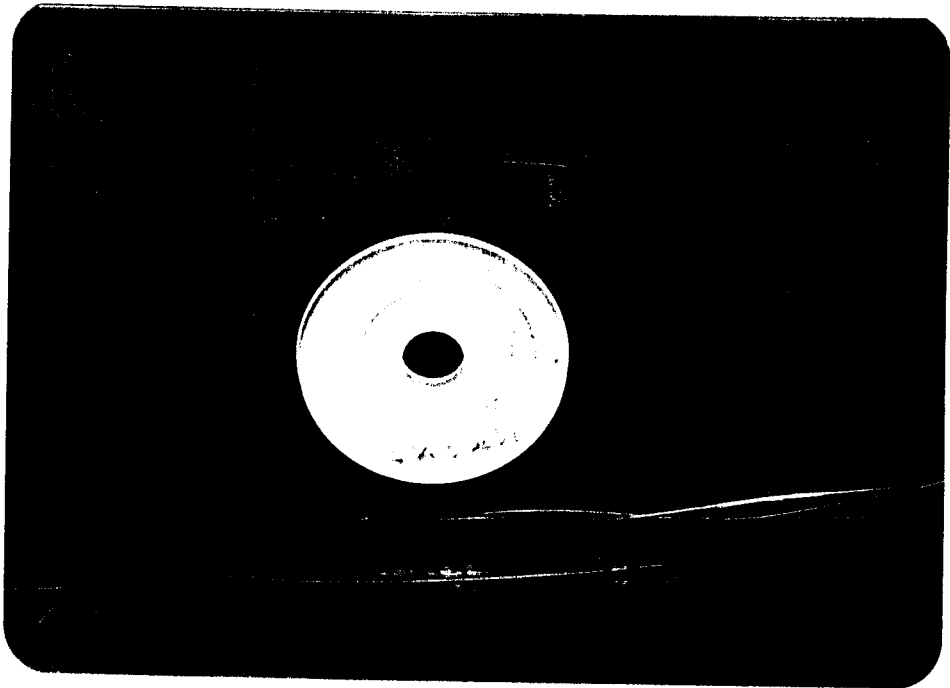


Foto N.º 3 Placa con orificio

TABLAS DE RESULTADOS



BIBLIOTEC

TABLA 1

H = 1.498 mts.
 h = 0.620 mts.
 h = 0.888 mts.
 0 = 50 mm.

NIVEL														
ARRIBA (g)		1.96	1.78	1.735	1.71	1.69	1.67	1.66	1.65	1.638	1.63	1.626	1.62	1.618
TIEMPO (seg)		7	20	35	50	64	80	96	113	128	144	163	178	193
NIVEL														
ABAJO (m)	-0.620	-1.300	-1.450	-1.510	-1.555	-1.570	-1.590	-1.592	-1.595	-1.600	-1.605	-1.610	-1.614	-1.616
TIEMPO (seg)	0	15	25	42	57	72	87	105	119	136	156	171	186	203

Condicion final = 1.618 mts.

GRAFICO TABLA I

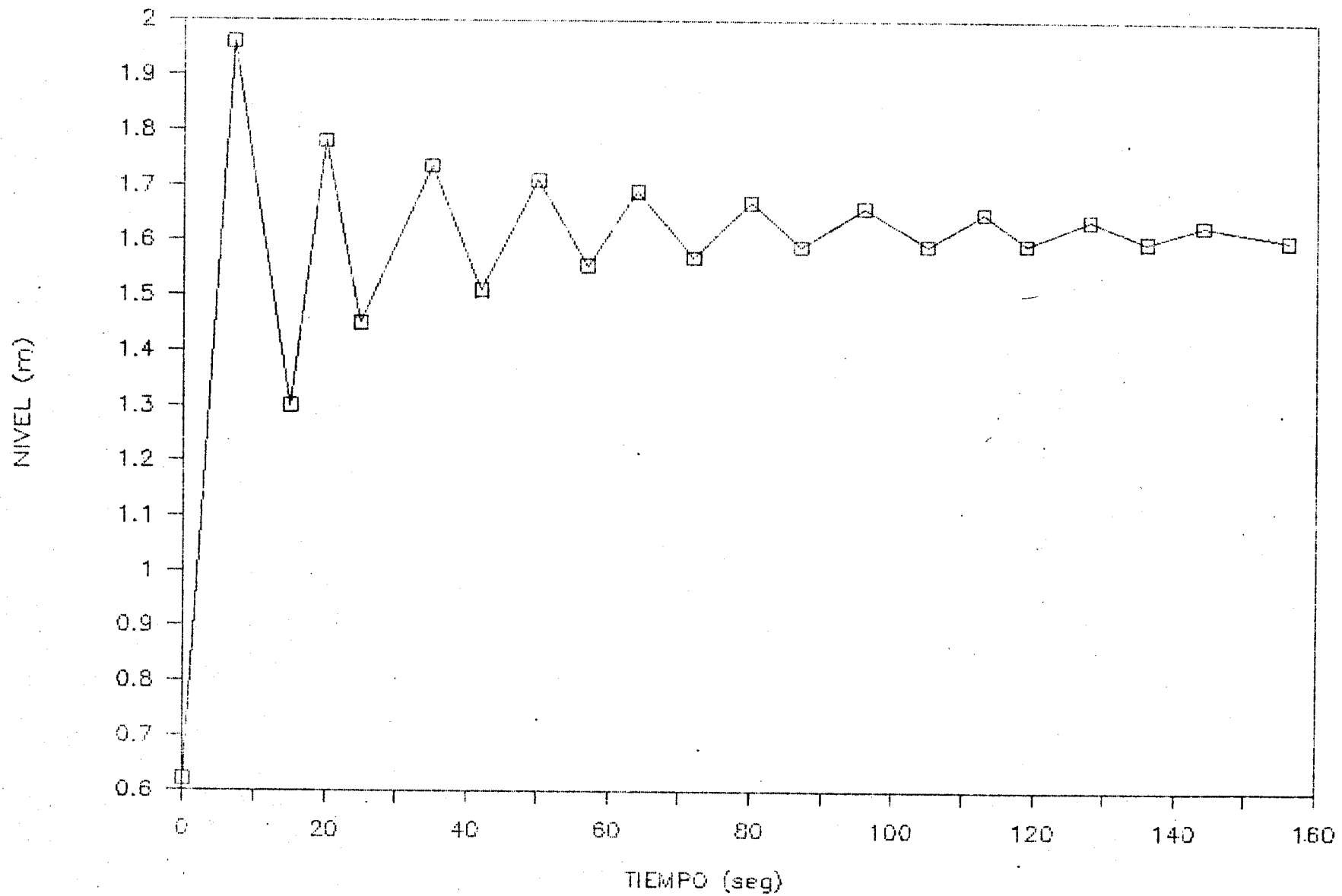


TABLA 2

100% abierto
 H = 1.480 mts.
 h = 0.590 mts.
 Ø = 50 mm.

NIVEL														
ARRIBA		1.92	1.69	1.63	1.6	1.575	1.56	1.55	1.54	1.53	1.525	1.522	1.52	1.515
(m)														
TIEMPO														
(seg)		8	21	36	53	68	84	100	117	128	145	160	176	193
NIVEL														
ABAJO	0.59	1.22	1.39	1.405	1.435	1.45	1.47	1.475	1.48	1.49	1.492	1.5	1.505	1.51
(m)														
TIEMPO														
(seg)	0	13	29	45	61	75	91	109	121	138	152	168	183	210

Cabezal condicion final H = 1.513 mts.
 Perdidas h = 0.890 mts.
 velocidad = 1.424 m/seg.

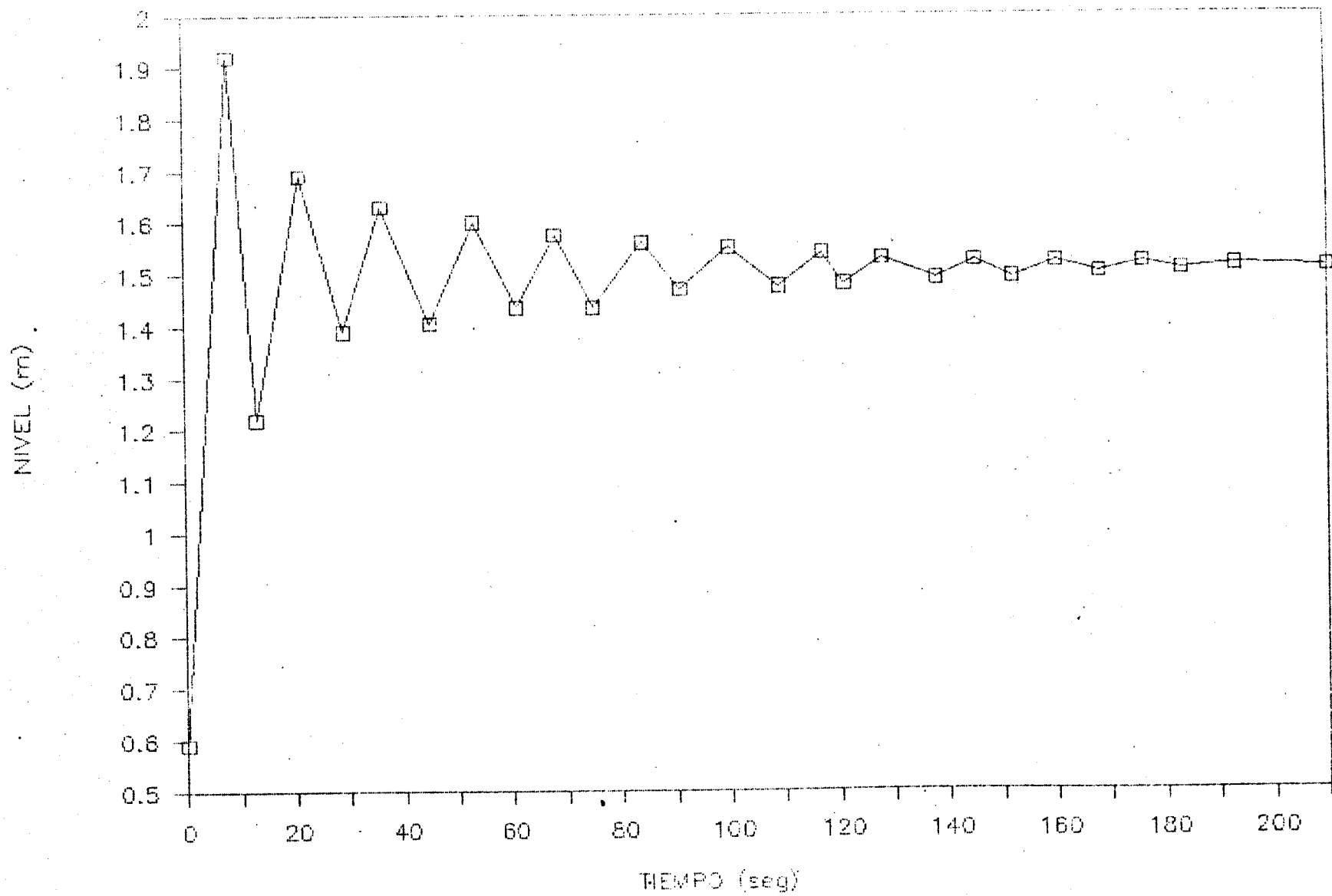


TABLA 3

H = 1.445 mts.
 h = 0.560 mts.
 Perdidas = 0.885
 Ø = 50 mm.

NIVEL ARRIBA (m)	1.855	1.65	1.61	1.585	1.57	1.55	1.542	1.535	1.53	1.525	1.52	1.518	1.515	1.512
TIEMPO (seg)	6	21	37	52	68	83	98	114	130	146	161	178	193	208
NIVEL ABAJO (m)	0.56	1.17	1.336	1.39	1.43	1.45	1.465	1.475	1.485	1.49	1.498	1.5	1.505	1.508
TIEMPO (seg)	0	13	30	44	60	75	90	107	122	137	153	168	185	200

Condicion final = 1.510 mts.
 5 cms. porque queda 1 bomba trabajando.

NIVEL (m)

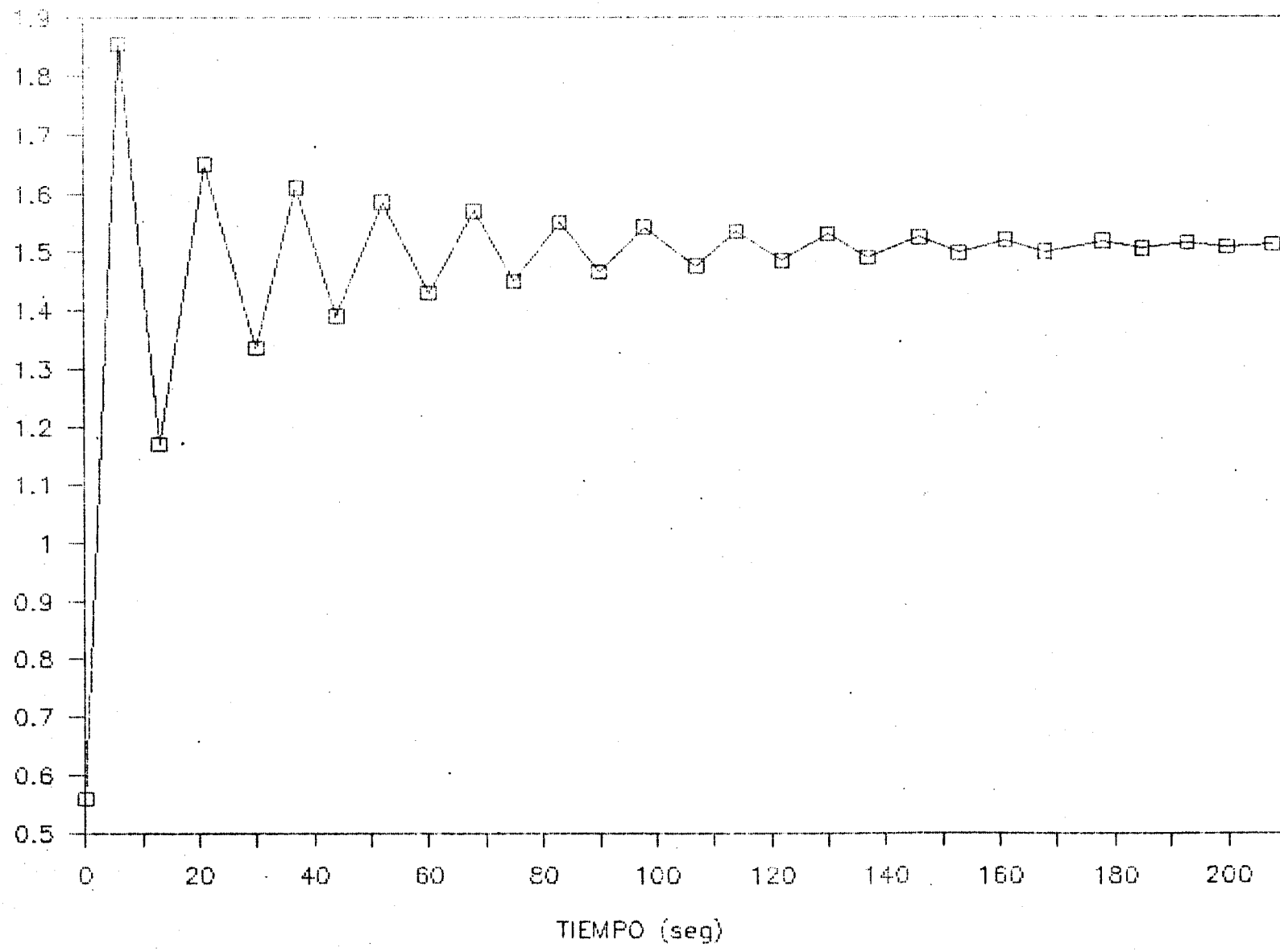


TABLA 4

H = 1.155 mts.
 h = 0.383 mts.
 Perdidas = 0.772
 O = 50 mm.

NIVEL															
ARRIBA (m)	1.47	1.28	1.235	1.21	1.19	1.18	1.17	1.16	1.155	1.152	1.15	1.148	1.145	1.14	1.135
TIEMPO (seg)	5	20	35	52	67	83	99	114	130	145	161	177	193	211	227
NIVEL															
ABAJO (m)	0.383	0.95	0.98	1.02	1.05	1.08	1.08	1.105	1.11	1.115	1.118	1.12	1.124	1.128	1.132
TIEMPO (seg)	0	13	27	43	60	75	90	106	122	137	155	168	185	202	219

Condicion final = 1.134 mts.

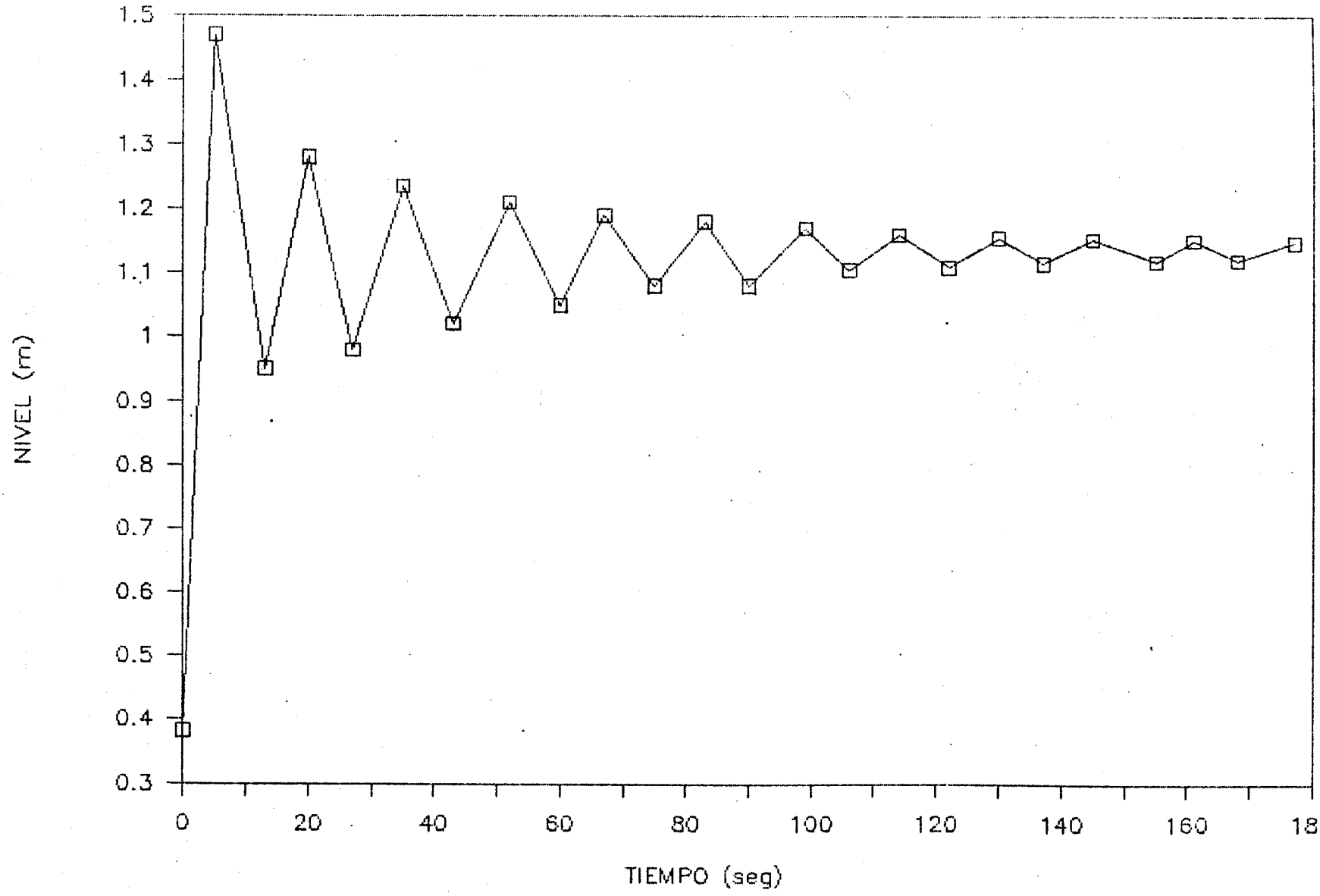


TABLA 5

CON ABERTURA DE LA VALVULA EN UN 100 %.
 CON UN ORIFICIO DE $\phi = 2 \text{ " } = 50 \text{ mm}$ Y CON UN TIEMPO PARA 15
 OSCILACIONES.

CABEZAL H (m)	CABEZAL EN CHINE- NEA (h) (m)	PERDIDAS (H-h) (m)	PITOT h (m)	V (m/seg) $V=C \sqrt{2g h}$ C = 0.825	$\phi \times 10$ m /seg	TIEMPO t (seg)
1.590	0.658	0.932	0.211	1.678	3.730	228
1.575	0.650	0.925	0.208	1.667	3.706	226
1.550	0.638	0.912	0.203	1.646	3.659	227
1.530	0.615	0.915	0.200	1.634	3.632	226
1.520	0.610	0.910	0.200	1.634	3.632	225
1.465	0.580	0.885	0.196	1.626	3.614	225
1.410	0.552	0.858	0.189	1.588	3.529	224
1.395	0.544	0.851	0.186	1.576	3.502	228
1.320	0.504	0.816	0.182	1.558	3.465	227
1.300	0.500	0.800	0.178	1.541	3.425	226
1.285	0.490	0.795	0.178	1.541	3.425	226
1.275	0.475	0.800	0.172	1.516	3.369	226
1.230	0.450	0.780	0.170	1.506	3.347	225
1.210	0.430	0.780	0.167	1.493	3.318	225
1.110	0.330	0.780	0.167	1.000	3.000	224

TABLA 6

CON ABERTURA DE LA VALVULA EN UN 100 %.
 CON UN ORIFICIO DE $\phi = 2 \text{ " } = 50 \text{ mm}$ Y CON UN TIEMPO PARA 15
 OSCILACIONES.

CABEZAL H (m)	CABEZAL EN CHIME- NEA (h) (m)	PERDIDAS (H-h) (m)	PITOT h (m)	V (m/seg) $V = C \sqrt{2g h}$ $C = 0.825$	$Q \times 10$ m /seg	TIEMPO t (seg)
1.575	0.640	0.935	0.208	1.677	3.706	225
1.567	0.637	0.932	0.208	1.667	3.705	225
1.450	0.575	0.875	0.194	1.609	3.577	226
1.285	0.490	0.795	0.176	1.533	3.407	224

TABLA 7

$h = 0.460$ mts.

$\phi = 37.5$ mm.

NIVEL														
ARRIBA (m)	1.580	1.450	1.375	1.360	1.348	1.335	1.330	1.325	1.318	1.315	1.312	1.310	1.308	1.306
TIEMPO (seg)	6	21	36	52	67	83	99	115	138	148	163	177	193	209
NIVEL														
ABAJO (m)	0.460	1.055	1.155	1.215	1.250	1.270	1.280	1.285	1.290	1.294	1.298	1.299	1.301	1.302
TIEMPO (seg)	0	14	29	44	60	75	91	107	124	139	155	170	185	201

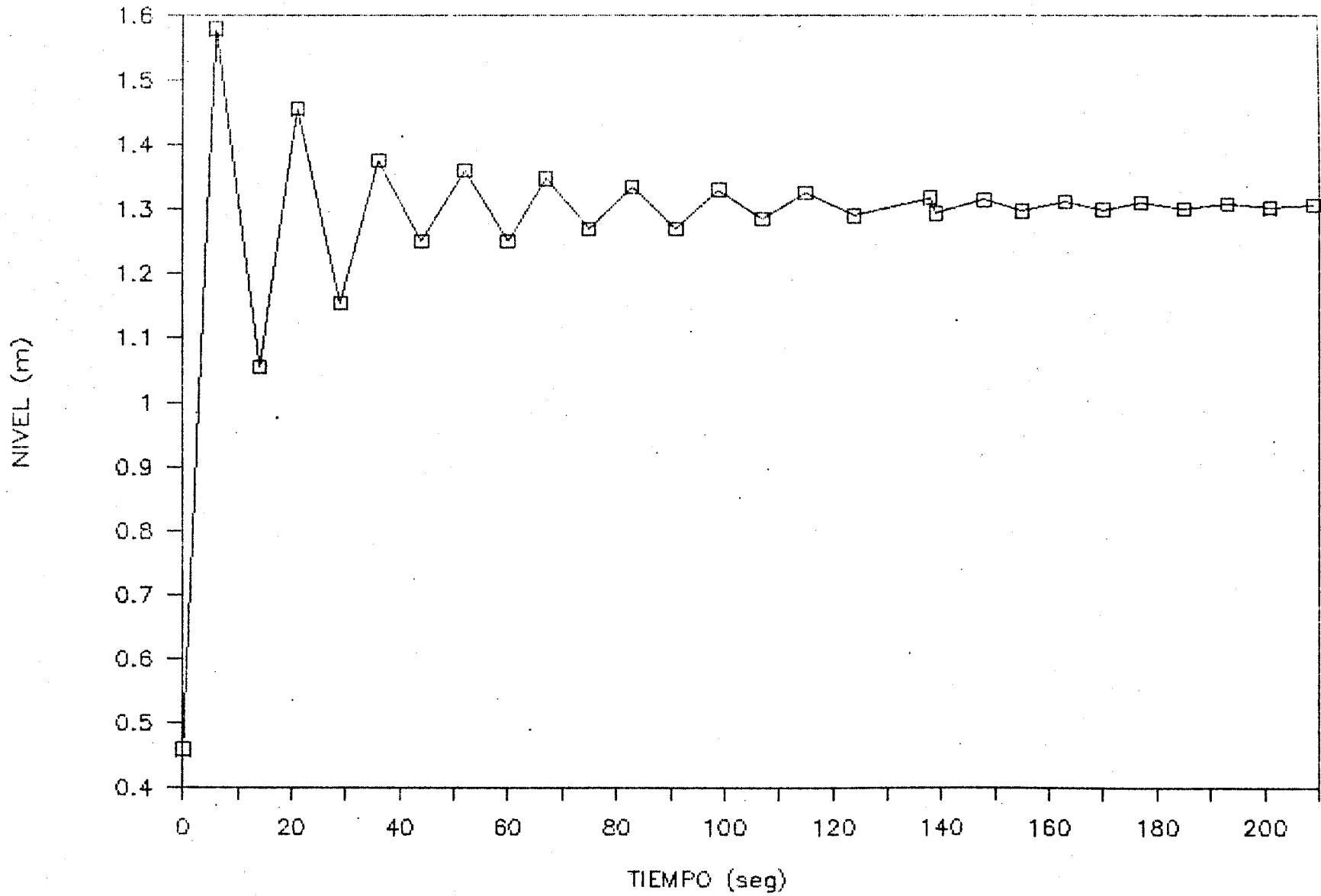


TABLA 6

H = 1.530 mts.

h = 0.615 mts.

h = 0.923

0 = 37.5 mm.

NIVEL															
ARRIBA	1.870	1.760	1.680	1.680	1.660	1.645	1.643	1.640	1.635	1.632	1.630	1.629	1.628	1.627	1.625
(m)															
TIEMPO															
(seg)	7	22	37	53	69	84	100	118	132	146	163	179	194	208	224
NIVEL															
ABAJO	0.615	1.350	1.465	1.510	1.552	1.580	1.590	1.595	1.600	1.610	1.615	1.618	1.620	1.621	1.62
(m)															
TIEMPO															
(seg)	0	14	30	45	60	77	92	108	126	138	154	170	187	200	216

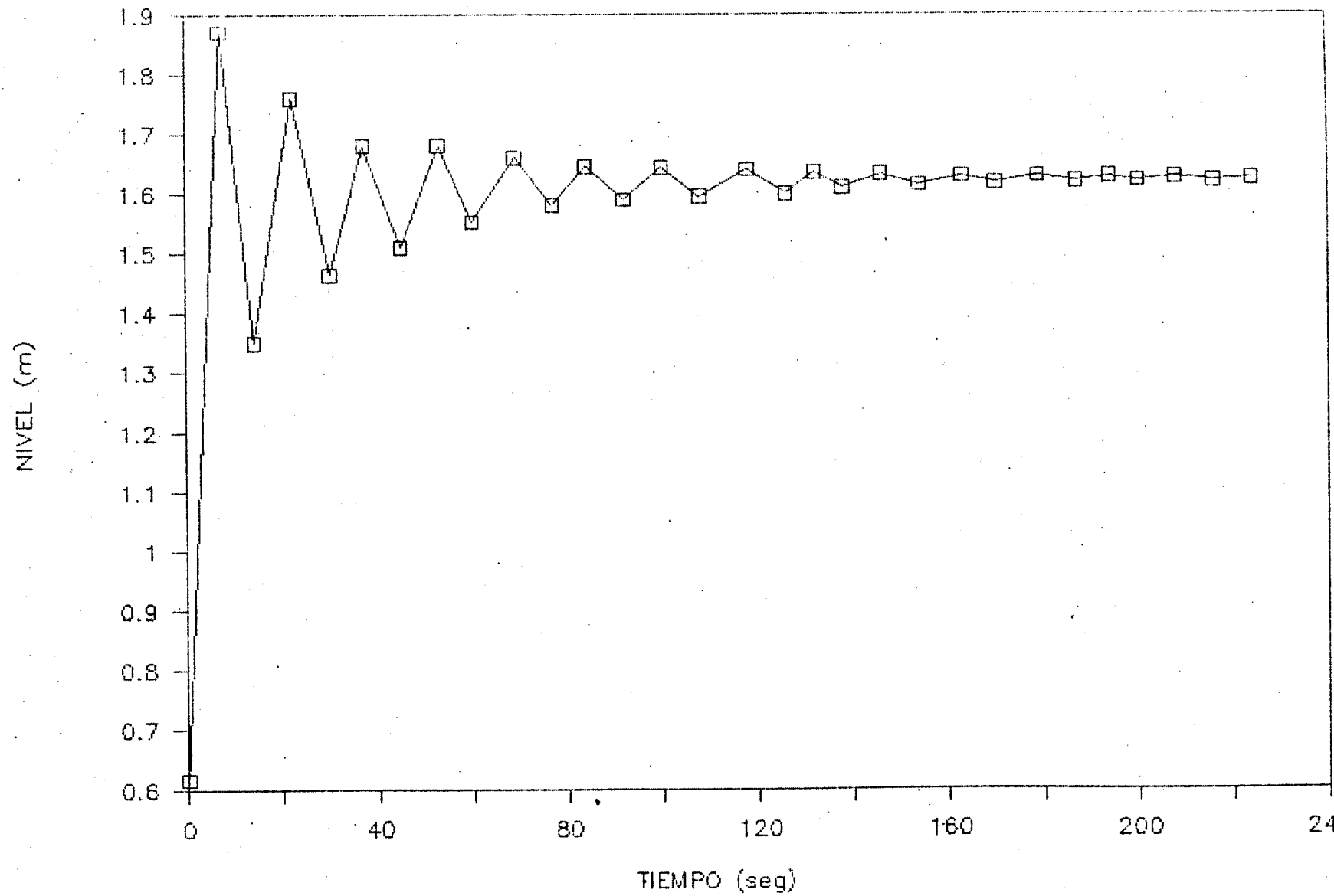


TABLA 9

H = 1.350 mts.

h = 0.510 mts.

p = 18.2 mm.

0 = 37.5 mm.

NIVEL															
ARRIBA	1.670	1.505	1.465	1.455	1.440	1.430	1.422	1.418	1.414	1.412	1.410	1.408	1.405	1.404	1.402
(m)															
TIEMPO															
(seg)	6	20	36	52	68	84	99	114	128	139	150	162	178	193	208
NIVEL															
ABAJO	0.510	1.155	1.275	1.320	1.350	1.370	1.375	1.381	1.385	1.388	1.390	1.392	1.393	1.395	1.396
(m)															
TIEMPO															
(seg)	0	14	29	44	60	76	91	107	122	133	144	155	170	185	200

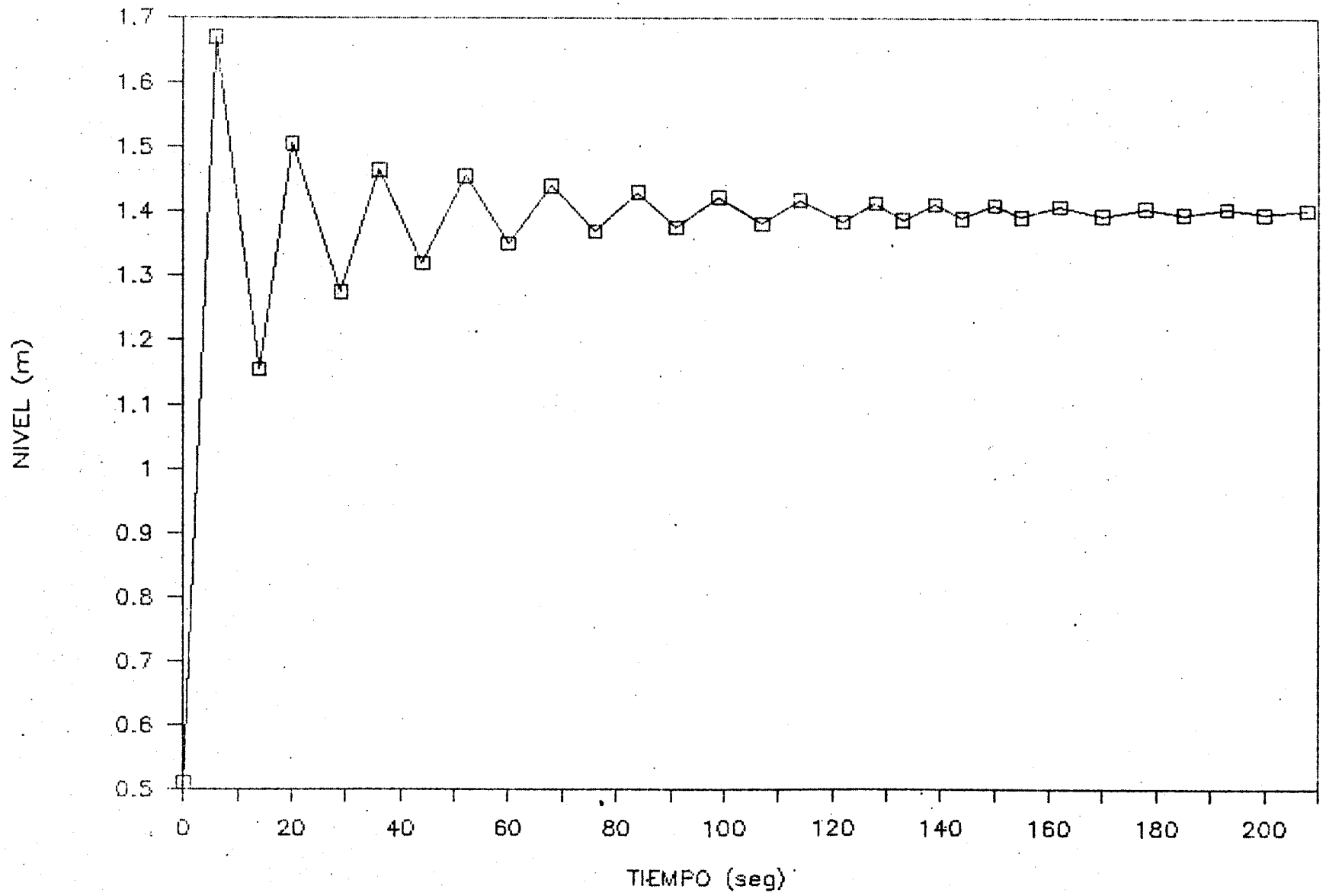


TABLA 10

H = 1.445 mts.

h = 0.550 mts.

h = 0.895

0 = 25 mm.

NIVEL						
ARRIBA	1.505	1.475	1.470	1.460	1.458	1.455
(m)						
TIEMPO						
(seg)	10	28	40	54	70	88
NIVEL						
ABAJO	0.550	1.350	1.380	1.405	1.425	1.430
(m)						
TIEMPO						
(seg)	0	20	35	47	61	78

OSCILACIONES CON ORIFICIO RESTRINGIDO

TABLA 11

H =

h = 0.580 mts.

h =

0 = 12.5 mm

NIVEL					
ARRIBA	1.565	1.568	1.569	1.570	1.571
(m)					
TIEMPO					
(seg)	35	45	55	67	75
NIVEL					
ABAJO	0.580	1.560	1.563	1.566	1.569
(m)					
TIEMPO					
(seg)	0	40	50	62	90

H = 1.550

OSCILACIONES CON ORIFICIO RESTRINGIDO

GRAFICO TABLA 10

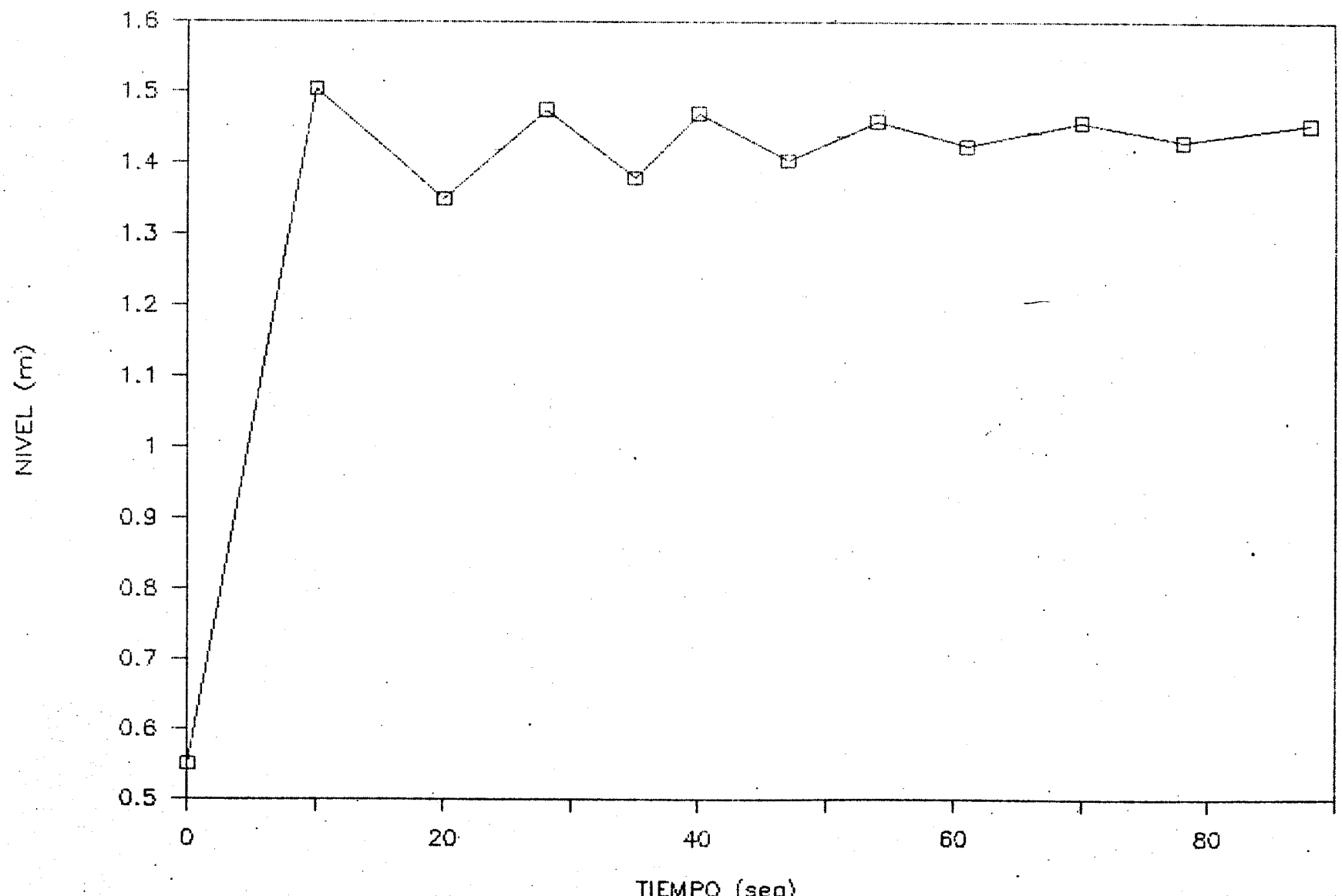


GRAFICO TABLA II

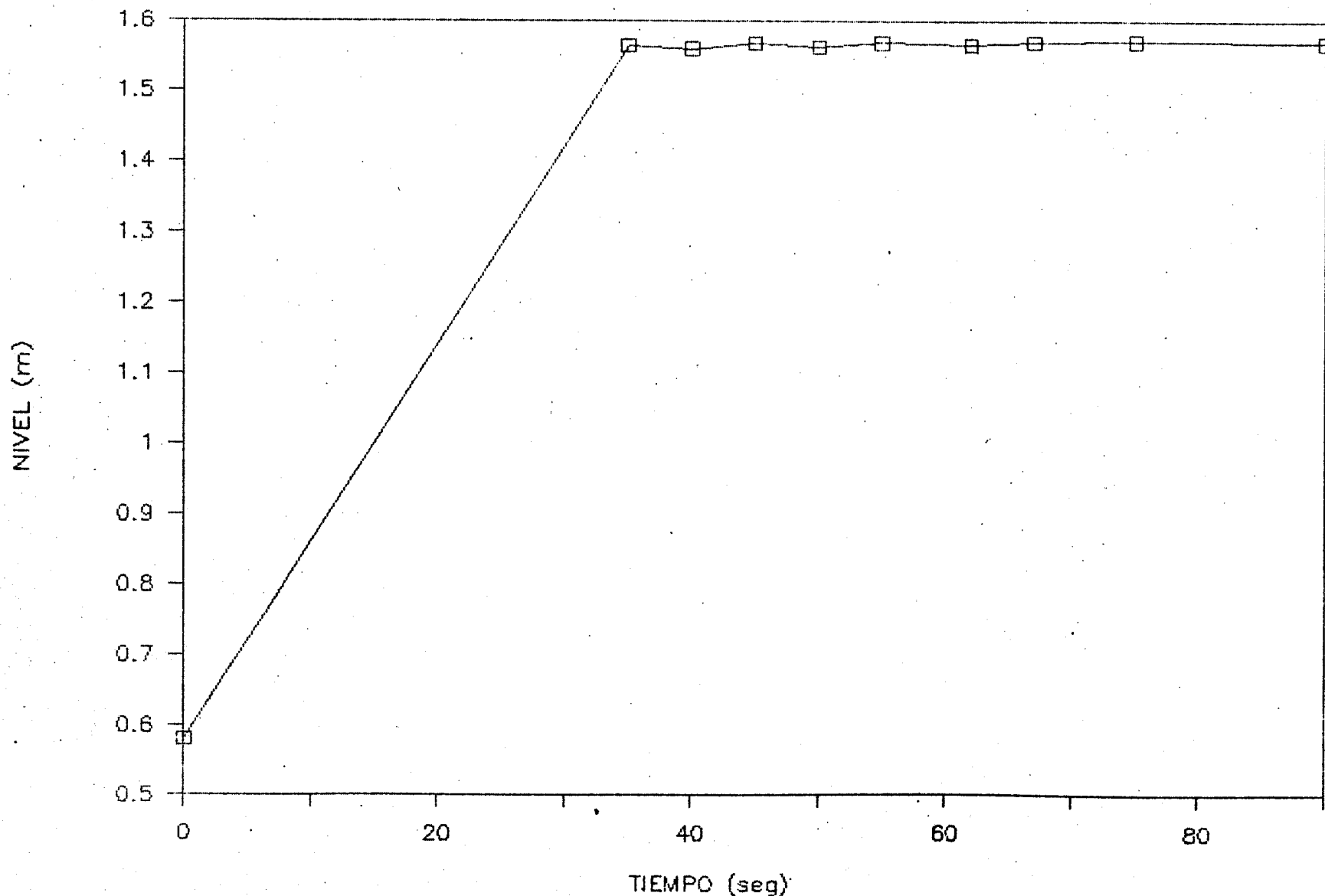


TABLA 12

CON ABERTURA DE LA VALVULA EN UN 100 %.
 CON UN ORIFICIO DE $\phi = 37.5$ mm Y CON UN TIEMPO PARA 10
 OSCILACIONES.

CABEZAL H (m)	CABEZAL EN CHIME- LINEA (h)	PERDIDAS (H-h) (m)	PITOT h	V (m/seg) $V=C \sqrt{2g h}$ $C = 0.925$	Q x 10 ³ (m ³ /seg)	TIEMPO t (seg)
1.556	0.625	0.931	0.205	1.655	3.678	145
1.538	0.615	0.923	0.203	1.646	3.660	146
1.522	0.607	0.915	0.202	1.642	3.650	146
1.452	0.575	0.877	0.195	1.613	3.587	147
1.350	0.520	0.850	0.182	1.559	3.465	143
1.300	0.460	0.840	0.178	1.541	3.427	148

BIBLIOGRAFIA

- 1.- PARNAKIAN, WATER HAMMER ANALISIS, Dover Publications, inc., New York, 1963, 123 p.
- 2.- WYLIE/STREETER, FLUID TRANSIENTS, McGraw Hill, New York, 1978, 183 p.
- 3.- DAUGHERTY-FRANZINI, FLUID MECHANICS with Engineering Applications, McGraw Hill, New York, 1977, 416 p.
- 4.- FOX and DONALD, INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS, John Willey and Sons, Inc., USA, 1973, 351 p.
- 5.- STREETER, MECANICA DE LOS FLUIDOS, McGraw Hill, México, 1971, 617 p.
- 6.- MATAIX, MECANICA DE LOS FLUIDOS Y MAQUINAS HIDRAULICAS, Harper and Row Publisher's Inc., Madrid, 1970, 297 p.
- 7.- SINGER, RESISTENCIA DE MATERIALES, Harper and Row Latinoamericana, México, DF, 36 p.
- 8.- SANTOS POTES, CENTRALES ELECTRICAS.
- 9.- ZOPPELTI, CENTRALES HIDROELECTRICAS, Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona, 84, 106 p.
- 10.-C.R. WYLLIE, MATEMATICAS SUPERIORES PARA INGENIERIA, 3^{ra} edición, McGraw Hill, Madrid, 1969, 61p.
- 11.-SPINKS, PRINCIPLES AND FUNDAMENTALS OF FLUID MEASUREMENT, Foxboro, USA, 1970, 84p.