881217

UNIVERSIDAD ANAHUAC

ESCUELA DE INGENIERIA
INCORPORADA A LA U.N.A.M.

1

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN ACUMULADOR HIDRAULICO Y SU ADAPTACION A UN GENERADOR DE GOLPE DE ARIETE PARA EXPERIMENTACION

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

AREA MECANICA

Presenta

JUAN MANUEL AVILA GONZALEZ - ARAGON

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

México, D. F. [redacted]

2002

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A MIS PADRES

A mis Hermanos

A mis Abuelos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A mis Maestros y Compañeros

A mis Amigos

A todas aquellas personas
que me han ayudado
en mi formación profesional

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La Sabiduría y la Instrucción
son un gran don de Dios
que debemos agradecerle.

(Eclesiástico 51)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

C O N T E N I D O

I. INTRODUCCION

II. BASES TEORICAS

III. ACUMULADORES HIDRAULICOS

IV. CALCULO DE UN ACUMULADOR Y SU ADAPTACION A UN GENERADOR DE GOLPE DE ARIETE

V. CONSTRUCCION Y ADAPTACION DE UN ACUMULADOR

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

APENDICE A

APENDICE B

BIBLIOGRAFIA

INDICE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I. INTRODUCCION

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1. INTRODUCCION.

Dentro de la Mecánica de los Fluidos, así como en otras ramas de la Ingeniería, existen fenómenos relevantes, algunos por su utilidad o beneficio y otros por el daño que puedan -- causar.

El Golpe de Ariete es uno de estos fenómenos y su estu-- dio tiene una singular importancia por el peligroso efecto -- que produce cuando se presenta en sistemas hidráulicos.

El hombre, ha estudiado las causas y consecuencias de di cho fenómeno, y en su afán por encontrar una solución a su -- problema, ha desarrollado un dispositivo conocido como Acumu- lador Hidráulico que reduce el efecto de este fenómeno.

En este trabajo, se presenta un estudio detallado del fe nómeno de Golpe de Ariete así como de los Acumuladores Hidráu licos y de la relación que existe entre ellos; haciendo espe- cial enfásis en el Acumulador Hidráulico de Vasija Elástica.

Como se vió a lo largo de la carrera, los estudios teóri cos necesitan de la realización de pruebas prácticas comple-- mentarias, para una mayor comprensión de los fenómenos a estu diar.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Por esta razón, los objetivos de esta tesis se refieren al Diseño y Construcción de un Acumulador Hidráulico de Vasija Elástica y su adaptación al Generador de Golpe de Ariete para experimentación en el laboratorio de Mecánica de los Fluidos.

Con esto, además de complementar el estudio del fenómeno de Golpe de Ariete e incrementar el equipo y las pruebas prácticas a realizarse en el laboratorio, se muestra una de las aplicaciones prácticas que tienen los Acumuladores Hidráulicos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II. BASES TEORICAS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.1 DEFINICION DEL PROBLEMA

2.1.1 EL GOLPE DE ARIETE.

Toda modificación que se hace a un flujo de régimen establecido en un conducto, (por ejemplo, por maniobras de compuerta, arranque, frenado o cambio de la velocidad de una bomba o turbina), implica variaciones de la presión y de la velocidad con respecto al tiempo, así como a lo largo del conducto. Al cerrarse rápidamente una válvula en la tubería durante el escurrimiento, el flujo a través de la válvula se reduce, lo cual incrementa la carga del lado aguas arriba de la válvula, iniciándose así un pulso de alta presión que se propaga en la dirección contraria a la del escurrimiento. Este pulso de presión hace que la velocidad del flujo disminuya. La presión en el lado aguas abajo de la válvula se reduce y la onda de presión disminuida viaja en el sentido del escurrimiento, disminuyendo también la velocidad del flujo. Si el cierre de la válvula es suficientemente rápido y si la presión permanente original es suficientemente baja, se puede formar una bolsa de vapor aguas abajo de la válvula, produciéndose el fenómeno de cavitación cuando esto ocurre, la cavidad de vapor puede eventualmente reducirse en forma violenta y producir una onda de alta presión que se propaga en la dirección aguas abajo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Antes de deducir las ecuaciones que describen este fenómeno del golpe de ariete, se dará una relación de la secuencia de eventos que se presentan al cerrarse bruscamente una válvula al final de la tubería proveniente de un vaso de almacenamiento como se muestra en la Figura 1.

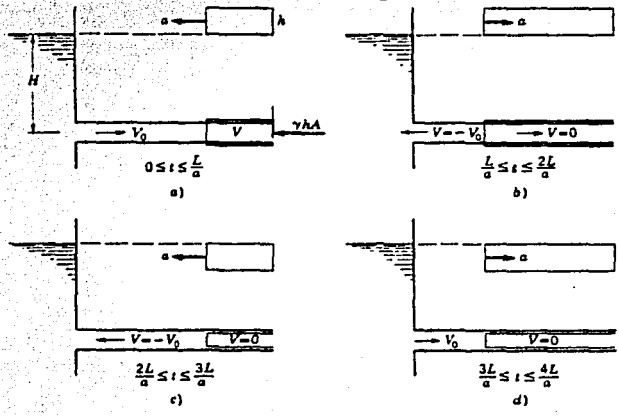


FIGURA 1

En donde a es la velocidad de propagación de la onda, L es la longitud de la tubería, t es el tiempo de cerrado de la válvula y V es la velocidad del fluído.

En este caso, se despreciará la fricción. En el instante en que se cierra la válvula (t=0), el líquido más cercano a ella se comprime al mismo tiempo que su movimiento se reduce a cero; en estas condiciones, las paredes del conducto sufren una expansión como se muestra en la Figura 1. Tan pron-

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

to como se comprime la primera capa del líquido, el proceso - se repite con la siguiente capa. El líquido en las partes -- más alejadas aguas arriba de la válvula continúa moviéndose - sin que se vea afectada su velocidad hasta que es alcanzado - por el efecto de compresión del líquido que continúa llegan-- do. La alta presión que se desarrolla se mueve en dirección aguas arriba como una onda, frenando al fluido hasta lograr - su reposo, comprimiéndolo y dilatando las paredes de la tubería. Cuando la onda alcanza el extremo aguas arriba de la tubería (t=L/a), todo el líquido se encuentra bajo una carga adicional H: toda la cantidad de movimiento se ha perdido y toda la energía cinética se ha convertido en energía elástica.

En estas condiciones y dado que la presión en el vaso de almacenamiento no ha cambiado, se tiene un desbalance en el - extremo aguas arriba de la tubería en el momento en que llega la onda de presión. El fluido contenido en la tubería expandida comienza a escurrir con velocidad en sentido contrario, es decir, de la válvula hacia el vaso, comenzando en el ex-- tremo aguas arriba del conducto. La presión en el fluido -- vuelve a tener el valor que tenía antes del cierre de la válvula, la pared del tubo recupera sus dimensiones originales y el líquido adquiere una velocidad Vo en sentido contrario al original, ahora va de la válvula hacia el vaso. Este proceso de conversión viaja hacia el extremo donde se encuentra -

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

la válvula a la velocidad del sonido en la tubería. En el -- instante 2L/a, la onda ha llegado hasta la válvula y la pre-- sión en toda la tubería ha regresado a su valor normal, sien- do la velocidad del líquido en todo el conducto igual a Vo y en dirección hacia el vaso de almacenamiento.

Como la válvula se encuentra cerrada, no se dispone de - líquido que mantenga el escurrimiento a través de ella y, por tanto, se desarrolla una presión negativa (-H) tal que el flu ido se frena otra vez hasta alcanzar el reposo. Esta onda de presión se propaga en dirección aguas arriba a una velocidad a, haciendo que el fluido sucesivamente se frene y logre un - estado de reposo al mismo tiempo que se expande debido a la - baja presión, ocasionando que las paredes del fluido se con-- traigan.

En el instante en que la onda de presión negativa llega al extremo superior de la tubería, es decir, 3L/a seg., des-- pués del cierre de la válvula, el líquido se encuentra en re- poso pero uniformemente a una carga menor, en -H, que la que se tenía antes del cierre. En estas condiciones, se tiene - una vez más un desbalance en el vaso de almacenamiento, lo - cual ocasiona que el fluido comience a moverse desde el vaso hacia la tubería, adquiriendo una velocidad Vo en dirección a la válvula y haciendo que tanto la tubería como el líquido re

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

tornen progresivamente a las condiciones normales conforme la onda viaja hacia la válvula con velocidad a.

En el momento en que la onda llega a la válvula, las condiciones en todo el sistema son exactamente las mismas que se tenían en el instante del cierre de la válvula, ocurrido 4L/a seg., antes.

El proceso descrito anteriormente se repite cada 4L/a -- seg., y los efectos de la fricción en el fluido y la elasticidad imperfecta tanto en el fluido como en las paredes de la - tubería, despreciadas en la consideración anterior, ocasionan que las oscilaciones se amortigüen y que el fluido alcance finalmente el estado de reposo permanente. Si el cierre de la válvula se lleva a cabo en un tiempo menor a 2L/a seg., se -- llama cierre rápido, mientras que si se efectua en un tiempo mayor que 2L/a, se llama cierre lento.

Este fenómeno recibe el nombre de golpe de ariete. Las propiedades elásticas del agua y del material de que está -- construido el conducto, juegan un papel muy importante tanto en la producción como en la evolución del golpe de ariete. -- Las sobre o subpresiones provocadas pueden ser muy perjudiciales al conducto, a las válvulas, a los accesorios y a las bombas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Llegan a ser tan grandes estos cambios de presión, que resulta difícil que un conducto, válvulas y accesorios normales los resistan sin dañarse seriamente. Los cambios de presión provocados por el arranque o paro de una bomba también producen efectos de golpe de ariete dañando a la bomba y a sus instalaciones respectivas.

Una manera de limitar los efectos del golpe de ariete consiste en instalar en cualquier sección del conducto, un dispositivo que sea altamente deformable, tal como: tanque de oscilación, acumulador hidráulico, etc., los que reflejan más o menos completamente las ondas de choque y de esta manera protegen a la parte del conducto situada aguas abajo de ellos.

De esta manera el agua es sometida a una oscilación en masa, alrededor de una nueva posición de equilibrio, correspondiente al nuevo régimen del escurrimiento. Para el estudio de oscilaciones en masa, se pueden despreciar las propiedades elásticas del agua y del conducto, en comparación con la deformabilidad del dispositivo especial.

Las oscilaciones en masa provienen del golpe de ariete que constituyen el fenómeno primario; sin embargo, en vez de conducir a un fenómeno más uniforme, por defasamiento de es-

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

tos dos fenómenos, se superponen.

Las oscilaciones en masa son movimientos rígidos del líquido en el conducto.

Las variaciones en el régimen generan ondas de golpe de ariete pero con rapidez extrema, estas ondas se transforman en movimientos en masa, si es posible que un sistema deformable permita tal movimiento.

La parte del conducto situada más alla del sistema deformable, respecto a la fuente de perturbación del régimen se encuentra protegida de las variaciones considerables de presión que engendrarían las ondas del golpe de ariete. Analogamente en la parte situada entre la fuente de perturbación y el sistema deformable, las presiones disminuyen considerablemente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2 ECUACIONES BASICAS

2.2.1 TEORIA DE LA COLUMNA DE AGUA RIGIDA.

Cuando un conducto esta lleno de agua en movimiento las leyes que controlan los cambios de presión y descarga depende solamente de las condiciones bajo las cuales el flujo tiene lugar. Si el agua es considerada como incompresible y su velocidad en cualquier parte del conducto permanece constante se puede aplicar la ecuación de energía de Bernoulli, en cualesquiera dos secciones del conducto como se muestra en la Figura 2. Sin embargo cuando el movimiento es inestable esto es cuando la descarga de cada sección varia rapidamente de un instante a otro y se presentan rápidos cambios de presión, la ecuación de Bernoulli no es aplicable. Estos cambios de presión son referidos como Golpe de Ariete por el golpeteo que se escucha cuando ocurre este fenómeno.

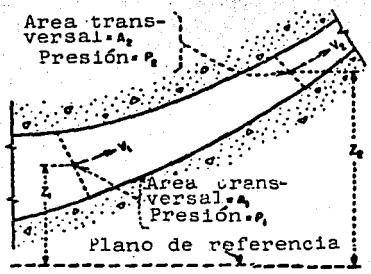


FIGURA 2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para obtener las leyes básicas del golpe de ariete, el efecto de cambios rápidos en el flujo, son primero considerados para un conducto de área y longitud uniforme como se muestra en la Figura 3. El conducto es conectado a un depósito en su extremo superior y tiene una válvula de control en su extremo inferior para controlar la descarga del agua a la atmósfera.

Para obtener las ecuaciones iniciales debemos asumir lo siguiente:

a) El agua en el conducto es incompresible.
b) Las paredes del conducto no van a dilatarse sea cual fuere la presión dentro de la tubería.
c) La tubería se mantiene llena de agua todo el tiempo y la mínima presión es mayor que la presión de vapor del agua (no hay vaporización).
d) Las pérdidas en tuberías y la presión dinámica son despreciables comparadas con los cambios de presión.
e) La velocidad del agua en la dirección del eje de la tubería es uniforme a lo largo de la sección del conducto.
f) La presión es uniforme en cualquier sección transversal del conducto y es igual a la presión en el centro del conducto.
g) El nivel del depósito se mantiene constante durante el tiempo de movimiento de la válvula.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

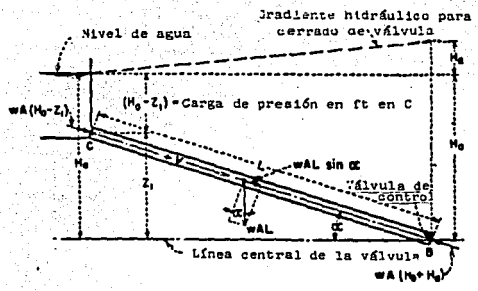


FIGURA 3

Si el flujo de la válvula de control es alterado, una -- fuerza externa de desbalanceo actuará en la válvula contra la masa de la columna de agua. La magnitud de la fuerza puede - ser determinada usando la segunda ley de Newton. La des-aceleración o coeficiente al cual la velocidad disminuye por unidad de tiempo es $-dv/dt$, en donde V es medida positivamente - en la dirección del flujo. La masa del agua des-acelerada en todo lo largo de la tubería es wAL/g, en donde w es el peso - específico del fluido. Si Ha designa la carga en des-aceleración en la válvula, la fuerza desbalanceada actuando en la columna de agua es:

$wA[(Ho + Ha) - (Ho - Z_1) - L \operatorname{sen}\alpha]$

pero si $L \operatorname{sen}\alpha = Z_1$ tenemos que la fuerza de desbalanceo es - $wA\ Ha$, así de la segunda ley de Newton tenemos que:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$Ha = -\frac{L}{g}\frac{dv}{dt} \qquad (1)$$

Anterior al movimiento de cerrado de la válvula la descarga a la atmosfera es:

$$Qo = AVo = (Cd\ Ag)o\ \sqrt{2g\ Ho}$$

ó

$$Vo = Bo\ \sqrt{Ho}$$

en donde

$$Bo = \frac{(Cd\ Ag)o\ \sqrt{2g}}{A}$$

En cualquier instante del movimiento de la válvula

$$V = B\ \sqrt{Ho + Ha}$$

y

$$\frac{V}{Vo} = \frac{B}{Bo}\sqrt{1 + \frac{Ha}{Ho}}$$

Si el coeficiente B/Bo es designado por r

$$V = rVo\ \sqrt{1 + \frac{Ha}{Ho}} \qquad (2)$$

en donde r es una función del tiempo que define el coeficiente de la apertura efectiva de la válvula en cualquier momento durante el cerrado de la válvula a la apertura efectiva en el tiempo cero.

Las ecuaciones 1 y 2 son las ecuaciones básicas del golpe de ariete cuando se cierra la válvula, de acuerdo a la teoría de la columna de agua rígida.

Para un cerrado uniforme parcial o completo de una válvu

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

la:

$$r = 1 - \frac{V't}{VoT} \quad (0 \leq t \leq T)$$

en donde T es el tiempo de movimiento de la válvula y V' es - la diferencia entre la velocidad estable inicial y la velocidad estable final. Así tenemos que:

$$V = (Vo - \frac{V't}{T})\sqrt{1 + \frac{Ha}{Ho}} \qquad (3)$$

Resolviendo 1 y 3 para obtener (Ha) max., haciendo ----- dHa/dt = 0 obtenemos la máxima carga en la válvula.

$$\frac{(Ha)max.}{Ho} = \frac{\kappa_1}{2} + \sqrt{\kappa_1 + \frac{\kappa_1^2}{4}} \qquad (4)$$

en donde

$$\kappa_1 = (\frac{LV'}{gHot})^2$$

de un modo similar se determina (Ha^1) max., la máxima caida - de carga en la válvula debida a la abertura uniforme, resulta en la ecuación:

$$\frac{(Ha')max.}{Ho} = \frac{\kappa_1}{2} - \sqrt{\kappa_1 + \frac{\kappa_1^2}{4}} \qquad (5)$$

En la Figura 4 podemos ver las soluciones de las ecuaciones 4 y 5.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

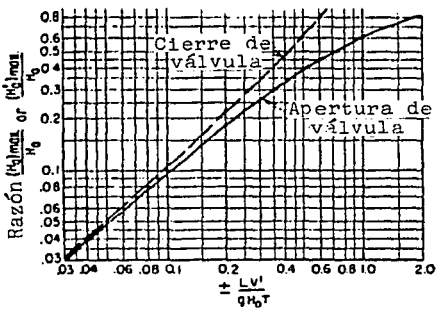


FIGURA 4. El Golpe de Ariete para un movimiento uniforme de la válvula.

Longitudes equivalentes en las tuberías pueden ser tomadas si consideramos una tubería con un cambio de diametro como se muestra en la Figura 5. Si los efectos de pérdidas hidráulicas y presión dinámica son despreciables, las fuerzas que actuan en el final de las dos columnas de agua son las que corresponden a la Figura 5. Las siguientes relaciones para el equilibrio dinámico de las dos columnas son los siguientes:

$$wA_1 \ (Ha_1 - Ha_2) = - \frac{w}{g} A_1 L_1 \frac{dV_1}{dt}$$

$$wA_2 \ Ha_2 = - \frac{w}{g} A_2 L_2 \frac{dV_2}{dt}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

en donde V_1 y V_2 son las velocidades del agua en las tuberías L_1 y L_2 . De la condición de continuidad $A_1 V_1 = A_2 V_2$ tenemos que la solución de esta ecuación para Ha es

$$Ha_1 = -\frac{A_1}{g}\left(\frac{L_1}{A_1} + \frac{L_2}{A_2}\right)\frac{dv_1}{dt}$$

De aqui, una tubería con un cambio de diametro es reemplazada para los propósitos del golpe de ariete por una equivalente de área A_1 y longitud L en donde:

$$L = L_1 + \frac{L_2 A_1}{A_2}$$

Podemos considerar varios cambios en el diametro y longitud hasta L_n y A_n y reemplazarlas por

$$L = L_1 + \frac{L_2 A_1}{A_2} + \frac{L_3 A_1}{A_3} + \ldots + \frac{L_n A_1}{A_n} \qquad (6)$$

de teoría de la columna rígida está limitada a la rigidez de las paredes de tubería y a la incomprensibilidad del agua.

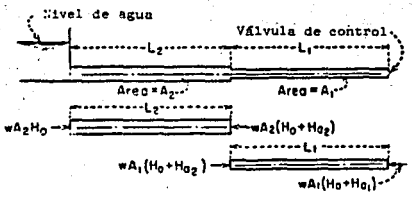


FIGURA 5

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2.2 TEORIA DE LA COLUMNA ELASTICA DE AGUA.

Fundamentalmente las ecuaciones de golpe de ariete son ahora derivadas para un caso más general de flujo variable. Las mismas consideraciones usadas anteriormente son aplicables con la excepción que la elasticidad de las paredes del conducto y la compresibilidad del agua son tomadas en cuenta. Se considerará un elemento de agua que es limitado por dos caras paralelas normales al eje de la tubería. La condición de equilibrio dinámico requiere que la fuerza desbalanceada que actua en el elemento de agua tiene que ser igual al producto de los elementos de masa y aceleración, es decir que satisfaga la segunda ley de Newton. La condición de continuidad para el elemento requiere que el espacio disponible entre las fronteras tiene que estar ocupado con agua todo el tiempo. Las ecuaciones que resultan de las condiciones de equilibrio dinámico y continuidad son resueltas simultaneamente para obtener las ecuaciones fundamentales del golpe de ariete.

La condición de equilibrio dinámico para un elemento de agua dx_1 en longitud, se establece como sigue, con ayuda de la Figura 6.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

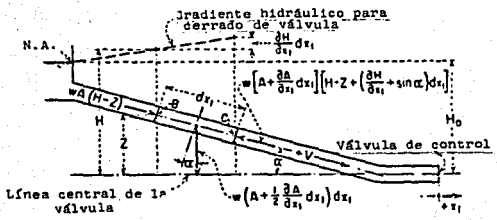


FIGURA 6

Pasando de la frontera B a la C el área de la sección -- transversal aumenta a razón de $\partial A/\partial x_1$. Si el área B está definida por A el área C es entonces $A + \partial A/\partial x_1 dx_1$. La intensidad de presión y todas las fuerzas que actuan en B y C son determinadas de una forma similar y se muestran en la siguiente tabulación:

	Cara B	Cara C
Area	A	$A + \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1$
Presión	$w(H-Z)$	$w[H-Z + \frac{\partial H}{\partial x_1} + \text{sen}\alpha)dx_1]$
Fuerza	$wA(H-Z)$	$w(A + \frac{\partial A}{\partial x_1}dx_1)\ [H-Z + (\frac{\partial h}{\partial x_1} + \text{sen}\alpha)\ dx_1]$

En el centro de gravedad del elemento, la fuerza de gravedad que actua hacia abajo en la masa del elemento es:

$w(A + \frac{1}{2} \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1)\ dx_1$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La fuerza desbalanceada de des-aceleración que actua a lo largo del eje de la tubería es:

$$w\ (A + \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1)\ [H-Z + (\frac{\partial H}{\partial x_1} + \operatorname{sen}\alpha)\ dx_1]$$

$$-w\ A\ (H-Z) - w\ (A + \tfrac{1}{2} \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1)\ dx_1 \operatorname{sen}\alpha$$

donde la dirección positiva de la fuerza es tomada opuesta a la dirección normal del flujo. Después de despreciar términos y cancelar términos semejantes, la fuerza desbalanceada de des-aceleración es

$$w[A \frac{\partial H}{\partial x_1} + (H-Z) \frac{\partial A}{\partial x_1}]\ dx_1$$

como $w\ (H-Z) \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1$ es muy pequeño, podemos considerar que la fuerza que actua en el eje es

$$w\ A \frac{\partial H}{\partial x_1} dx_1$$

La masa del elemento de agua que debe ser movido es $w\ A\ dx_1/g$ y su des-aceleración es $-\ dV/dt$ ahora de la segunda ley de Newton

$$-\ w\ A \frac{\partial H}{\partial x_1} dx_1 = \frac{wA}{g} \cdot \frac{dV}{dt}\ dx_1$$

como V es función tanto de x_1 y t

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x_1} \frac{dx_1}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x_1}$$

entonces

$$\frac{dH}{dx_1} = \frac{1}{g} (\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x_1}) \qquad (7)$$

que es la ecuación de equilibrio para un elemento de agua.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una segunda ecuación que relaciona H y V se determina ahora de la ecuación de continuidad, en la Figura 7a se muestra un elemento de agua de longitud B C igual a dx_1 en cualquier tiempo. Para un instante de tiempo el coeficiente de cambio de velocidad entre las caras B y C de un elemento $\partial V/\partial x_1$ y las velocidades en B y C son V y $V + \partial V/\partial x_1\, dx_1$ respectivamente. En la Figura 7b en un intervalo muy corto de tiempo B C es movido a D F. Ya que V es una función de dos variables independientes x_1 y t las velocidades de las caras D y F son determinadas como se muestra en la Figura 7b. El cambio de longitud del elemento dx_1 en el movimiento de B C a D F es BD-CF. El promedio de velocidad de la cara B en movimiento a D en el intervalo de tiempo dt es:

$$V + \frac{1}{2}\frac{\partial V}{\partial x_1} BD + \frac{1}{2}\frac{\partial V}{\partial t} dt$$

y la distancia movida durante el intervalo de tiempo dt es -- BD.

Entonces

$$B\,D = (V + \frac{1}{2}\frac{\partial V}{\partial x_1} BD + \frac{1}{2}\frac{\partial V}{\partial t}\, dt)\, dt$$

y de la misma manera

$$CF = [V + \frac{\partial V}{\partial x_1} dx_1 + \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x_1}(V + \frac{\partial V}{\partial x_1} dx_1)\, CF + \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial t}\, (V + \frac{\partial V}{\partial x_1} dx_1)\, dt]d\, t.$$

después de anular términos de orden superior.

$$BD - CF = - \frac{\partial V}{\partial x_1} dx_1 dt \qquad (8)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

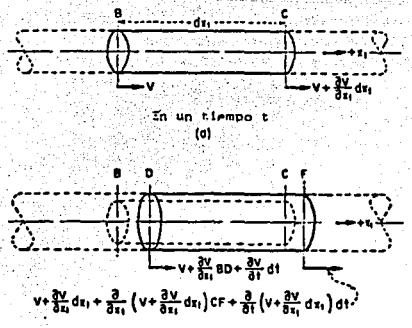


FIGURA 7

El cambio de longitud del elemento dx_1 trae como consecuencia dos factores principales. En el primer lugar, un cambio en la presión causa que la tubería se expanda o se contraiga. El cambio que resulta en la sección transversal del área produce un cambio en la longitud del elemento para contener el mismo volumen de agua dentro del elemento como una consecuencia de un adelanto en la longitud del elemento.

El cambio total en la longitud del elemento que es BD-CF es ahora calculada considerando la elasticidad de la tubería con la del agua. La deformación del elemento de la tubería producida por un cambio en las fuerzas longitudinal y circun-

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ferencial como se muestra en la Figura 8 es:

$$\Delta R = \frac{R + e/2}{E} (\Delta\sigma_2 - \mu\Delta\sigma_1)$$

$$\cong \frac{R}{E} (\Delta\sigma_2 - \mu\Delta\sigma_1)$$

y el cambio en la longitud axial del elemento es

$$\delta x_1 = \frac{dx_1}{E} (\Delta\sigma_1 - \mu\Delta\sigma_2)$$

en donde $\Delta\sigma_1$ y $\Delta\sigma_2$ representan el cambio en los esfuerzos longitudinal y circunferencial respectivamente producidos por un cambio de presión.

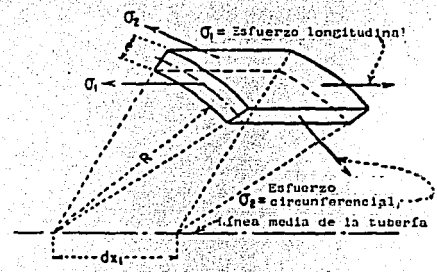


FIGURA 8

El volumen encerrado por el elemento sometido a esfuerzo es $\pi(R + \Delta R)^2 (\delta x + dx_1)$ y el cambio en la longitud original del elemento B C compatible con el cambio en el volumen es:

$$\frac{\pi(R + \Delta R)^2 (\delta x_1 + dx_1) - \pi R^2 dx_1}{\pi R^2}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Después de cancelar términos demasiado pequeños comparados con los otros, tenemos que el cambio en longitud es:

$$\delta x_1 + \frac{2\Delta R}{R} dx_1$$

El cambio en el esfuerzo longitudinal depende de la habilidad del conducto para moverse en la dirección longitudinal. Existen muchos casos típicos en los que el movimiento del conducto es reestringido para variar la extensión.

a) Para una tubería anclada en su lado superior sin juntas de expansión:

$$\Delta\sigma_1 = \frac{w\ D}{4\ e}\ H\ ;\ \Delta\sigma_2 = \frac{w\ D}{2\ e}\ H$$

b) Para un conducto que está anclado contra movimientos longitudinales:

$$\Delta\sigma_1 = \frac{\mu w\ D}{2\ e}\ H\ ;\ \Delta\sigma_2 = \frac{w\ D}{2\ e}\ H$$

c) Para una tubería que tiene juntas de expansión entre anclas a lo largo de la tubería:

$$\Delta\sigma_1 = 0\ ; \qquad \Delta\sigma_2 = \frac{w\ D}{2\ e}\ H$$

El cambio total en la longitud del elemento producido por un cambio de presión de $w\,d\,H$ en los tres casos anteriores es:

$$\delta x_1 + \frac{2\Delta R}{R} dx_1 = \frac{w\ D\,d\,H\ dx_1}{Ee}\ C_1$$

donde para a) $C_1 = 5/4 - \mu$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

b) $C_1 = 1 - \mu^2$

c) $C_1 = 1 - \frac{\mu}{2}$

El cambio de volumen del elemento original de agua en la longitud dx_1, debido a la elasticidad del agua sometida a un cambio de presión wdH es:

$$\frac{w \pi R^2}{\kappa} dH\, dx_1$$

y el correspondiente cambio en la longitud del elemento de agua es:

$$\frac{w\pi R^2}{\kappa\pi R^2} dH\, dx_1 = \frac{w}{\kappa} dH\, dx_1$$

El cambio total en la longitud del elemento de agua causado por el cambio de presión wdH cuando se considera la compresión del agua y la deformación del conducto se reduce a

$$w \left(\frac{1}{\kappa} + \frac{DC_1}{Ee} \right) dH\, dx_1$$

si H es función de x_1, t y $dx_1/dt = V$ entonces

$$dH = \frac{\partial H}{\partial t} dt + \frac{\partial H}{\partial x_1} dx_1 = \left(\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x_1} \right) dt$$

El cambio total en la longitud del elemento producido -- por un cambio de presión de la ecuación 8 es:

$$BD - CF = w \left(\frac{1}{\kappa} + \frac{DC_1}{Ee} \right) \left(\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x_1} \right) dx_1 dt$$

entonces

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$\frac{\partial v}{\partial x_1} = - w \left(\frac{1}{\kappa} + \frac{DC_1}{Ee}\right) \left(\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x_1}\right)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x_1} = - \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x_1} \qquad (9)$$

de donde

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{w}{g}\left(\frac{1}{\kappa} + \frac{DC_1}{Ee}\right)}} \qquad (10)$$

2.2.3 ECUACIONES FUNDAMENTALES DE GOLPE DE ARIETE.

Se supone que las ecuaciones 7 y 9 se resuelven simultaneamente y como vimos anteriormente que el término $V\ \partial V/\partial x_1$ de la ecuación 7 es muy pequeño comparado con $\partial V/\partial t$ y en la ecuación 9 el término $V\ \partial H/\partial x_1$ es muy pequeño comparado con $\partial H/\partial t$, entonces las ecuaciones 7 y 9 se reescriben de la siguiente manera:

$$\frac{\partial H}{\partial x_1} = - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \qquad (11)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = - \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x_1} \qquad (12)$$

La solución general para estas ecuaciones es:

$$H - Ho = f\left(t - \frac{x_1}{a}\right) + F\left(t + \frac{x_1}{a}\right) \qquad (13)$$

$$V - Vo = \frac{g}{a}\left[f\left(t - \frac{x_1}{a}\right) - F\left(t + \frac{x_1}{a}\right)\right] \qquad (14)$$

Por simplificación matemática se toma $-x = x_1$ de las ecuaciones 13 y 14.

$$H - Ho = F\left(t - \frac{x}{a}\right) + f\left(t + \frac{x}{a}\right) \qquad (15)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$V - Vo = -\frac{g}{a}\left[F\left(t - \frac{x}{a}\right) - f\left(t + \frac{x}{a}\right)\right] \qquad (16)$$

Estas son las ecuaciones fundamentales del golpe de ariete conocidas como las ecuaciones de Allievi.

2.2.4 VELOCIDAD DE LAS ONDAS DEL GOLPE DE ARIETE O CELERIDAD.

La velocidad de propagación de las ondas de presión en el conducto está definida por la ecuación 10.

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{w}{g}\left(\frac{1}{\kappa} + \frac{DC_1}{Ee}\right)}}$$

en donde los valores de C_1 dependen de la restricción del movimiento de la tubería como vimos anteriormente, entonces tenemos que:

a) $C_1 = \frac{5}{4} - \mu$

b) $C_1 = 1 - \mu^2$

c) $C_1 = 1 - \frac{\mu}{2}$

Siendo μ el número de Poisson de la tubería en consideración.

2.2.5 REFLEXION DE LAS ONDAS EN EL GOLPE DE ARIETE.

Cualquier movimiento en el control de la válvula situada en la parte baja de la tubería, como se muestra en la Figura 9, produce un cambio instantaneo de velocidad, provocando una onda de presión del tipo F cerca de la válvula. Esta onda se mueve hacia arriba en la dirección positiva de las x con una velocidad a.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

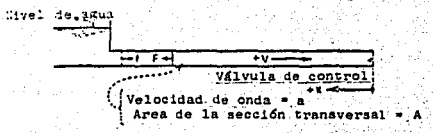


FIGURA 9

Cerca de alcanzar el depósito una onda de reflexión del tipo f se produce. Inicialmente, las relaciones entre $F(t - \frac{x}{a})$ y $f(t + \frac{x}{a})$ son desconocidas. Sin embargo, la carga de presión en el final de la tubería del depósito no se altera por presiones transitorias en la tubería.

Así de la ecuación 15 en $x = L$

$$H - Ho = 0 = F(t - \frac{L}{a}) + f(t + \frac{L}{a}) \quad ó$$

$$F(t - \frac{L}{a}) = -f(t + \frac{L}{a}) \tag{17}$$

sustituyendo esta relación en la ecuación 16 nos queda

$$V - Vo = -\frac{2g}{a} F(t - \frac{L}{a}) \tag{18}$$

Esta ecuación implica que cuando una onda de presión del tipo F se acerca al depósito, el cambio de la velocidad del agua en el lugar es el doble al producido por la onda en cualquier otro punto de la tubería.

El cambio adicional de velocidad produce la onda de velocidad del tipo f. Por otro lado la ecuación 17 implica --

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

que cuando la onda de presión del tipo F se acerca al depósito una onda de tipo f es producida en ese punto.

Esta onda de reflexión tiene la misma magnitud que la onda directa con signo contrario. De aqui que en la válvula exista una relación entre F y f igual a

$$f(t) = -F\left(t - \frac{2L}{a}\right) \tag{19}$$

que es, la onda de reflexión que se acerca a la válvula igual en magnitud, pero de signo contrario a la onda directa que deja la válvula 2 L/a segundos antes.

Cuando un extremo de la tubería esta cerrado, como se muestra en la Figura 10:

V = Vo = 0 en cualquier tiempo t, entonces de la ecuación 16

$$F\left(t - \frac{L}{a}\right) = f\left(t + \frac{L}{a}\right) \tag{20}$$

y sustituyendo en la ecuación 15

$$H - Ho = 2\,F\left(t - \frac{L}{a}\right) \tag{21}$$

Así, en un extremo cerrado la onda de presión es completamente reflejada sin cambio de signo y la elevación de la presión es igual al doble de la intensidad de la onda directa de presión.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 10

Cuando existe un cambio en la sección transversal como se muestra en la Figura 11, las ecuaciones 15 y 16 se aplican a las secciones B C y C D para una onda F_1 que se acerca a la unión C como sigue:

$$H_{C't} - H_{C'o} = F_1 + f_1$$

$$V_{C't} - V_{C'o} = -\frac{g}{a}(F_1 - f_1)$$

$$H_{C''t} - H_{C''o} = F_2$$

$$V_{C''t} - V_{C''o} = \frac{gF_2}{a^2}$$

De la ecuación de continuidad en la unión C tenemos

$$A_2V_{C''t} = A_1V_{C't}$$

después de cancelar la carga de velocidad en las dos secciones de la tubería. La solución de las ecuaciones anteriores para F_2 y f_2 es:

$$F_2 = SF_1 \qquad (22A)$$

$$f_1 = r'F_1 \qquad (22B)$$

en donde

$$S - r' = 1$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

con

$$S = \frac{2A_1/a_1}{A_1/a_1 + A_2/a_2} \tag{23A}$$

y

$$r' = \frac{A_1/a_1 - A_2/a_2}{A_1/a_1 + A_2/a_2} \tag{23B}$$

En estas ecuaciones S y r' son los factores de transmisión y reflexión respectivamente. Estos factores dependen del área de la sección transversal y de la velocidad de la onda en las dos secciones de la tubería. Ya que la onda de velocidad depende del espesor de las paredes del conducto y de las propiedades del material, una onda de reflexión ocurre en cada cambio de espesor, área, o material de la tubería.

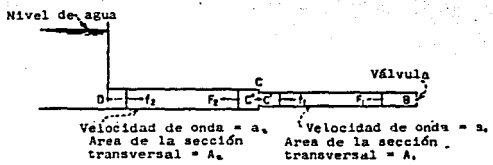


FIGURA 11

En la unión de tres o más tuberías de una manera similar a la descrita anteriormente, los factores de transmisión y reflexión para la Figura 12 son:

$$F_2 = F_3 = SF_1 \tag{24A}$$

$$f_1 = r' F_1 \tag{24B}$$

en donde

$$S - r' = 1$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

con

$$S = \frac{2\ A_1/a_1}{A_1/a_1 + A_2/a_2 + A_3/a_3} \qquad (25A)$$

y

$$r' = \frac{A_1/a_1 - A_2/a_2 - A_3/a_3}{A_1/a_1 + A_2/a_2 + A_3/a_3} \qquad (25B)$$

Estas ecuaciones nos muestran que la oleada de presión transmitida a las ramas C'' D y C''' E son iguales independientemente de sus secciones transversales.

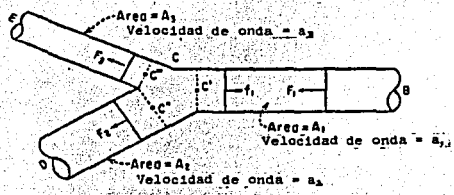


FIGURA 12

En una válvula parcialmente abierta, como en la Figura 13 f_1 representa una onda de presión cuyo movimiento es hacia la válvula parcialmente abierta y F_1 representa la onda de presión que es producida en la válvula por la reflexión de la onda f_1 .

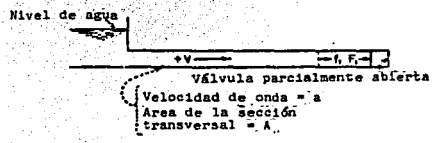


FIGURA 13

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De las ecuaciones 15 y 16

$$H - Ho = F_1 + f_1$$

$$V - Vo = -\frac{g}{a}(F_1 - f_1)$$

La descarga del agua a través de la compuerta es

$$Q = AV = (CdAg)\sqrt{2gH}$$

en donde (Cd y Ag) es el área efectiva de la válvula entonces

$$V = B\sqrt{H}$$

de donde

$$B = \frac{CdAg}{A}\sqrt{2g} \qquad (26)$$

En las ecuaciones anteriores V, H y F_1 son desconocidas la solución para V es

$$V = -a\frac{B^2}{2g} + \frac{B}{2}\sqrt{\left(\frac{aB}{g}\right)^2 + 4\left(Ho + \frac{aVo}{g} + 2f_1\right)} \qquad (27)$$

Estas ecuaciones definen velocidad del agua en el conducto cercano a la válvula en cualquier momento. La magnitud de la onda de reflexión F_1 se determina de la siguiente ecuación

$$F_1 = -\frac{a}{g}(V - Vo) + f_1 \qquad (28)$$

en donde V - Vo es el cambio de velocidad del agua en el conducto adyacente a la válvula. Cuando las ecuaciones 27 y 28 se aplican a una onda f cuando la válvula está abierta, el valor numérico de F_1 es siempre menor que f. De aqui que las ondas de presión se van reflejando como se van acercando a la válvula abierta.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2.6 EL GOLPE DE ARIETE PARA MOVIMIENTOS RAPIDOS DE LA VALVULA (MOVIMIENTOS INSTANTANEOS).

Si consideramos una tubería en la cual su flujo es inicialmente estable. Si asumimos que cerramos instantaneamente la válvula situada al final de la tubería, ésto provocará una repentina alza de presión en la tubería adyacente a la válvula. La magnitud de esta alza de presión se determina de la siguiente manera: si no hay onda de reflexión en la válvula en el instante de cerrarla

$$f\left(t + \frac{x}{a}\right) = 0$$

entonces de las ecuaciones 15 y 16

$$H - Ho = F\left(t - \frac{x}{a}\right)$$

$$V - Vo = -\frac{g}{a} F\left(t - \frac{x}{a}\right)$$

resolviendo estas ecuaciones para H - Ho

$$H - Ho = -\frac{a}{g}(V - Vo)$$

o sea

$$\Delta H = -\frac{a}{g}\Delta V \qquad (29)$$

en donde ΔV es el cambio en la velocidad del agua en la válvula en el momento en que se completa el movimiento de la misma.

Esta ecuación la podemos interpretar de la siguiente manera: una rápida reducción de la velocidad del agua produce una onda F que se forma en el conducto adyacente a la válvula. La magnitud de esta onda es proporcional al cambio en la velo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

cidad del agua y a la velocidad de propagación de la onda de presión.

El fenómeno de la propagación de la onda de transmisión debido a un cierre instantáneo en la válvula lo podemos ver en la Figura 14. Como se indica en esta figura una onda F que resulta de un completo cierre repentino de la válvula, se mueve en la tubería con una velocidad a. Como podemos ver, diagrama por diagrama, tres eventos concurrentes tienen lugar; la velocidad del agua detrás de la onda se reduce a cero, la tubería se expande y la densidad del agua aumenta. Debido al ensanchamiento de la tubería y el aumento de la densidad del agua, la tubería ahora contiene un volumen adicional de agua que es más del que debe existir para una condición de flujo estable.

Más allá, en el tiempo en que llega la onda F al depósito, la presión dentro de la tubería cerca del depósito, es mayor que la presión estática. Debido a esta condición inestable, el agua es forzada a ir dentro del depósito de la tubería.

Como un resultado de este cambio de velocidad, una onda de reflexión es producida en el final del depósito de la tubería que es propagado del depósito a la válvula. Detrás de la onda de reflexión, el flujo de agua hacia el depósito, la tubería se contrae de su posición de expansión y la densidad --

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

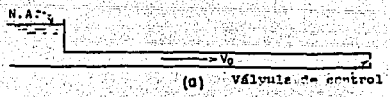
del agua disminuye. Cuando la onda f está cerca de la válvula cerrada una onda de reflexión completa tiene lugar y una segunda onda F se establece con signo contrario a la onda original directa. Así como esta onda viaja hacia el depósito, se promueven contracciones en la tubería y disminuciones en la densidad del agua detrás de la onda de presión. La velocidad del agua dentro de la tubería entre el depósito y la onda de enfrente tiene ahora la misma magnitud y dirección que la que existe detrás de la onda f durante su viaje a la válvula. Cuando la segunda onda F se acerca al depósito una segunda onda f se propaga de este punto a la válvula. El efecto de esta onda es el de expander de nuevo la tubería y aumentar la densidad del agua. El primer ciclo de onda es completado --- cuando la segunda onda f se acerca a la válvula. Ahora una onda de reflexión completa tiene lugar con una válvula cerrada y el ciclo entero es repetido.

Si el depósito está a cierta distancia que la onda reflejada no puede regresar a la válvula antes de que el movimiento de la válvula sea completado, el mismo cambio de presión máxima ocurre en la válvula como ocurre en un cierre instantáneo.

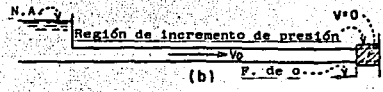
De aqui que el significado físico de la ecuación 29 es apoyar y agrandar lo establecido como sigue:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

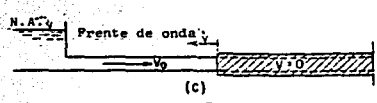
FIGURA 14



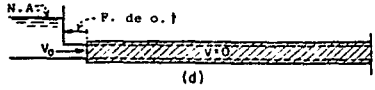
a) Condiciones estables antes del cierre de la válvula.



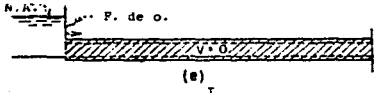
b) Condiciones pasajeras E-segundos después del cierre ins-- tantáneo de la válvula.



c) Condiciones pasajeras en $t=\frac{L}{2a}$ segundos.

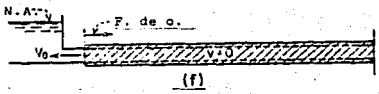


d) Condiciones pasajeras en $t=\frac{L}{a}$ -E segundos.



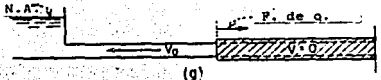
e) Condiciones pasajeras en $t=\frac{L}{a}$ segundos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



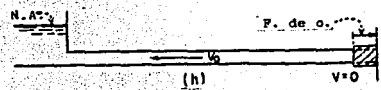
(f)

f) Condiciones pasajeras en $t=\frac{L}{a}$ +E segundos.



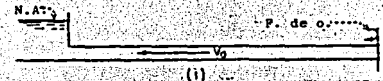
(g)

g) Condiciones pasajeras en $t=\frac{3L}{2a}$ segundos.



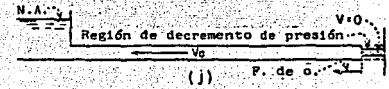
(h)

h) Condiciones pasajeras en $t=\frac{2L}{a}$ -E segundos.



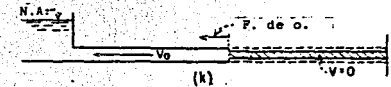
(i)

i) Condiciones pasajeras en $t=\frac{2L}{a}$ segundos.



(j)

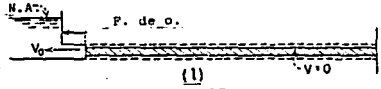
j) Condiciones pasajeras en $t=\frac{2L}{a}$ +E segundos.



(k)

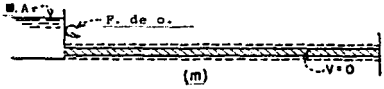
k) Condiciones pasajeras en $t=\frac{5L}{2a}$ segundos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



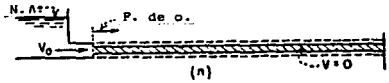
(l)

l) Condiciones pasajeras en $t=\frac{3L}{a}$ -E segundos.



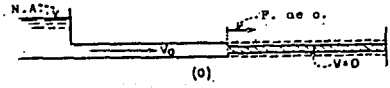
(m)

m) Condiciones pasajeras en $t=\frac{3L}{a}$ segundos.



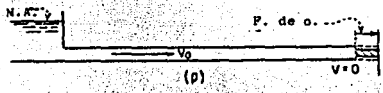
(n)

n) Condiciones pasajeras en $t=\frac{3L}{a}$ +E segundos.



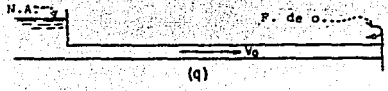
(o)

o) Condiciones pasajeras en $t=\frac{7L}{2a}$ segundos.



(p)

p) Condiciones pasajeras en $t=\frac{4L}{a}$ -E segundos.



(q)

q) Condiciones pasajeras en $t=\frac{4L}{a}$ segundos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para un cierre instantáneo o movimiento de válvula que se complete en menos de 2L/a segundos, el máximo cambio de carga en la válvula es el mismo; ésto es $\Delta H = -(a/g)\ \Delta V$ para cualquier movimiento de válvula que tenga lugar en menos de 2 L/a segundos, el máximo cambio de carga se extiende de la válvula a cierto punto límite a lo largo de la tubería. Este punto límite se puede determinar de la siguiente manera: si x_2 es la distancia del punto límite al depósito, el tiempo de viaje del agua de la válvula al punto límite es $(L-x_2)/a$ segundos. El tiempo requerido para que la onda de presión viaje de la válvula al depósito y de regreso al punto límite es $(L + x_2)/a$ segundos. Si el tiempo total de movimiento de la válvula es T, el tiempo que transcurre del inicio del movimiento de la válvula al instante en que arriva el cambio del incremento final de presión en el punto límite es

$T + (L-x_2)/a$.

Así, el punto límite es localizado a lo largo de la tubería en donde la onda directa y la de reflexión se encuentran, ésto es:

$$\frac{L + x_2}{a} = T + \frac{L - x_2}{a}$$

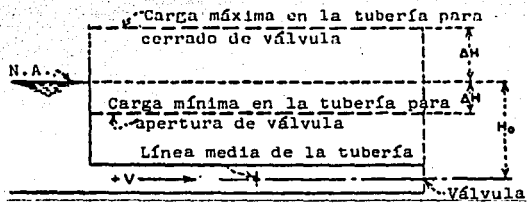
ó

$$x_2 = \frac{Ta}{2} \qquad (30)$$

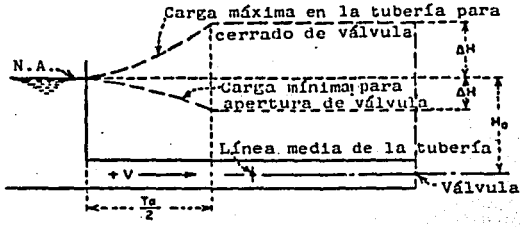
como se muestra en la Figura 15.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

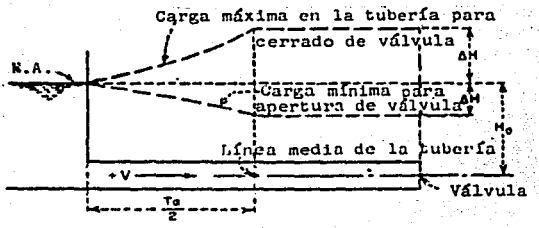
FIGURA 15



a) Para un movimiento instantáneo de la válvula.

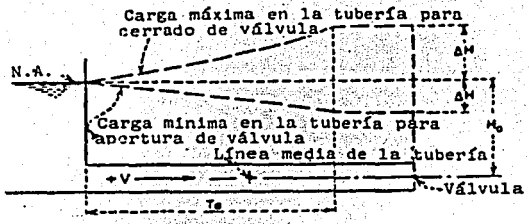


b) Cuando el movimiento de la válvula es menor a $\frac{L}{a}$ segundos.

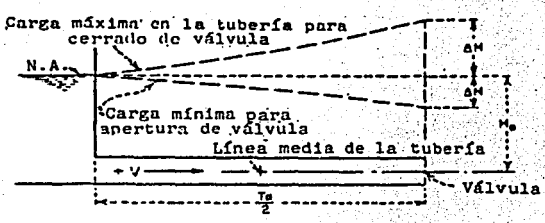


c) Cuando el movimiento de la válvula es igual a $\frac{L}{a}$ segundos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



d) Cuando el movimiento de la válvula es mayor a $\frac{L}{a}$ segundos y menor a $\frac{2L}{a}$ segundos.



e) Cuando el movimiento de la válvula es igual a $\frac{2L}{a}$ segundos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2.7 GOLPE DE ARIETE PARA MOVIMIENTOS LENTOS DE LA VALVULA.

Cuando el movimiento de la válvula se realiza en 2 L/a - segundos o menos, el máximo cambio de presión en la válvula - es determinado por la ecuación 29, desde que ninguna onda de reflexión regresa a la válvula demasiado pronto como para alterar la presión en el lugar. Sin embargo cuando el tiempo - de movimiento de la válvula es mayor a 2 L/a segundos, ésto - no es muy válido. Para un movimiento de válvula largo, el movimiento actual es aproximado a una serie de movimientos sucesivos de pasos instantáneos. Estos movimientos paso por paso son seleccionados de manera que tengan un valor exacto de la abertura de la válvula en el tiempo de completar cada paso como lo vemos en la Figura 16.

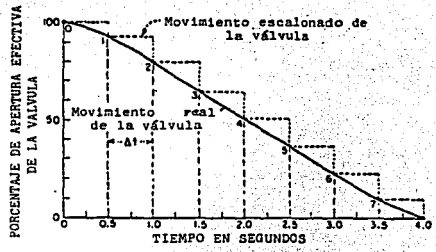


FIGURA 16

El incremento de presión producido en la válvula por cada uno de estos pasos son señalados de uno a otro por una distancia aΔt como se muestra en la Figura 17.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

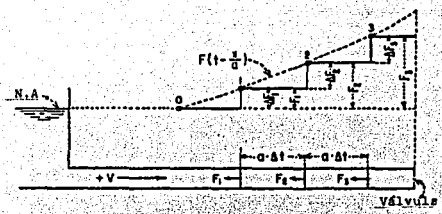


FIGURA 17

Para reducir los cálculos al mínimo, los intervalos de tiempo deben ser los más largos posibles. Después de un movimiento instantáneo de la válvula tiene lugar en la parte más baja de la tubería, una onda de reflexión retorna a la válvula 2 L/a segundos después. De aqui que el máximo intervalo de tiempo que puede ser usado en los cálculos para determinar el golpe de ariete es de 2 L/a segundos. Si más valores son deseados para cualquier punto en particular de la tubería, intervalos de tiempo más pequeños son necesarios, al igual que si el movimiento de la válvula es muy irregular.

2.2.8 GOLPE DE ARIETE CAUSADO POR FALTA DE PODER EN LA BOMBA.

Son muchas las condiciones de operación en las instalaciones de bombas centrífugas que pueden causar cambios de presión en las tuberías de descarga. Una de las condiciones más importantes es la rápida des-aceleración de los motores de las bombas debidas a la falta de poder. La Figura 18 nos muestra la secuencia de los cambios de presión, flujo y velocidad de una bomba producidos por falta de poder en el motor propul

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

sor. Cuando la fuente de poder de una bomba se corta repentinamente, la única energía que queda es usualmente muy pequeña comparada con la necesaria para mantener el flujo sin disminución de la carga, la reducción de la velocidad de la bomba es muy rápida. Conforme se reduce la velocidad de la bomba, el flujo de descarga también se reduce. Como un resultado de estos rápidos cambios de flujo, ondas de golpe de ariete de presión sub-normal se forma en la línea de descarga de la bomba. Estas ondas de presión sub-normal se mueven rápido en la tubería de descarga hacia la salida en donde ocurre una reflexión de ondas. Rápidamente la velocidad de la bomba se reduce a un punto en donde el agua no puede ir en contra de la carga existente, si no hay una válvula de control en la bomba, el flujo a través de la bomba se va en reversa, aunque la bomba todavía este rotando hacia adelante. La velocidad de la bomba decae más rápidamente y pasa por la velocidad cero. Un corto tiempo después la bomba, actuando como una turbina, alcanza una velocidad sin control en reversa, conforme la bomba va teniendo una velocidad sin control en reversa, el flujo en reversa a través de la bomba se reduce rápidamente, y esta reducción en el flujo produce un aumento de presión en la bomba y a lo largo de la tubería de descarga.

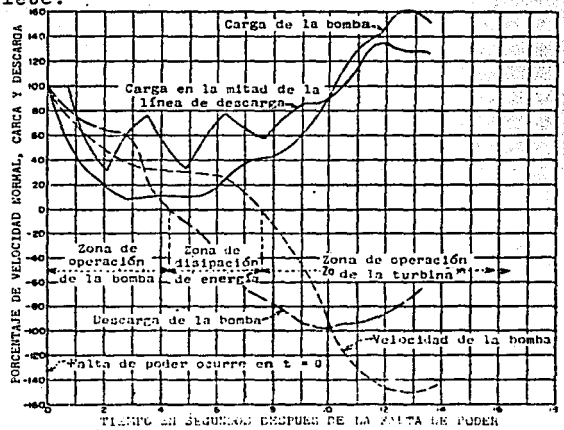
Para determinar las condiciones hidráulicas pasajeras en la bomba y en la línea de descarga debidas a una falta de po-

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

der en el motor, tres efectos deben de considerarse: la inercia de la bomba y del motor, las características de bombeo y el fenómeno de ondas de golpe de ariete en la línea de descarga. El efecto de la inercia se obtiene de la ecuación de inercia. Esta ecuación define la relación entre la velocidad de la bomba y el torque en un instante de tiempo dado en términos de la energía cinética del sistema rotativo. Las características de la bomba se obtienen de un diagrama. Este diagrama define la manera en que el torque de la bomba y su velocidad varían con la carga y la descarga a través de un rango de operación como bomba, disipador de energía y turbina. Finalmente, el efecto de golpe de ariete se obtiene de las ecuaciones de golpe de ariete. Estas ecuaciones definen las relaciones entre la carga y el flujo en la línea de descarga durante las condiciones pasajeras bajo la acción de las ondas de golpe de ariete.

FIGURA 18

Condiciones pasajeras después de la falta de poder.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2.8.1 Ecuaciones de Inercia.

Cuando la fuente de poder del motor de la bomba se corta repentinamente, la des-aceleración de la bomba en cualquier - instante depende del volante de inercia de las partes rotatorias de la bomba y del motor y del troque instantáneo producido por el impulsor. Para un sistema rotatorio el torque de aceleramiento es igual al producto del momento de inercia de - la masa del sistema rotario y la aceleración angular. Siguiendo una falta de poder en el motor de la bomba el torque de - des-aceleración en el sistema rotatorio corresponde al tor-- que de la bomba. Si el torque de des-aceleración es tomado como positivo.

$$M = - I \frac{w}{t} = \frac{WR^2}{g} \frac{w}{t} \qquad (31)$$

Para intervalos pequeños de tiempo $\Delta t = t_2 - t_1$; esta ecuación escrita aproximadamente de la siguiente manera

$$\frac{M_1 + M_2}{2} = - \frac{WR^2}{g} \frac{(w_2 - w_1)}{\Delta t}$$

$$= \frac{2\pi W R^2}{60g} \frac{N_1 - N_2}{\Delta t} \qquad (32)$$

y ahora es escrita con los coeficientes $\alpha = N/Ne$ y $\beta = M/MR$ y - nos queda de la siguiente manera

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \frac{15 \; g \; Mr}{\pi W \; R^2 Nr} (\beta_1 + \beta_2) \Delta t \qquad (33)$$

El torque de des-aceleración en una carga y velocidad proporcionada es

$$Mr = \frac{60 \; w \; Hr \; Qr}{2\pi \; Nr \; \eta r} \qquad (34)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

entonces

$$\alpha_1-\alpha_2=\kappa_1(\beta_1+\beta_2)\Delta t \qquad (35)$$

en donde

$$\kappa_1=\frac{450\ g\ w\ Hr\ Qr}{\pi^2 W\ R^2 nr\ N^2 r}=\frac{91600\ Hr\ Qr}{W\ R^2\ nr\ N^2 r} \qquad (36)$$

2.2.8.2 Características de la Bomba.

Las características del funcionamiento de la bomba normalmente las da el fabricante y se muestran en la Figura 19 e incluyen la carga, potencia al freno y eficiencia graficada contra la descarga. Estos datos se convierten a una familia de curvas de torque y velocidad en una gráfica h-ν de la siguiente manera: refiriéndonos a la Figura 20, el punto correspondiente a la carga y descarga proporcionada de la bomba tiene las coordenadas h=1 y ν=1. Las curvas para α=1 y β=1 también pasan a través de este punto en la gráfica si, los valores de estos coeficientes están definidos por valores proporcionados. Otros valores de β en la curva para α=1 son determinados, calculando valores de h y ν de la curva de potencia al freno de la Figura 19. Los puntos en el diagrama para otros valores de α y β son de las leyes de homologación de la operación de la bomba. Por ejemplo, para una bomba dada H y M varían con N^2 mientras N y $\sqrt{H}$ varían con Q. Para usar estas relaciones en la gráfica h-ν una parábola del tipo $h = \kappa_2\ \nu^2$ se pasa a través de un punto conocido de la gráfica así como

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

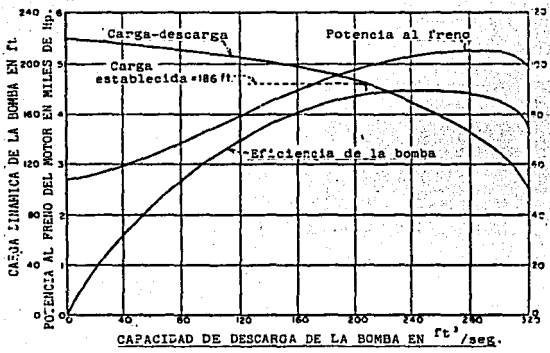


FIGURA 19. Curvas del comportamiento de la bomba.

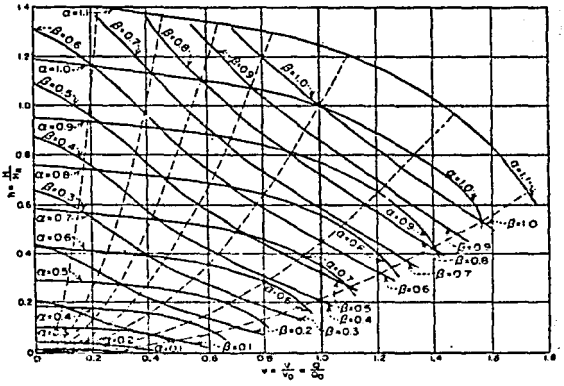


FIGURA 20. Diagrama de la región normal de operación normal de la bomba.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

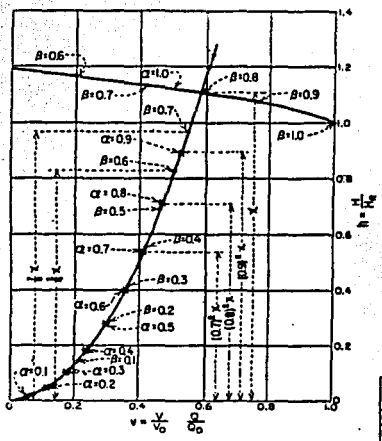


FIGURA 21

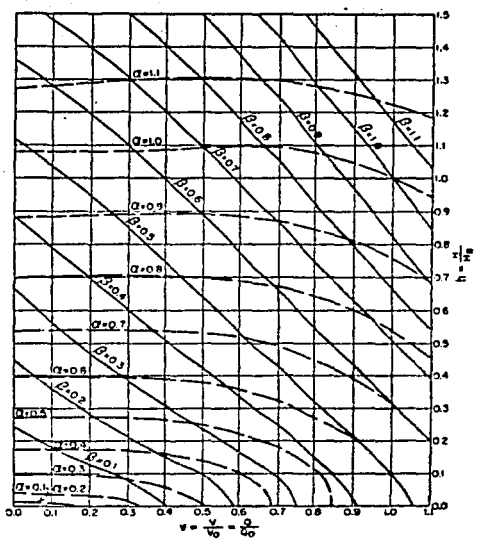


FIGURA 22

a) Diagrama de la zona de operación normal de la bomba.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

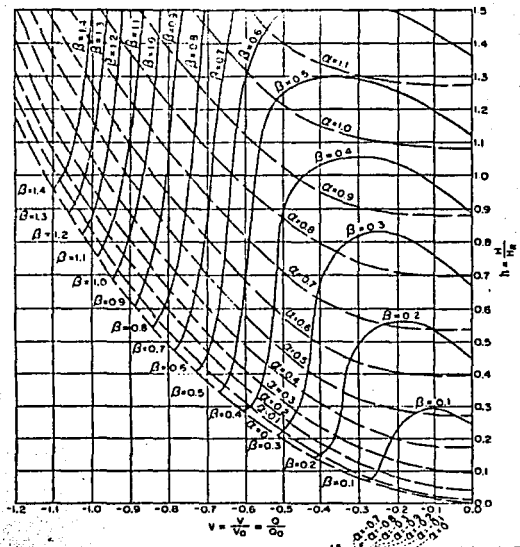


FIGURA 22B. Características de la zona de disipación de energía de la bomba.

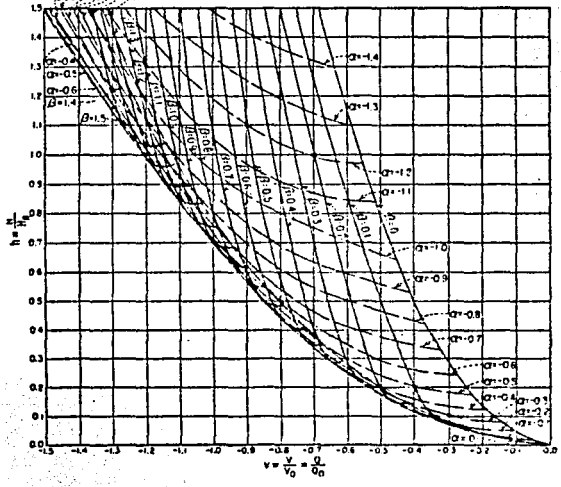


FIGURA 22C. Características de la operación de turbina de la bomba.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

se muestra en la Figura 21 en $\alpha=1.0$, $\beta=0.8$. La distancia vertical $h=1.1$ en este punto es entonces dividido en ocho partes iguales y los puntos correspondientes a $\beta=0.7$, 0.6, etc., se localizan en la parábola con valores ordinarios de $h = 7/8\ (1.1)\ 6/8\ (1.1)$, etc. De la misma manera, puntos correspondientes a $x=0.9$ y 0.8 son localizados en la misma parábola con valores de $h=1.1\ (0.9)^2$ y $1.1\ (0.8)^2$. Una curva suave es entonces graficada a través de puntos de varias parábolas correspondientes a cada valor de α y β. La Figura 20 nos muestra curvas construidas de esta manera.

Las características de la bomba mostradas en la Figura 20 son para la zona de operación normal. Cuando la falta de poder ocurre, estas características son adecuadas para determinar la presión mínima pasajera en todos los puntos de la línea de descarga y para determinar la posibilidad de separación de la columna de agua. Sin embargo después de que el flujo se regresa a la bomba, características adicionales de la bomba son requeridas para la zona de disipación de energía en donde la bomba está corriendo hacia adelante con el flujo en contra y para la zona de la operación de la turbina, en donde el flujo y la rotación de la bomba están ambos en reversa. Características completas de una bomba simple en cada una de las tres zonas se muestran en las Figuras 22A, B y C.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2.8.3. Ecuaciones de Golpe de Ariete.

Las ecuaciones de golpe de ariete para una línea de descarga de bomba mostrada en la Figura 23 son las siguientes

$$h\beta_1 t_1 - hc_1 t_2 = -2\rho_1 \ (v\beta_1 t_1 - vc_1 t_2) \qquad (37A)$$

$$hc_2 t_3 - h\beta_2 t_4 = 2\rho_2 \ (vc_2 t_3 - v\beta_2 t_4) \qquad (37B)$$

En estas ecuaciones (t_2-t_1) es el tiempo de viaje de la onda entre C_1 y B_1 para ondas de presión del tipo F_1 y (t_4-t_3) es el tiempo de viaje de las ondas entre C_2 y B_2 para ondas de presión del tipo f_2 . Para una tubería de descarga uniforme $\rho = aVo/2gHr$. Estas ecuaciones definen las relaciones entre la carga y la velocidad durante el fenómeno de golpe de ariete. En un sistema coordenado de h y v estas ecuaciones se representan por líneas rectas, con una pendiente de $\pm 2\rho$ como se muestra en la Figura 24.

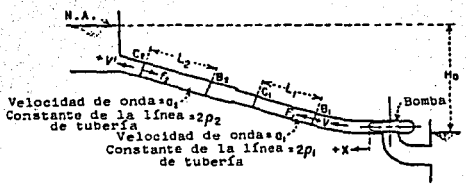


FIGURA 23

Cada ecuación de golpe de ariete nos da la relación entre h y v en un punto de la tubería uniforme de descarga en términos de h y v que son conocidos en otro punto de la línea. Para determinar explicitamente h y v una segunda relación inde

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

pendiente es necesaria. Esta relación es obtenida de la ecuación de inercia de la bomba con el uso de la gráfica de características de la bomba.

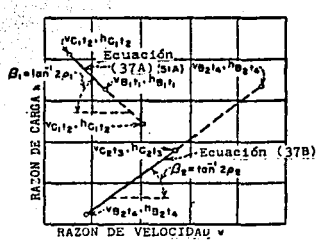


FIGURA 24

2.2.9 ANALISIS GRAFICO DE GOLPE DE ARIETE.

Considerando la instalación de la bomba de la Figura 25, si una falta de poder ocurre en los tres motores de la bomba, $2\rho = 2.31$ y $\kappa_1 = .224$ para un intervalo de tiempo $\Delta t = L/4a$,

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \kappa_1 \Delta t(\beta_1 + \beta_2) = 0.0782\ (\beta_1 + \beta_2) \qquad (38)$$

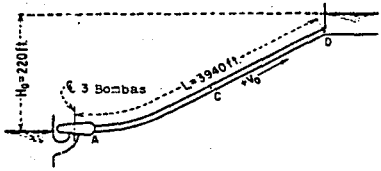


FIGURA 25

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

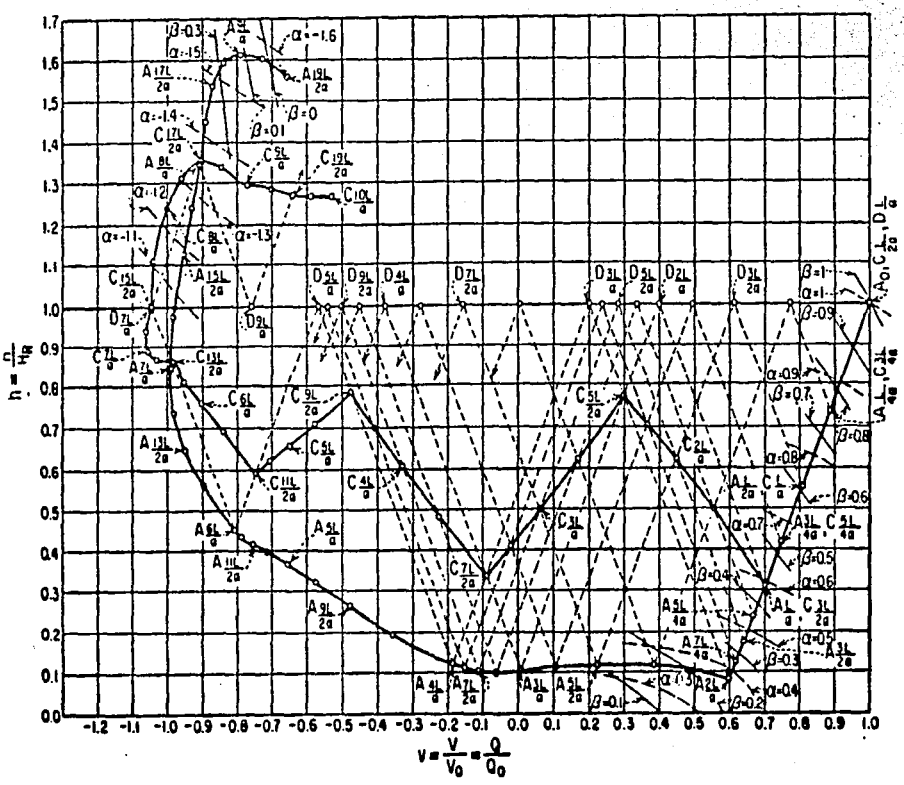


FIGURA 26

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

COEFICIENTES DE VELOCIDAD Y TORQUE EN LA BOMBA

Localización	β Torque	α Vel.	$\alpha_1 - \alpha_2$ De curvas	$\alpha_1 - \alpha_2$ De ec. 35
A_0	1.000	1.000	0	0
$A_{\frac{L}{40}}$	0.760	0.863	0.137	0.138
$A_{\frac{L}{20}}$	0.610	0.755	0.108	0.107
$A_{\frac{3L}{40}}$	0.520	0.668	0.087	0.088
$A_{\frac{L}{8}}$	0.440	0.592	0.076	0.075
$A_{\frac{3L}{40}}$	0.380	0.528	0.064	0.064
$A_{\frac{3L}{20}}$	0.325	0.472	0.056	0.055
$A_{\frac{7L}{40}}$	0.285	0.425	0.047	0.047
$A_{\frac{3L}{8}}$	0.250	0.383	0.042	0.042
$A_{\frac{9L}{20}}$	0.170	0.350	0.033	0.033

TABLA 1

La solución simultánea de las ecuaciones de golpe de ariete y de las ecuaciones de inercia de la gráfica de características de la bomba por métodos gráficos se muestra en la Figura 26.

Las características completas usadas en esta solución son las de las Figuras 22A, B y C. El punto inicial correspondiente a Ao es localizado en la gráfica h-ν en las coordenadas h=1, ν=1. A L/4a es entonces localizado en la línea con pendiente 2ρ=+2.31 que pasa a través de Ao de la siguiente manera. Se estima la localización de A L/4a. Valores de α_2 y β_2 son entonces leidos de las curvas de características

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

de las bombas. Este valor de β_2 es usado en la ecuación 38 para calcular α_2. Si el valor calculado de α_2 no coincide con el valor de la curva de α_2, el punto A L/4a es transladado arriba o abajo de la línea de pendiente $2\rho=+2.31$ hasta que este valor de α_2 coincida. Este punto particular es buscado para localizarlo en el valor de $\beta=0.760$ y $\alpha=0.863$. Otros puntos para A L/2a, A L/3a, se determinan de manera similar.

Los valores para muchos de estos puntos se muestran en la Tabla 1 de donde podemos leer los siguientes valores:
Máxima caida de carga en la bomba = 0.92 Ho = 202 ft.
Máxima caida de carga en la mitad de la tubería = 0.69 Ho = 152 ft.
Máximo aumento de carga en la bomba = 0.61 Ho = 134 ft.
Máximo aumento de carga en la mitad de la tubería = 0.35 Ho = 77 ft.

2.2.10 SEPARACION DE LA COLUMNA DE AGUA.

Los máximos cambios positivos y negativos de presión obtenidos de la solución del golpe de ariete son graficados en la tubería de descarga de la Figura 27, para mostrar los límites de presión para los cuales la tubería de descarga debe ser diseñada.

Cuando la mínima presión en cualquier punto de la tube--

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ría de descarga de la bomba se acerca a la presión de vapor del agua, la solución del golpe de ariete no es válida. Si esta condición de presión sub-atmosférica dentro de la tubería persiste para un periódo largo, la columna líquida de agua se parte y es separada por una sección de vapor. La separación de la columna de agua, algunas veces ocurre durante la oleada negativa en tuberías de descarga largas en puntos altos que están cerca del grandiente hidráulico. Cuando es posible, esta condición debe ser suprimida con el uso de tanques de oscilación o acumuladores hidráulicos o un motor más grande WR^2, debido a la alta presión originada cuando se ejecutan dos columnas de agua. Cuando la separación de la columna de agua no se puede surpimir, significados especiales se deben tomar en cuenta para minimizar la violencia del impacto debido al reencuentro de la columnas de agua. Esto puede ser completado poniendo válvulas especiales u otros dispositivos que aumenten o reduzcan la velocidad de la onda.

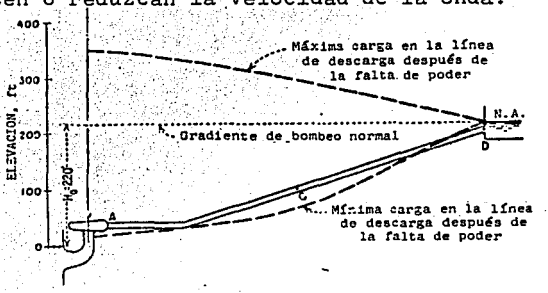
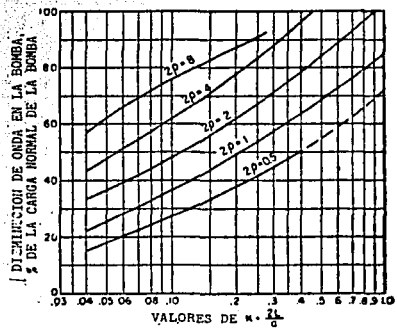


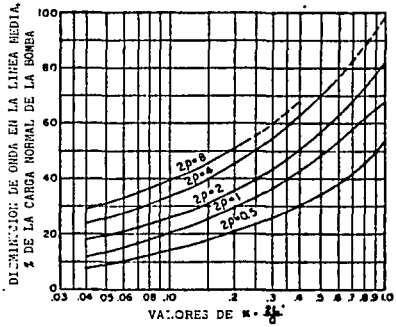
FIGURA 27

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

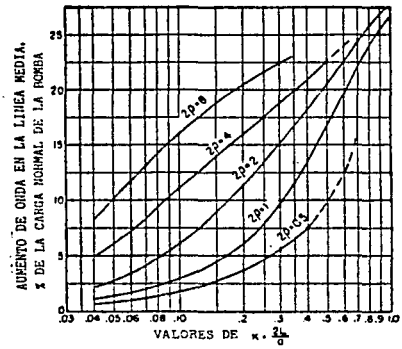
FIGURA 28.



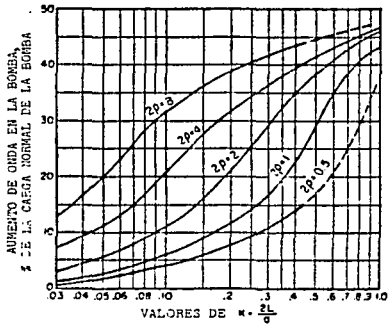
(a)



(b)

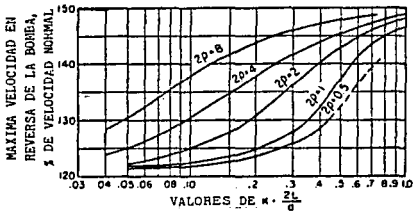


(c)

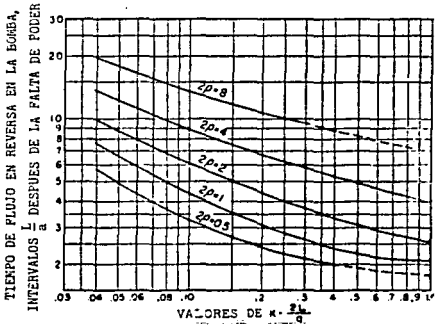


(d)

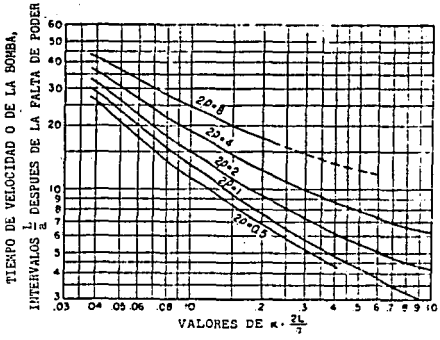
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



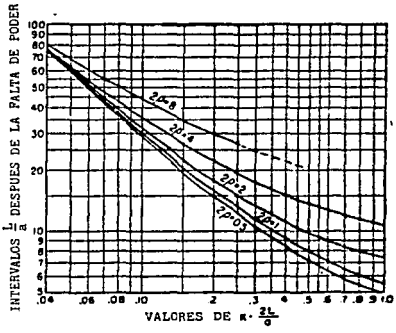
(e)



(f)



(g)



(h)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2.11 GRAFICAS DE GOLPE DE ARIETE.

Para obtener la solución gráfica de golpe de ariete por falta de poder en el motor de la bomba, dos parámetros independientes se deben tomar en cuenta: la constante de la tubería ρ y $\kappa_1(2L/a)$, una constante que incluye el efecto de inercia de la bomba y del motor y el tiempo de viaje de la onda de golpe de ariete en la tubería de descarga.

Para un grupo de características de bombas los resultados de un largo número de soluciones de golpe de ariete se muestran en las Figuras 28. Estas gráficas muestran un método conveniente para obtener las condiciones límites pasajeras en la bomba y en la tubería de descarga cuando no se presentan válvulas de control. También estas gráficas son teóricamente aplicable a un tipo particular de bomba que opera a una carga proporcionada anterior a la falta de poder y son muy útiles para obtener la solución aproximada de los efectos de golpe de ariete en cualquier tubería de descarga.

2.2.12 SOLUCIONES ESPECIALES DE GOLPE DE ARIETE.

Líneas de descarga con válvula de retención. Para una línea de descarga con una válvula de retención en el lado de descarga de la bomba, la descarga normal de la bomba mantiene la válvula de retención abierta. Sin embargo cuando el flujo a través de la bomba se regresa por una falta de poder

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

la válvula de retención cierra rápidamente, y los efectos de golpe de ariete se determinan de la misma manera que para una tubería cerrada y en el caso de que el cierre de la válvula de retención se atrase, el aumento de carga en la válvula puede ser mayor.

Tubería de descarga de una bomba con una tubería larga de succión. Considerando la instalación mostrada en la Figura 29. Cuando las bombas operan con una carga de H''_B en el lado de descarga y una H'_B en el lado de succión, la descarga de la bomba depende de la carga de bombeo $H=H''_B-H'_B$. Sobre la falta de poder en los motores de la bomba ondas de presión sub-normal en B" en el lado de descarga de la bomba, que se mueve hacia la salida de descarga en D y ondas positivas de presión en B' en el lado de succión que se mueven hacia la entrada A. En la solución gráfica de golpe de ariete para este problema con intervalos de tiempo de $L_1/a_1=L_2/a_2$ segundos, son usados en los cálculos. Ahora B" o y D L_2/a_2 se localizan en $h=1$ $\nu=1$, mientras que B'o y A L_1/a_1 se localizan en $h=0$, $\nu=1$, se muestran en la Figura 29.

Una línea es ahora graficada del punto D L_2/a_2, con una pendiente de $+2\rho_2= 2.31$ en donde el punto correspondiente a B" $L_2/2a_2$ se localiza. De manera similar una línea es graficada del punto A L_1/a_1 con una pendiente de $-2\rho_1=2.31$ en don-

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

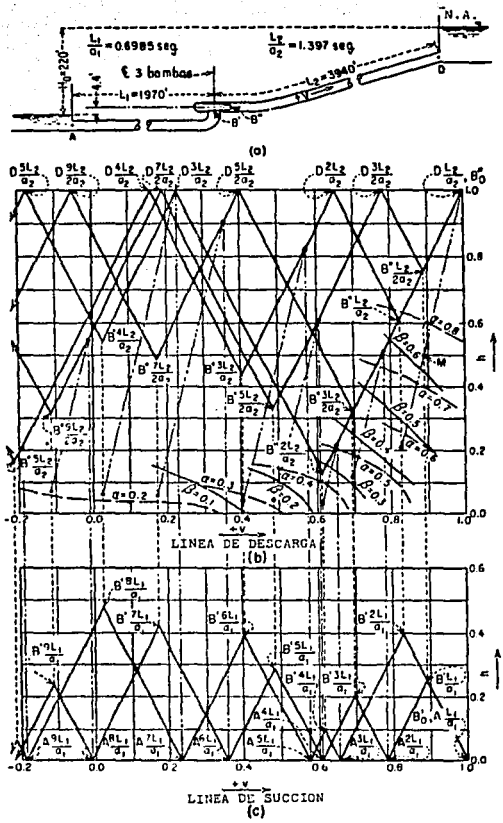


FIGURA 29

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

de se localiza el punto $B'L_1/a_1$. Uno de los requerimientos para localizar los puntos $B''\ L_2/2a_2$ y $B'L_1/a_1$ es que si $vB''\ L_2/a_2=vB'L_1/a_1$ estos puntos se localizan en la misma línea vertical. Otro de los requerimientos es que en $t=L_1/a_1$ segundos el cambio en la velocidad de la bomba debe satisfacer la ecuación 35 para carga de bombeo de $(hB''\ L_2/a_2-hB'L_1/a_1)$. Un método gráfico simple es usado para localizar los puntos $B''\ L_2/2a_2$ y $B'L_1/a_1$ con líneas punteadas en la Figura 29. Empezando por el punto $D\ L_2/a_2$ graficar una línea punteada cuya tangente sea $+2(\rho_1+\rho_2)$. En estas líneas punteadas se determina por ensayo el punto en las curvas de la bomba que satisfaga la ecuación 35. Por ejemplo, el punto correspondiente a $t=L_1/a_1$ es localizado en el punto M, en donde $L=0.745$. Los puntos correspondientes a $B''\ L_2/2a_2$ y $B'L_1/a_1$ son entonces localizados en la línea vertical que pasa a través del punto M. Los otros puntos se determinan de manera similar.

2.2.13 EFECTO DE LAS VALVULAS DE CONTROL.

Existen muchos tipos de válvulas de control usadas en las plantas de bombeo. Los métodos de análisis de golpe de ariete que se dan anteriormente se aplican al efecto de cualquier tipo de válvula de control. Sin embargo, el tiempo y la manera en que las válvulas de control actuan deben de ser conocidas al igual que las características del flujo en la

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

válvula para diferentes grados de abertura. Para las condiciones de falta de poder en los motores de la bomba la solución gráfica de golpe de ariete se realiza inicialmente con las características de la bomba usando las ecuaciones de inercia y de golpe de ariete como lo hemos visto anteriormente hasta que el flujo es controlado. La solución gráfica es entonces complementada con las ecuaciones de golpe de ariete y las parábolas correspondientes al flujo que pasa a través de la válvula de control.

Figuras 30 y 31 muestran los efectos de un cierre rápido de las válvulas de retención. Cuando el cierre de la válvula es dentro, la última parte de la gráficas se hace con parábolas como se muestra en la Figura 32. Esta figura, muestra el efecto de un cierre lento de una válvula de control que regula el flujo en 11 L/2a segundos después de la falta de poder.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

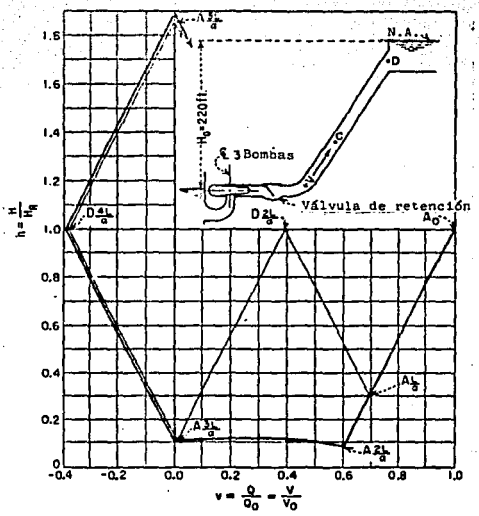


FIGURA 30

2.2.14 ARRANCANDO Y PARANDO LAS BOMBAS.

Los efectos del golpe de ariete debidos al arranque normal de las bombas son relativamente pequeños. Sin embargo, estos efectos pueden ser minimizados por el uso de una válvula de control correcta o por equipo de arranque y verificado que todo el aire es removido de la tubería de descarga. Si hay una válvula de interrupción del lado de la descarga de la bomba, la bomba aumenta su velocidad con la válvula cerrada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

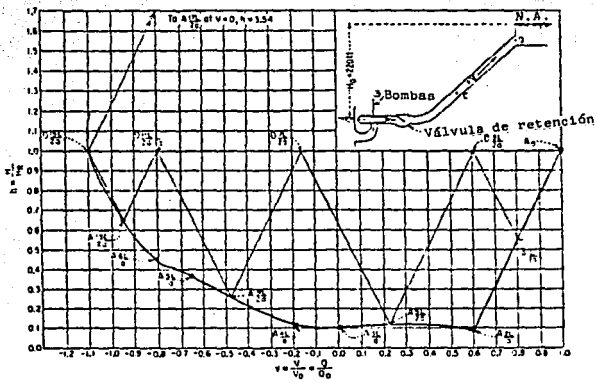


FIGURA 31

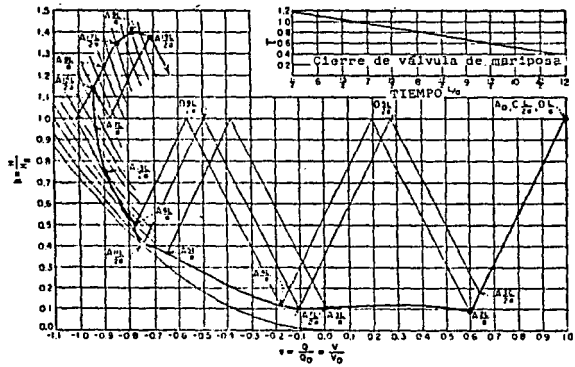


FIGURA 32

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La válvula es entonces abierta lentamente sin ningún efecto apreciable de golpe de ariete en la línea de descarga. Si sacamos de servicio la bomba no existe ningún problema con el golpe de ariete si cerramos lentamente la válvula antes de desconectar el motor de la bomba.

2.2.15 ANALISIS DE GOLPE DE ARIETE INCLUYENDO LAS PERDIDAS HIDRAULICAS.

Asumimos anteriormente que las pérdidas hidráulicas comparadas con los cambios de presión eran despreciables. Esto se justifica para la mayoría de las tuberías en donde cambios rápidos de flujo son más frecuentes. Ocasionalmente, es necesario incluir el efecto de pérdidas hidráulicas en los cálculos de golpe de ariete. Si se asume que la velocidad de la carga y las pérdidas hidráulicas varían con V , el efecto de estas pérdidas pueden ser incluidas en las ecuaciones de golpe de ariete con la introducción de un término V en la ecuación 7, la ecuación de equilibrio para un elemento de agua. Sin embargo, la solución simultánea de la ecuación resultante con la ecuación 8, la ecuación de continuidad para un elemento de agua no es posible.

Para tuberías que incluyen movimientos de válvulas, una primera aproximación al efecto de pérdidas hidráulicas se obtiene en la solución de golpe de ariete por una obstrucción

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

hipotética localizada en la parte superior de la tubería. Por ejemplo, considerando la tubería mostrada en la Figura 33 y su relación de cierre de válvula de la misma figura. La pérdida de entrada, la fricción y la velocidad de carga en la tubería para un flujo inicial Hf=13.4 ft. de donde

$$hf = \frac{Hf}{Ho}\left(\frac{V}{Vo}\right)^2 = 0.028v^2$$

como se muestra en la parábola de pérdida de carga de la Figura 33. En la solución gráfica del golpe de ariete que se muestra en la figura la obstrucción hipotética esta localizada en C. De aqui que los puntos C't están localizados en la línea horizontal punteada en h=1.028 y los puntos para Ct en la parábola de pérdidas de carga.

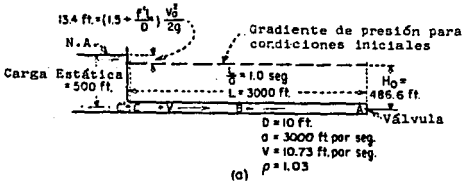
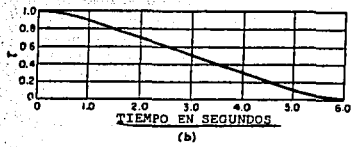


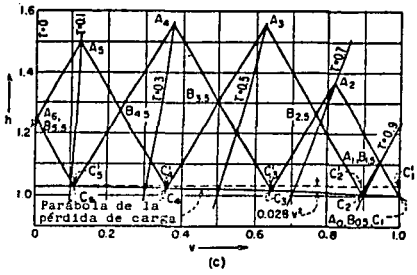
FIGURA 33

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FIGURA 33.



Relación del tiempo de cerrado de la válvula



Pérdidas Concentradas en la Tubería de Salida. Para una tubería de salida los efectos de las pérdidas hidráulicas a lo largo de toda la tubería para la solución de golpe de ariete se pueden asumir como una obstrucción hipotética en la salida de la tubería de descarga. Esta es la misma instalación que en la Figura 25. Para esta instalación $hf=0.07v^2$ y

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$h_o=1-0.07\ (1-v^2)$ para el flujo normal y $h_o=1-0.07(1+v^2)$ cuando el flujo se regresa a la bomba. Las pérdidas de carga se muestran en la Figura 34 junto a la solución de golpe de a-- riete y una falta de poder en los motores.

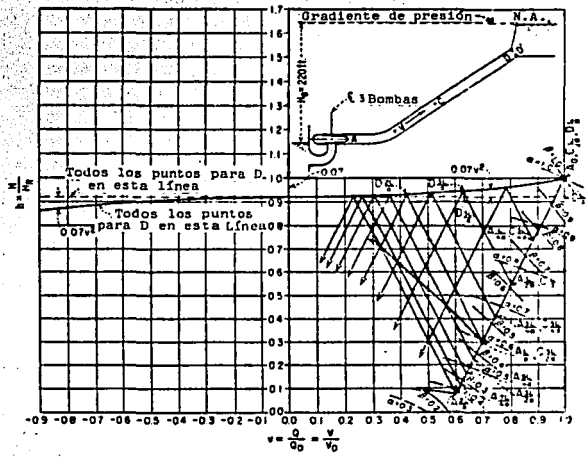


FIGURA 34

2.2.16 ANALISIS DE GOLPE DE ARIETE PARA TUBERIAS COMPUESTAS.

El análisis de golpe de ariete descrito anteriormente es para tuberías sin ramificaciones, uniformes y con cambios de diametro, ahora desarrollaremos un método para determinar el - golpe de ariete en tuberías con ramificaciones. Cuando tres tuberías se unen como en la Figura 35 y la velocidad de carga

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

y las pérdidas hidráulicas se desprecian. Los requerimientos para la continuidad de flujo en la unión es

$$A'' \cdot VB'' \cdot t = A'''VB'''t + A'VB't \qquad (39)$$

Si esta ecuación es dividida por $A'' \cdot VB'' \cdot o$

$$\frac{VB'' \cdot t}{VB'' \cdot o} = \frac{A'''VB'''t}{A'' \cdot VB'' \cdot o} + \frac{A'VB't}{A'' \cdot VB'' \cdot o}$$

Los términos del lado derecho de la ecuación se definen de la siguiente manera

$$\bar{v}B'''t = \frac{A'''VB'''t}{A'' \cdot VB'' \cdot o} = \frac{A'''VB'''t}{Q'' \cdot o} \; ;$$

$$\bar{v}B't = \frac{A'VB't}{A'' \cdot VB'' \cdot o} = \frac{A'VB't}{Q'' \cdot o}$$

Esta definición arbitraria de los cocientes de velocidad $\bar{v}B'''t$ y $\bar{v}B't$ simplifican la representación gráfica de las ecuaciones para tuberías compuestas.

El requerimiento de continuidad de flujo en la unión es entonces

$$\bar{v}B'' \cdot t = \bar{v}B'''t + \bar{v}B't$$

La ecuación conjugada de golpe de ariete para las ondas del tipo F entre B' y E es

$$HB't_1 - HEt_2 = \frac{a'}{g}(VB't_1 - VEt_2)$$

en donde

$$t_2 - t_1 = \frac{\alpha'}{a'}$$

Esta ecuación puede ser escrita de la siguiente manera

$$hB't_1 - hEt_2 = 2\bar{\rho}'(\bar{v}B't_1 - \bar{v}Et_2) \qquad (40)$$

donde

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$\bar{\rho}' = \frac{a' Q''_o}{2gHoA'}$$

La ecuación para las ondas del tipo f entre E y B' son

$$hEt_3 - hB't_4 = -2\bar{\rho}'(\bar{v}Et_3 - \bar{v}B't_4)$$

de manera similar las ecuaciones conjugadas de golpe de ariete para una tubería B" C

$$\rho'' = \frac{a'' Q''_o}{2gHoA''} = \frac{a'' V''_o}{2gHo}$$

y para una tubería B'''D

$$\bar{\rho}''' = \frac{a''' Q''_o}{2gHoA'''}$$

vemos que $\bar{\rho}'$ y $\bar{\rho}'''$ no son valores verdaderos de la constante de la tubería, pero son similares.

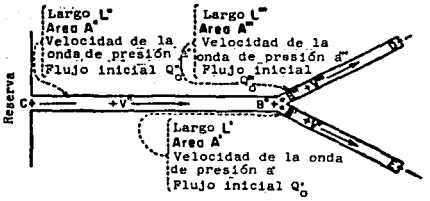


FIGURA 35

Considerando la instalación de la tubería con una conexión sin salida como se muestra en la Figura 36 y la gráfica del cierre de válvula de la misma figura. La solución gráfica se muestra en la Figura 36. Para esta solución el coefi--

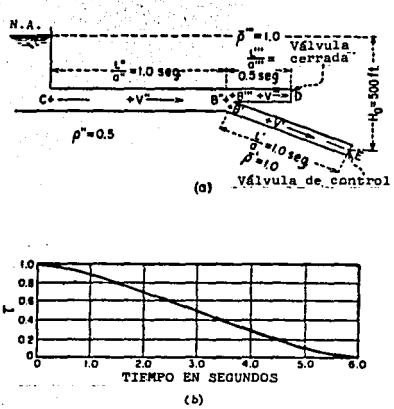
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ciente de presión se mantiene constante, el coeficiente de velocidad v=o se mantienen constante en D la rama sin salida.

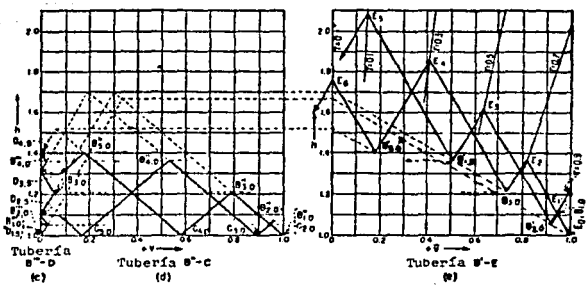
Si consideramos la Figura 37, que es un sistema compuesto con dos válvulas de control, dos juegos de parábolas se usan para acomodar el flujo variable de cada válvula. El punto inicial de la solución gráfica se localiza en el cociente de flujos de las ramas y la solución completa se muestra en la figura.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 36.

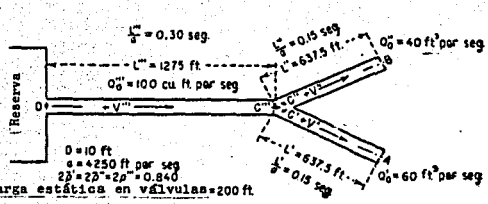


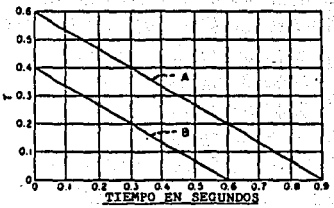
Relación del tiempo de cerrado de la válvula



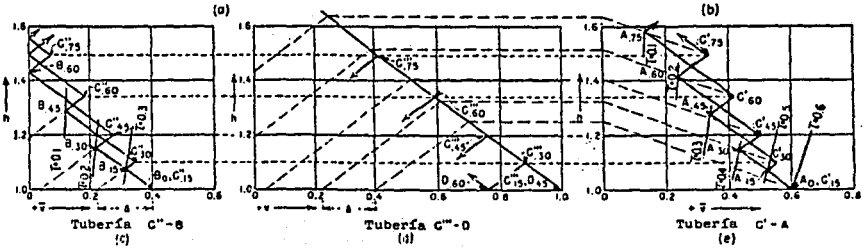
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 37.





Relación del tiempo de - cerrado de la válvula



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.3 METODOS DE SOLUCION

2.3.1 SOLUCION MATEMATICA.

La solución matemática del fenómeno de golpe de ariete - se basa en la Teoría de la Columna Rígida de Agua y en la Teoría de la Columna Elástica de Agua, como vimos anteriormente, hasta llegar a las Ecuaciones de Allievi o Ecuaciones Fundamentales del Golpe de Ariete, que son:

$$H - Ho = F\left(t - \frac{x}{a}\right) + f\left(t + \frac{x}{a}\right) \qquad (15)$$

$$V - Vo = -\frac{g}{a}\left[F\left(t - \frac{x}{a}\right) - f\left(t + \frac{x}{a}\right)\right] \qquad (16)$$

en donde Ho es igual a la carga para condiciones estables, H es la carga de oscilación; F y f son las ondas de presión que viajan en sentido positivo y negativo respectivamente; t es - el tiempo; a es la velocidad de la onda de presión y x es la distancia en el conducto de un punto a otro. Vo es la velocidad del fluido en condiciones estables y V es la velocidad -- del fluido cuando ocurre la oscilación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.3.2 METODO GRAFICO DE ANGUS PARA EL ANALISIS DEL GOLPE DE ARIETE.

La solución analítica de golpe de ariete, implica una serie extensa de cálculos para obtener una solución. Para obtener esta solución más rápidamente un método gráfico de análisis se ha desarrollado. El método es el siguiente:

De las ecuaciones fundamentales de golpe de ariete

$$H-Ho= F(t - \frac{x}{a}) + f(t + \frac{x}{a}) \qquad (15)$$

$$V-Vo= - \frac{g}{a} [F(t- \frac{x}{a}) - f(t + \frac{x}{a})] \qquad (16)$$

sustituyendo la ecuación 16 en la 15 tenemos

$$H-Ho= \frac{a}{g} (V-Vo) + 2 F (t - \frac{x}{a}) \qquad (41)$$

y la suma de las ecuaciones 15 y 16 nos da

$$H-Ho= - \frac{a}{g} (V - Vo) + 2f (t + \frac{x}{a}) \qquad (42)$$

Como la ecuación 41 contiene sólo el término de la onda F, esta ecuación define la relación de velocidad y carga en la tubería en términos de la onda F. De un modo similar, la ecuación 42 define la relación entre la carga y la velocidad en función de los términos de la onda f.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

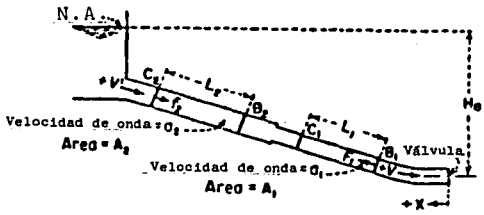


FIGURA 38

Considerando la tubería de la Figura 38. La sección más baja de la tubería es de diametro y espesor uniforme y tiene una velocidad de onda de a_1 mientras que en la sección superior de la tubería tiene una velocidad de onda de a_2. Si suponemos que hay una onda F_1 en B_1 en un tiempo t_1.

El movimiento hacia arriba de la tubería de esta onda con la velocidad a_1 y llega a C_1 en $t_2=t_1+L_1/a_1$ segundos. De modo similar supondremos que hay una onda f_2 en C_2 en un tiempo t_3. Esta onda se mueve para abajo en la tubería con una velocidad de a_2 y llega a B_2 en $t_4=t_3+L_2/a_2$. Ahora aplicamos la ecuación 41 en B_1 y C_1 y la ecuación 42 en B_2 y C_2

$$HB_1t_1 - HB_1to = \frac{a_1}{g}(VB_1t_1 - VB_1to) + 2F_1$$

$$HC_1t_2 - HC_1to = \frac{a_1}{g}(VC_1t_2 - VC_1to) + 2F_1$$

$$HC_2t_3 - HC_2to = -\frac{a_2}{g}(V'C_2t_3 - V'C_2to) + 2f_2$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$HB_2t_4 - HB_2to = -\frac{a_2}{g}(V'B_2t_4 - V'B_2to) + 2f_2$$

Después de eliminar F_1 y f_2 de estas ecuaciones y usando las siguientes relaciones

$HB_1to = HC_1to$ $\qquad$ $HC_2to = HB_2to$

$VB_1to = VC_1to$ $\qquad$ $V'B_2to = V'C_2to$

se obtienen las siguientes ecuaciones

$$HB_1t_1 - HC_1t_2 = \frac{a_1}{g}(VB_1t_1 - VC_1t_2) \tag{43}$$

$$HC_2t_2 - HB_2t_4 = -\frac{a_2}{g}(V'C_2t_2 - V'B_2t_4) \tag{44}$$

En la derivación de las ecuaciones 43 y 44, B_1 y C_1 son puntos arbitrarios en la parte baja de la tubería uniforme, mientras que B_2 y C_2 son puntos arbitrarios en la sección alta de la tubería.

De aqui que estas ecuaciones sean aplicables entre dos puntos cualesquiera, incluyendo los puntos finales en cualquier sección de la tubería uniforme.

Estas ecuaciones son reescritas para obtener los siguientes coeficientes:

$$h = \frac{H}{Ho}$$

$$\nu = \frac{V'}{Vo} = \frac{V'}{V'o}$$ para cerrado de la válvula

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$\nu = \frac{V}{Ve} = \frac{V'}{V'e}$ para abertura de la válvula

en donde Vo y V'o son las velocidades estables antes de empezar a mover las válvulas; Ve y V'e son las velocidades estables cuando la válvula se ha abierto completamente.

Así

$$hB_1t_1 - hC_1t_2 = 2\rho_1(\nu B_1t_1 - \nu C_1t_2) \quad (45)$$

$$hC_2t_3 - hB_2t_4 = -2\rho_2(\nu C_2t_3 - \nu B_2t_4) \quad (46)$$

de donde para el cierre de la válvula

$$\rho_1 = \frac{a_1Vo}{2gHo} \quad y \quad \rho_2 = \frac{a_2V'o}{2gHo}$$

y para la abertura de la válvula

$$\rho_1 = \frac{a_1Ve}{2gHo} \quad y \quad \rho_2 = \frac{a_2V'e}{2gHo}$$

Las ecuaciones 45 y 46 son las ecuaciones conjugadas de golpe de ariete, mientras que ρ_1 y ρ_2 son las constantes de la tubería. En un sistema coordenado de h y ν, las ecuaciones conjugadas están representadas por líneas rectas con una pendiente de $\pm 2\rho$ y pasan por puntos conocidos.

2.3.2.1 ECUACIONES DE DESCARGA DE LA VALVULA.

Cada ecuación conjugada de golpe de ariete, define una relación entre h y ν en un punto de una tubería uniforme en términos de h y ν en otro punto de la tubería bajo la acción del fenómeno de golpe de ariete. Para determinar explicita--

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

mente h y ν una segunda relación independiente es necesaria. - Para la operación de la válvula esta relación se determina de la descarga en la válvula. La descarga inicial bajo condiciones estables es:

$$VAo = Bo \sqrt{HAo}$$

y la descarga en cualquier instante de abertura de la válvula y carga se define como:

$$\nu A = B \sqrt{HA}$$

$$\nu A = r \sqrt{hA} \qquad (47)$$

$$\nu A = \frac{VA}{VAo} \; ; \quad hA = \frac{HA}{Ho} \; ; \quad r = \frac{B}{Bo}$$

También se ha derivado la ecuación 47 para el cerrado de la - válvula y se obtienen resultados idénticos poniendo $r = \frac{B}{Be}$ en - donde Be es el factor de abertura de la válvula al final del movimiento de la misma.

2.3.2.2 SOLUCION GRAFICA PARA EL CERRADO DE LA VALVULA.

La solución gráfica para el cerrado de la válvula que se muestra en la Figura 39A, B, de una forma simple, el aumento de carga en la válvula es determinado para intervalos de tiempo de 2 segundos. Desde que la onda viaja de A a E es 1 segundo. Las ecuaciones conjugadas de golpe de ariete para los puntos finales de la tubería son las siguientes:

$$hAo - hE_1 = +2\,(\nu Ao - \nu E_1) \qquad (a)$$

$$hE_1 - hA_2 = -2\,(\nu E_1 - \nu A_2) \qquad (b) \qquad (48)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$hA_2 - hE_3 = +2\ (\nu A_2 - \nu E_3) \qquad (c)$$

$$hE_3 - hA_4 = -2\ (\nu E_3 - \nu A_4) \qquad (d)$$

$$hA_4 - hE_5 = +2\ (\nu A_4 - \nu E_5) \qquad (e)$$

$$hE_5 - hA_6 = -2\ (\nu E_5 - \nu A_6) \qquad (f) \qquad (48)$$

En estas ecuaciones los cocientes de carga y velocidad h y ν en la válvula están indicados para tiempos de t = 0,2,4,6 segundos. De aqui que sólo la relación de descarga en la válvula en estos tiempos específicos es requerida en la solución del golpe de ariete, esto es como sigue:

$$\nu Ao = 1.0\ \sqrt{hAo} \qquad (m)$$

$$\nu A_2 = 0.7\ \sqrt{hA_2} \qquad (n)$$

$$\nu A_4 = 0.3\ \sqrt{hA_4} \qquad (o)$$

$$\nu A_6 = 0$$

$$\nu At = 0 \geq t > 6 \text{ seg.} \qquad (49)$$

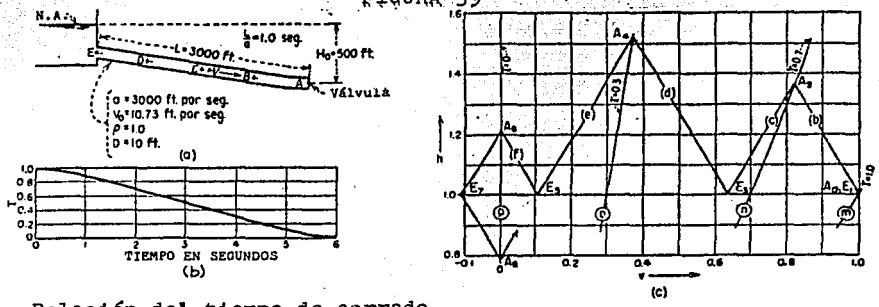
Las ecuaciones 48 y 49 se resuclven ahora simultaneamente por el siguiente método gráfico:

En un sistema de ejes coordenados ν y h las parábolas m,n,o y p son graficadas para valores de r= 1.0, 0.7, 0.3, 0.0, como se muestra en la Figura 39C. La parábola r=o coincide con el eje vertical en ν=o. El punto Ao anterior al movimiento de la válvula está localizado en las coordenadas h=1 y ν=1. Si el efecto del movimiento de la válvula no se acerca al depósito final de la tubería hasta después de que la onda viaje un

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

segundo, E_1, es también localizado en el mismo punto que Ao. La ecuación 48a es representada como un punto en el diagrama en h=1, v=1. La ecuación 48b es la de una línea recta con una pendiente -2ρ que pasa a través del punto E_1. Si el punto correspondiente a A_2 es también localizado en la parábola n y la línea de pendiente b, debe ser localizado en la intersección de estas dos líneas como se muestra en la figura. La ecuación 48c es la ecuación de una línea recta con una pendiente de 2ρ que pasa a través del punto A_2. Para un nivel constante del depósito E_3 es localizado en el eje horizontal en h=1. Los puntos correspondientes a A_4, E_5, A_6, E_7, A_8, etc., son determinados de la manera que se muestra en la figura.

FIGURA 39



Relación del tiempo de cerrado de la válvula

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

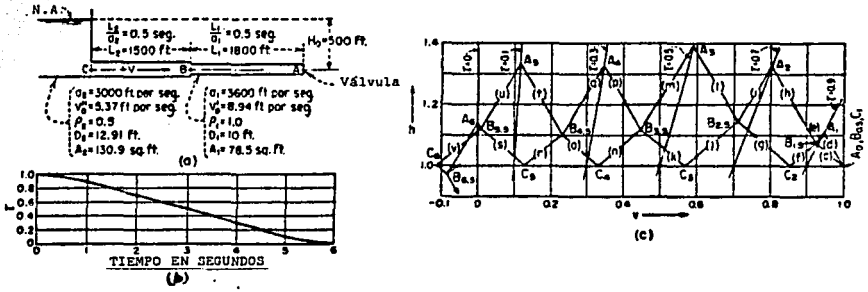
El método gráfico del análisis de golpe de ariete consiste esencialmente de la solución de ecuaciones simultáneas graficamente. Un grupo de ecuaciones depende por lo general a los valores de r, la efectividad de abertura de la válvula que es especificada. Estas relaciones de válvula están representadas por las parábolas en la gráfica h-v. Un segundo grupo de ecuaciones se obtiene de las ecuaciones conjugadas de golpe de ariete. Estas ecuaciones son representadas en la gráfica h-v por líneas con pendientes $\pm 2\rho$. Las intersecciones de las líneas de las pendientes y las parábolas determinan los coeficientes de la carga y la velocidad en la válvula y las intersecciones de las líneas de pendientes con la línea horizontal h=1, determinan estos coeficientes en el depósito final de la tubería.

2.3.2.3 SOLUCION PARA UNA TUBERIA CON CAMBIO DE DIAMETRO.

Cuando se usan las ecuaciones conjugadas en la solución del golpe de ariete, los factores que se consideran son la ρ, la constante de la tubería y el tiempo de viaje de la onda entre dos puntos. Para una tubería con un cambio en su sección transversal o velocidad de onda, estas ecuaciones conjugadas se aplican al final de cada sección uniforme. En la gráfica h-v, la presentación de estas ecuaciones es similar a la que vimos anteriormente con la excepción de que un grupo de ecuaciones conjugadas son representadas por las líneas de pendien

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 40.



Relación del tiempo de cerrado de la válvula.

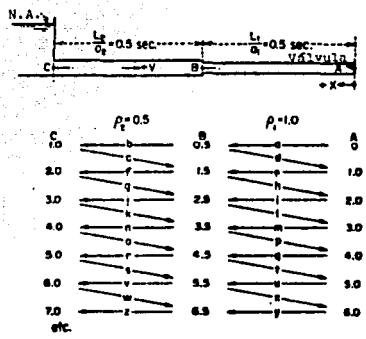
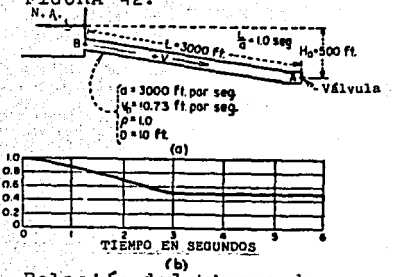
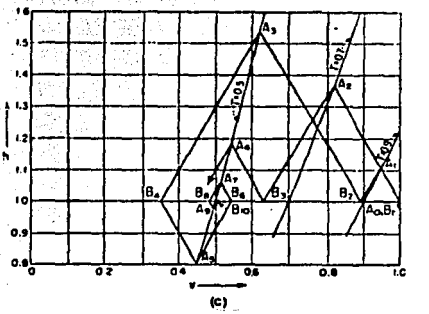


FIGURA 41

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

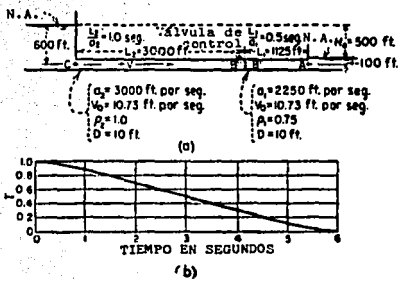
FIGURA 42.

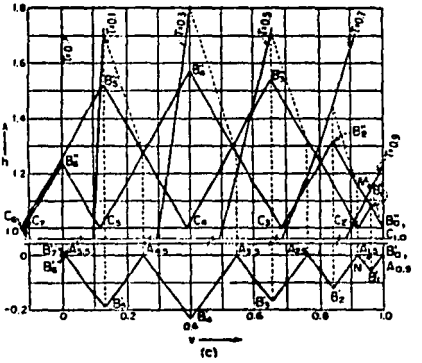




Relación del tiempo de cerrado de la válvula.

FIGURA 43.





Relación del tiempo de cerrado de la válvula.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

te $\pm 2\rho_1$, mientras que el otro grupo tiene líneas de pendiente $\pm 2\rho_2$. Por ejemplo la Figura 40. Las ecuaciones conjugadas - que se aplican para intervalos de tiempo de un segundo (viaje redondo), para las secciones de tubería AB y BC se indican en la Figura 41. La representación gráfica de estas ecuaciones se muestra en la Figura 40C.

2.3.2.4 SOLUCION PARA EL CERRADO PARCIAL DE LA VALVULA.

Cuando la válvula de control se cierra sólo en parte y - se mantiene así, siendo la fricción en la tubería desprecia-- ble, las reflexiones parciales con la válvula abierta, retor- nan rápido a un valor estable, como se muestra en la Figura - 42.

2.3.2.5 SOLUCION PARA CUANDO LA VALVULA DE CONTROL SE ENCUEN TRA FUERA DEL FINAL DE LA TUBERIA.

Si consideramos la tubería mostrada en la Figura 43A, B, y la relación de cerrado de válvula de la misma figura. Si - el viaje redondo de onda que ocurre en ambas secciones de la tubería es de un segundo, este intervalo de tiempo es usado - en los cálculos de golpe de ariete. La descarga a través de la válvula varía con $\sqrt{hB''t - hB't}$. Conforme se cierra la -- válvula, las ondas de presión que se forman en B' y B" que se mueven hacia A y C. En la solución de Bo" y C_1 es localizada en h=1, v=1 como se muestra en la Figura 43C. Se grafica una

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

línea de $C_{0.5}$ con pendiente de $-2\rho_2=-2$ en donde se localiza B_1''. De manera similar se grafica una línea de $A_{0.5}$ con -- una pendiente de $+2\rho_1=1.5$ en donde B_1' tiene que ser localizado. Si el flujo de ambos lados de la válvula de control son iguales B_1'' y B_1' son localizados en la misma línea vertical. Más que nada, estos dos puntos son localizados de manera que la distancia vertical del punto B_1'' a la parábola correspondiente a r=0.9 es la misma que la distancia vertical de la línea horizontal h=o a $B'_{1.0}$ que es $B_1'N = B_1''M$. La razón para ésto es que para t=1 seg., el flujo a través de la válvula es $\nu B'_1 = \nu B''_1 = 0.9\sqrt{hB''_1 - hB'_1}$.

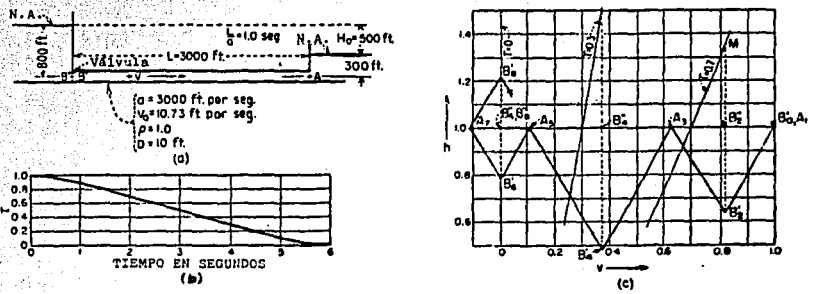
Un simple método para localizar los puntos $B'_{1.0}$ y $B''_{1.0}$ se grafica con líneas punteadas con una pendiente de $-2(\rho_1+\rho_2)$ que intersecta la parábola correspondiente a r=0.9 en el punto M. Entonces $B'_{1.0}$ y $B''_{1.0}$ son localizados en la línea vertical que pasa a través del punto M.

Si la válvula de control está localizada en la parte superior de la tubería. Considerando la tubería de la Figura 44A, B, la relación del tiempo de cerrado de la válvula se muestra en la misma figura. Para esta tubería hB" t=1. De aqui que la solución del golpe de ariete mostrada en la Figura 44C se obtiene localizando los puntos B_2', B_4', B_6' de manera que la misma línea vertical, la distancia B" M encima de

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

la línea horizontal h=1 a la parábola para cada abertura de la válvula es igual a B" B' abajo de la h=1. La solución indica que la máxima caida de carga en la válvula es 0.53Ho y el máximo aumento de presión es de 0.22Ho.

FIGURA 44.



Relación del tiempo de cerrado de la válvula.

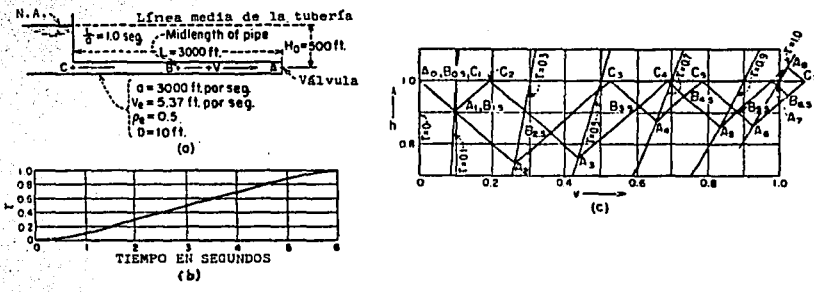
2.3.2.6 GOLPE DE ARIETE PRODUCIDO POR LA ABERTURA DE LA VALVULA.

Cuando el flujo de agua en un conducto de presión es retardado, la energía cinética del agua es convertida en energía potencial con evidencia de incremento en la presión hidrostática. Reciprocamente cuando el flujo de agua en un conducto cerrado se aumenta, la energía se convierte en un movimiento con una consecuente reducción de presión hidrostática.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Por ejemplo, si consideramos la tubería de la Figura 45A, B, y la eficiencia de abertura de la misma figura. Las parábolas correspondientes a los valores de r para un segundo de intervalo se muestran en la Figura 45C. La velocidad inicial del agua en la tubería es cero y de aqui que el punto inicial de la solución gráfica en la gráfica h-v es el punto h=1, v=o. Esto localiza a los puntos Ao, $B_{0.5}$ y $C_{1.0}$.

FIGURA 45.



Relación del tiempo de cerrado de la válvula.

Después de la caída inicial de presión debido a la abertura de la válvula un aumento de presión arriba de lo normal ocurre debido a la reflexión de las ondas de golpe de ariete que regresan del depósito. El máximo aumento de carga debido a la abertura de la válvula cuando está inicialmente cerrada

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

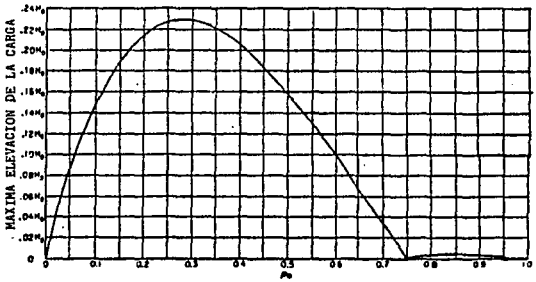


FIGURA 46

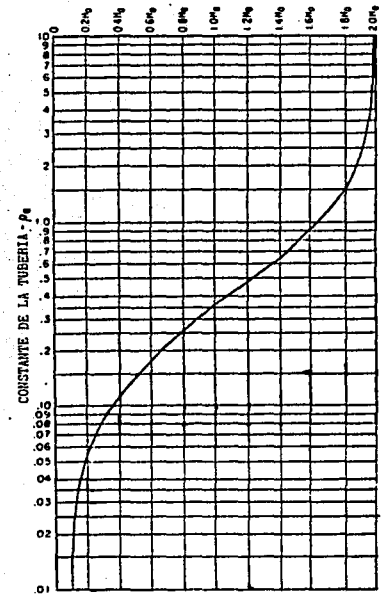


FIGURA 47. Máximo aumento de carga en la válvula debido al - movimiento ritmico en la misma.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

y es abierta a su posición final en 2L/a segundos o menos y se mantiene allí. En este tipo de abertura, el aumento de presión depende inicialmente de la constante e de la tubería. De aqui que los resultados de la solución del golpe de ariete pueden ser mostrados en la Figura 46. De esta figura vemos que el máximo aumento de carga producido por la abertura de una válvula de cero es 0.23Ho.

Bajo ciertas condiciones de operación de la válvula, es posible obtener una abertura o cierre rítmico. Ciertas condiciones se han observado como por ejemplo en las turbinas hidráulicas debido a la acción del gobernador. Si el movimiento de la válvula está en fase con el movimiento de las ondas del golpe de ariete un considerable aumento de carga puede ocurrir. Si el aumento de presión es debido a este tipo de movimiento que depende sólo de ρe. Los resultados de todas las soluciones posibles se indican en la Figura 47. De esta figura vemos que si e aumenta, el máximo aumento de presión se aproxima a 2Ho como un límite.

2.3.2.7 GOLPE DE ARIETE PRODUCIDO POR EL MOVIMIENTO UNIFORME DE LA VALVULA.

Cuando la abertura efectiva de la válvula varía uniformemente con respecto al tiempo el movimiento de la válvula es conocido como movimiento uniforme de la válvula. Para este

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

tipo de movimiento no es necesario hacer un análisis gráfico para cada tubería y cierre de válvula, debido a que los resultados de un sin-número de soluciones son mostrados en gráficas. La Figura 48 nos muestra una de estas gráficas para cierre uniforme de válvula hasta estar completamente cerrado. Para determinar el máximo aumento de carga en la válvula es necesario calcular las características de la tubería ρ y el tiempo de cerrado de la válvula en los términos de intervalos de tiempo de 2L/a, que es:

$$N=\frac{Ta}{2L} \tag{50}$$

El valor de κ es entonces leído de la gráfica y el aumento de carga se determina por la relación

$$\Delta H = 2\rho\kappa Ho \tag{51}$$

Cuando $N \leq 1$ esto es, cuando el cierre completo es terminado en un tiempo igual o menor a 2L/a segundos, $\kappa=1$ y $\Delta H=2\rho Ho$, para cierres rápidos de válvula en aumento de carga es también igual a $-\frac{a}{g}\Delta V$ como se define en la ecuación 29.

Si el cierre de válvula puede ser cumplido de cualquier posición inicial de la válvula en la misma proporción uniforme, el máximo aumento de carga en la válvula se realiza en exactamente 2L/a segundos. Esto se ilustra en la Figura 49. Cuando la abertura efectiva de la válvula desde su posición inicial de cerrado completo es uniforme con respecto al tiem-

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

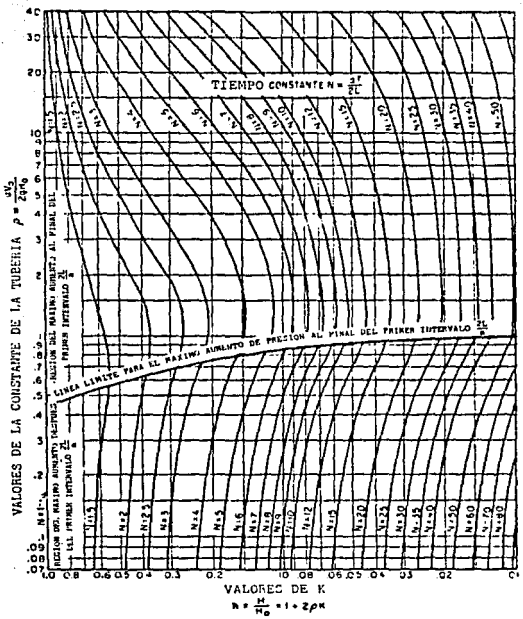


FIGURA 48. Carta de Ray para movimientos uniformes de la válvula

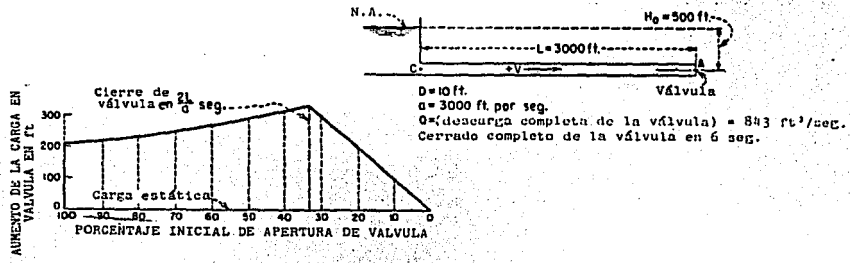


FIGURA 49. Aumento de la carga en la válvula debido al cierre uniforme desde diferentes posiciones iniciales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

po, el mínimo aumento de carga en la válvula, se encuentra -- que ocurre en 2L/a segundos después de comenzar el movimiento de la válvula. Si la abertura comienza de la posición de cerrado

$$h\ min. = (-\kappa + \sqrt{\kappa^2+1})^2 \qquad (52)$$

donde

$\kappa = LVe/gHoT$

En esta ecuación Ve es la velocidad final estable del agua en la tubería después de haber completado el movimiento de válvula. Esta ecuación es aplicable cuando $T \geq 2L/a$ segundos y su - solución se facilita con el uso de la Figura 50.

Cuando $T \leq 2L/a$ segundos, el cambio de carga es igual a $-\frac{a}{g}\Delta V$ como se define en la ecuación 29.

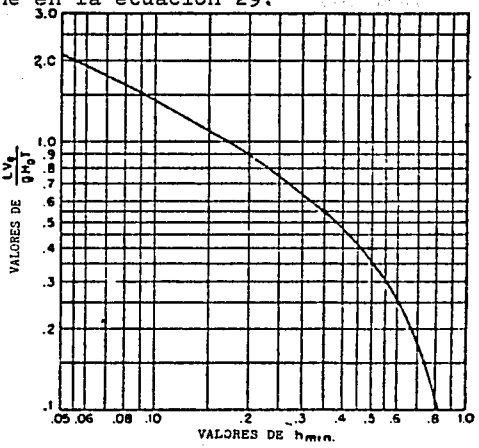


FIGURA 50. Mínima carga debido a la abertura uniforme de la válvula.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.3.3 METODO DE LAS CARTAS DE ALLIEVI.

Lorenzo Allievi, desarrolló unas cartas que son probablemente las más usadas para la solución rápida de Problemas de Golpe de Ariete.

Por las limitaciones a que están sujetas estas cartas, dos consideraciones se deben tomar en cuenta:

a) El área de la tubería en la válvula de control aumenta o disminuye linealmente con respecto al tiempo.

b) La velocidad de salida en la tubería en cualquier instante es proporcional a la raíz cuadrada de la suma de la carga en estado estable más la carga de Golpe de Ariete.

Con el uso de las cartas de Allievi se ahorra mucho tiempo en la determinación de la carga máxima.

Para su uso dos parámetros básicos son usados:

a) La constante de la tubería

$$\rho = \frac{a\ Vo}{2gHo} \qquad (53)$$

b) La constante de tiempo

$$\sigma = \frac{aT}{2L} \qquad (54)$$

De las consideraciones anteriores tenemos que:

$$Z^2 = \frac{Ho + hmax.}{Ho} \qquad (55)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

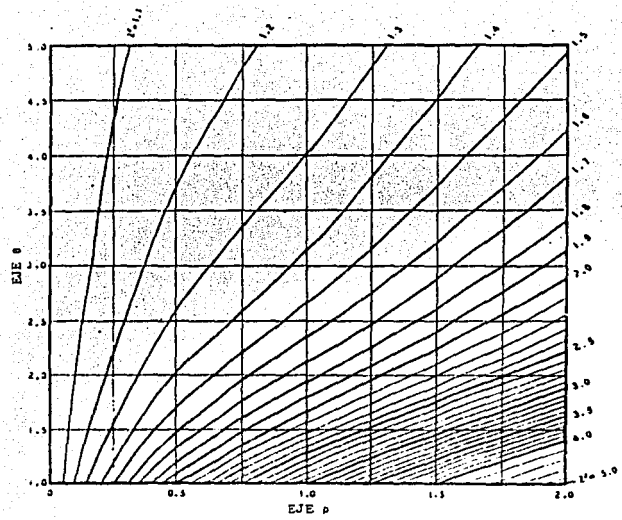


FIGURA 51. Diagrama de Allievi (Máximo aumento de presión con movimiento uniforme de la válvula).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

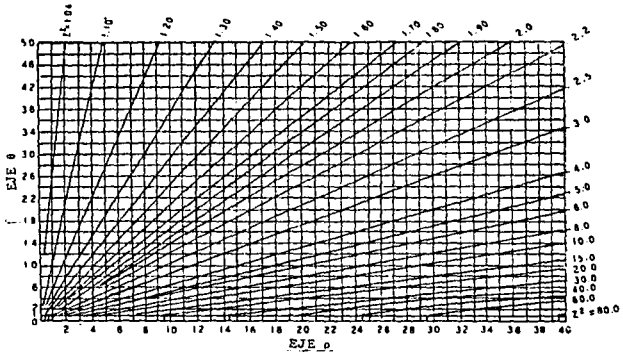


FIGURA 52. Diagrama de Allievi.
(Máximo aumento de presión para movimiento uniforme de la válvula)

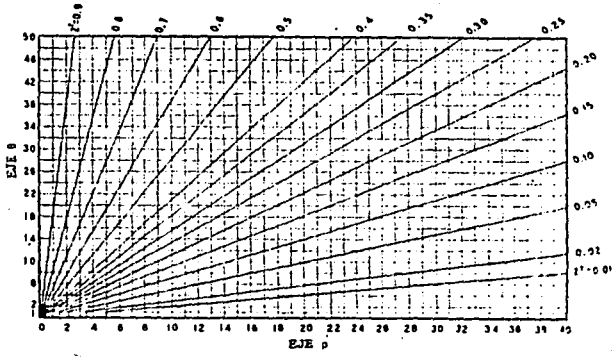


FIGURA 53. Diagrama de Allievi.
(Máxima caída de presión para movimiento uniforme de la válvula)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.1 DESCRIPCION

Básicamente podemos decir, que un acumulador es un depósito para el almacenamiento de la presión en el que un fluido no-compresible se conserva a una presión ejercida por una --- fuente externa. Este fluido a presión se encuentra disponi-- ble para emplearse como manantial de reserva de energía fluida, y aunque se haya bombeado al acumulador por pulsación o - en flujo irregular, el flujo de descarga es regular.

Podemos clasificar a estos órganos en dos grandes gru--- pos: en acumuladores de presión constante y acumuladores de - presión variable durante la carga y la descarga.

A la primera categoría pertenece el acumulador por gravedad o contrapeso. Funcionan con presión variable, el acumulador de resortes y todos los tipos que utilizan gases comprimidos: el de nivel libre, los de pistón separador, el de vasija y el de diafragma elástico. Aunque los diseños de cada tipo difieren mucho entre sí, sus rendimientos y los resultados -- que con ellos se obtienen son bastantes parecidos.

Entre los tipos de aplicaciones para las que son adecuados los acumuladores, figuran las siguientes: supresión de -- los choques hidráulicos; reposición del fluido en un sistema

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III. ACUMULADORES HIDRAULICOS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.1 DESCRIPCION

Básicamente podemos decir, que un acumulador es un depósito para el almacenamiento de la presión en el que un fluido no-compresible se conserva a una presión ejercida por una --- fuente externa. Este fluido a presión se encuentra disponi-- ble para emplearse como manantial de reserva de energía flui- da, y aunque se haya bombeado al acumulador por pulsación o - en flujo irregular, el flujo de descarga es regular.

Podemos clasificar a estos órganos en dos grandes gru--- pos: en acumuladores de presión constante y acumuladores de - presión variable durante la carga y la descarga.

A la primera categoría pertenece el acumulador por grave dad o contrapeso. Funcionan con presión variable, el acumula dor de resortes y todos los tipos que utilizan gases comprimi dos: el de nivel libre, los de pistón separador, el de vasija y el de diafragma elástico. Aunque los diseños de cada tipo difieren mucho entre sí, sus rendimientos y los resultados -- que con ellos se obtienen son bastantes parecidos.

Entre los tipos de aplicaciones para las que son adecua- dos los acumuladores, figuran las siguientes: supresión de -- los choques hidráulicos; reposición del fluido en un sistema

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

hidráulico cerrado; compensación de las pérdidas; fuente de energía suplementaria en caso de que falle la fundamental; mantenimiento de presiones elevadas durante períodos de tiempo largos, cuando la bomba no este capacitada para ello o ésta no funcione.

Los acumuladores se emplean en conjunción con los sistemas hidráulicos en prensas hidráulicas grandes, maquinaria agricola, dispositivos de arranque de motores diesel, camas de hospital, frenos hidráulicos y mecanismos del tren de aterrizaje de los aviones, cierres de escotillas de buques, carretillas elevadoras y otros dispositivos y máquinas diversas.

3.2 TIPOS PRINCIPALES DE ACUMULADORES HIDRAULICOS.

3.2.1 EL ACUMULADOR DE GRAVEDAD O CONTRAPESO.

Este acumulador consiste, fundamentalmente de un pistón provisto de un contrapeso, que se mueve en el interior de un cilindro, ejerciendo presión sobre el fluido. El contrapeso puede estar constituído por hormigón, arrabio, chatarra de -- hierro, acero o por cualquier otro material pesado. El émbolo de este tipo de acumulador puede estar ajustado con precisión en el cuerpo de aquel para que las figuras se reduzcan a un mínimo. Por regla general, el cuerpo suele acabarse por - rectificado con muela para asegurar que la junta de retención sea de duración larga, así como también para reducir la fricción.

Un método de arranque y de detención de la unidad de bombeo se indica en la Figura 54. Cuando el acumulador se vacía la excéntrica de la palanca de conmutación entre el contacto con el disyuntor LS-2 para poner en marcha la unidad de bom-- beo, y, a medida que ésta llena el acumulador, la excéntrica dispara el disyuntor LS-1 para detener la bomba.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

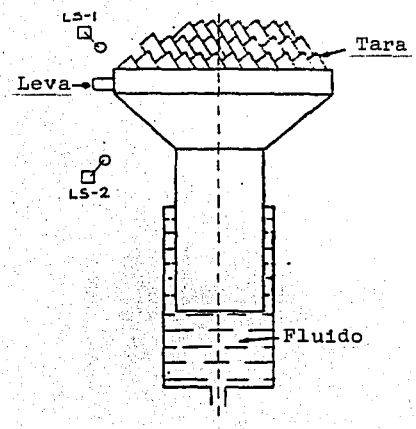


FIGURA 54

La gran ventaja de este tipo de acumulador es que la presión permanece constante durante toda la carrera o hasta que se haya gastado el fluido. Porque si w es el peso total que gravita sobre el pistón y S la sección del mismo, se origina en el circuito hidráulico una presión p=w/S que no varía cualquiera que sea la posición del pistón; lo que varía es la --- energía acumulada o cedida por éste, que depende justamente - de su altura relativa en el cilindro.

Otra ventaja de este tipo de acumulador es que puede su-

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ministrar grandes caudales de fluido a presión elevada. El caudal está tan sólo condicionado por el ingenio del fabricante para producir grandes piezas de elevada precisión, como, por ejemplo, cuerpos de cilindros y pistones. El caudal tan elevado de fluido determina que sea posible suministrar presión a varios circuitos hidráulicos. En otras palabras, podemos decir, que el acumulador hace las veces de estación central y distribuye presión a los circuitos de un cierto número de máquinas.

Las desventajas de los acumuladores de contrapeso son las siguientes: son muy voluminosos, especialmente aquellos que entregan grandes presiones y caudales. La sección sobre la cual descansa el contrapeso debe estar muy bien soportada. Los tamaños mayores suelen ser caros y fabricarse en el sitio de operación debido a su tamaño.

3.2.2 EL ACUMULADOR DE MUELLE O RESORTE.

Existen varios tipos de acumuladores de muelle o de resorte, que, por lo general, suelen ser más pequeños y menos caros que los de contrapeso. Sean del tipo de muelle sencillo o múltiple, como se ve en la Figura 55, el resorte o resortes actúan sobre un pistón hidráulico para introducir fluido en el sistema.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

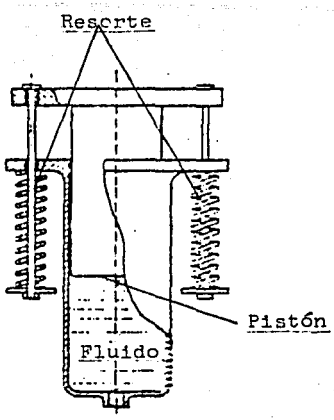


FIGURA 55

Los acumuladores de muelle sólo entregan un pequeño caudal de fluido a una presión relativamente baja y, además, la que se ejerce sobre el fluido no es constante, al revés de lo que ocurre en el de contrapeso. A medida que los muelles se comprimen, la presión del acumulador alcanza su valor máximo, y cuando éstos tienden a su longitud normal, dicha presión -- llega al mínimo. En este caso, también el volumen depende de la luz y de la carrera del acumulador. En los circuitos que emplean este tipo de acumulador suele haber un conmutador accionado por la presión, provisto por un mecanismo para poner

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

en marcha la bomba cuando aquella desciende hasta un cierto - nivel, y pararla cuando se alcanza la presión máxima.

En conclusión, cuando el volumen del líquido a acumular y la presión requerida son de cierta magnitud, los resortes - necesarios y el espacio ocupado adquieren proporciones considerables; si a ello se agrega la característica esencialmente desfavorable de la variación de la reacción elástica en función de la carrera, se llega a la conclusión de que tales acumuladores tienen un empleo todavía más limitado que los de -- contrapeso, que por lo menos ofrecen la ventaja de funcionar a presión constante.

3.2.3 ACUMULADORES ACCIONADOS POR AIRE O POR GAS.

Los acumuladores de nivel libre, es decir, los que carecen de elementos de separación entre el líquido y el gas comprimido, se usan preferentemente en instalaciones a base de - agua, y pueden absorber y suministrar volúmenes a menudo considerables. Puede tratarse de bombonas individuales en cuya parte superior se encuentra el gas a presión, o bien de una - primera bombona parcialmente llena de líquido y puesta en comunicación con una serie de recipientes análogos cuya función es exclusivamente neumática, como se muestra en la Figura 56; en este segundo caso, el sistema posee mayor elasticidad frente a las variaciones de presión que tienen lugar en el circui

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

to. Para evitar el trasvase de líquido de la primera bombona a las demás y para impedir la entrada de gas en las tuberías de líquido, se emplean sistemas adecuados de control de nivel, que abren o cierran automáticamente el paso. Para dar al gas la presión inicial necesaria (precarga), y para compensar las inevitables fugas, se acostumbra a utilizar un compresor. Los sistemas de acumulación de este tipo son especialmente adecuados en grandes instalaciones fijas a base de agua y suministran su energía muy gradualmente; en cambio, no tienen casi empleo práctico en el campo oleodinámico, donde se tiende cada vez más a concentrar energías elevadas en dispositivos que ocupen relativamente poco espacio.

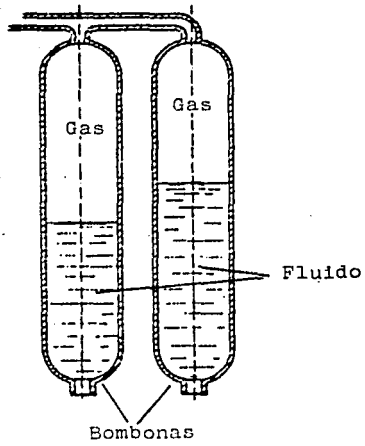


FIGURA 56

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Precisamente para conseguir elevadas y eficientes concentraciones de energía en un espacio mínimo se han ideado acumuladores capaces de contener y de separar a la vez el gas y el líquido; este sistema, además de permitir el montaje del aparato en posiciones distintas de la vertical (condición indispensable en acumuladores por gravedad o en los de nivel libre), evita la necesidad del compresor para compensar la absorción de gas por el líquido y las irregularidades de funcionamiento debidas a la presencia de gas en el circuito de trabajo. El elemento de separación puede ser un pistón flotante (es decir, sin vástagos), o bien una membrana elástica, como se ve en las Figuras 57, 58 y 59. En el primer caso el acumulador tiene todavía la forma y las características de un cilindro rectificado interiormente, provisto de dos cabezales - con las acometidas respectivamente para la introducción de la precarga de gas y para la conexión con el circuito líquido -- dentro del cual desliza libremente el pistón; la estanquiedad asegurada por medio de juntas apropiadas, resulta generalmente satisfactoria hasta presiones de 2,000 a 3,000 lb./in2. Por encima de estos valores puede producirse un sensible aumento del juego entre pistón y cuerpo exterior como consecuencia de la dilatación de este último.

El acumulador de pistón puede presentar además cierta inercia, originada por la masa del pistón o por el rozamiento

que oponen las juntas.

Frente a estos aspectos desfavorables, el acumulador de pistón presenta en cambio ciertas ventajas con respecto a los de vasija o de diafragma elástico; mayor seguridad de funcionamiento, puesto que no hay que temer ninguna avería súbita por rotura del diafragma de goma; posibilidad de utilizar todo el volumen útil del acumulador; ninguna limitación en la relación entre la presión del circuito y la presión de precarga del nitrógeno; simplicidad de mantenimiento, que se reduce a la sustitución de las juntas; duración prolongada de servicio incluso con fluidos inflamables, dado que la superficie crítica expuesta a ellos es mínima; posibilidad de trabajo en cualquier posición.

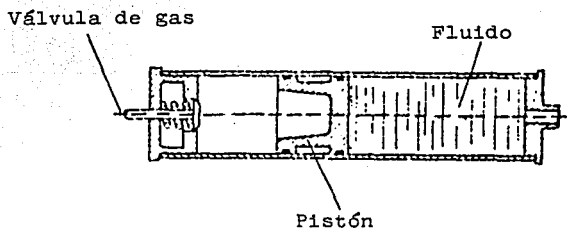


FIGURA 57

El acumulador neumático de vasija está constituído por -

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

una bolsa o vasija de material sintético que se carga previamente con aire o nitrógeno a una presión determinada. Esta vasija se coloca dentro de la envuelta del acumulador y el espacio restante se llena con el líquido. Cuando la unidad de bombeo introduce más líquido en la envuelta, se comprime el gas encerrado en la vasija para constituir así una reserva de presión. Cuando se extrae del acumulador, la vejiga se dilata e introduce líquido a presión en el circuito. Despreciando cualesquiera efectos del cambio de temperatura, la presión que la masa de gas ejerce sobre el fluido disminuye ya que dicha masa no varía cuando la vejiga se dilata, al aumentar el volumen.

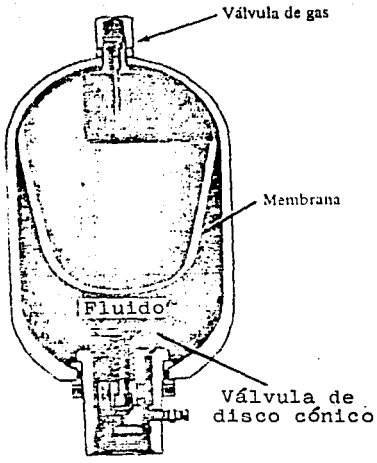


FIGURA 58

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los acumuladores de diafragma elástico son generalmente de constitución esférica, y se constituyen de dos semiesferas atornilladas en su periferia, con un diafragma de goma sintética prensado entre ellas. Su funcionamiento es muy similar al de vasija elástica. La gran ventaja de estos acumuladores es su bajo peso y su reducido tamaño lo que los hace muy usados en aplicaciones aeronaúticas.

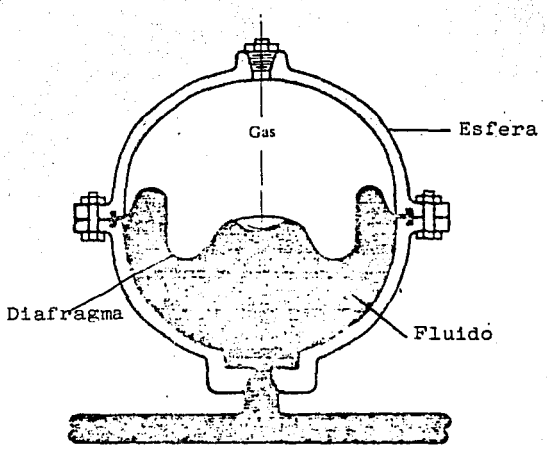


FIGURA 59

Las ventajas de los acumuladores neumáticos son las siguientes: compacidad, número pequeño de piezas funcionales y baratura, y su único incoveniente, en lo que se refiere a los pistones, es que como ocurre con los de vasija y diafragma,

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

la presión no permanece constante cuando la totalidad de la - carga de fluido se desplaza.

3.3 DIFERENTES APLICACIONES DE LOS ACUMULADORES HIDRAULICOS.

Existen diversas aplicaciones dentro del campo hidráulico y oleodinámico para los acumuladores hidráulicos.

Dependiendo de las características de operación e instalación en el sistema se utiliza uno u otro tipo de acumulador. En los incisos posteriores se tratarán brevemente algunas de las aplicaciones que éstos tienen.

Por ser el tema principal de esta tésis, la aplicación de los acumuladores hidráulicos de vasija elástica a la amortiguación del golpe de ariete se estudiará ampliamente más adelante.

3.3.1 ACUMULADOR DE CONTRAPESO EMPLEADO EN UN CIRCUITO DE PRESION DOBLE.

El circuito de la Figura 60 puede emplearse satisfactoriamente con un prensa hidráulica, ya que es susceptible de satisfacer las exigencias requeridas en un determinado momento por el aumento de la capacidad. En este circuito la unidad de bombeo está constituida por una bomba de baja presión y de caudal elevado y otra de alta presión y pequeño caudal. El operario acciona la palanca de la válvula de cuatro vías (1), desplazando su émbolo para que el caudal de ambas bombas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

unido al aceite almacenado en el acumulador se descargue en - el fondo ciego del cilindro de la prensa (2) y el porta-herramienta desciende rápidamente a baja presión. Cuando este último entre en contacto con la pieza que se trabaja, la presión comienza a aumentar inmediatamente, cerrando el conmutador de presión (3) que, a su vez, energiza el solenoide de la válvula (4), desplazando su émbolo y dirigiendo el gasto de - la bomba de caudal elevado hacia el acumulador, para volver a cargarlo. La bomba de pequeño caudal y alta presión sigue -- funcionando (aunque ahora a presión elevada) y el porta-herramienta termina su desplazamiento en sentido descendente comprimiendo un casquillo contra la pieza.

A continuación el operario desplaza la palanca de la válvula (1) para devolverla a su posición inicial, y ambas bombas, en conjunción con el acumulador, envían aceite al fondo del vástago del cilindro de la prensa, haciendo retroceder su pistón.

En la posición de retroceso, se vuelve a cerrar el interruptor automático (3), con lo que el solenoide de la válvula (4) se energiza y la bomba de pequeño caudal mantiene la presión de aceite necesaria para sostener el porta-herramienta, mientras que la de caudal grande está cargando de nuevo el acumulador. Las válvulas de retención se emplean para evitar

que se mezclen las presiones altas y bajas, mientras se están aplicando simultáneamente durante el ciclo. Se emplean dos válvulas de seguridad, una en la conducción de cada bomba.

Empleando un acumulador, el tamaño de la bomba de baja presión puede reducirse considerablemente, con el ahorro consiguiente derivado de la pequeña potencia que se precisa.

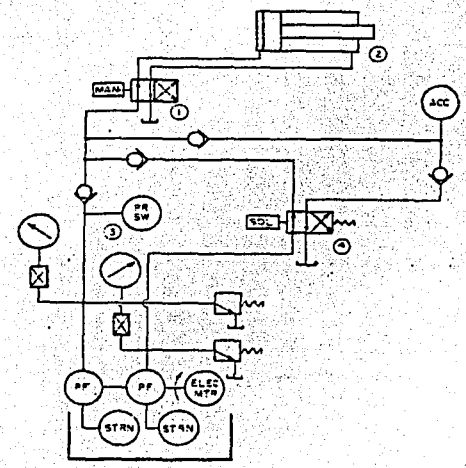


FIGURA 60

3.3.2 ACUMULADOR DE RESORTE EMPLEADO COMO FUENTE SECUNDARIA DE ENERGIA.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El circuito de la Figura 61 presenta una de las aplicaciones más corrientes de los acumuladores, que no es más que la de hacer las veces de fuente de energía de reserva a la que se puede recurrir en un momento dado. De hecho, ésta es una fuente secundaria de energía, ya que la unidad de generación es la primaria. Por ejemplo, los cilindros de diametro interior grande que funcionan a velocidades pequeñas necesitan un gran caudal de aceite. No es económico emplear una bomba de semejante capacidad de modo discontinuo, debido tanto al tamaño de la unidad de bombeo como al calor que puede llegar a desarrollarse. El acumulador representa la solución de los problemas planteados por muchas aplicaciones de este tipo en las que median intervalos suficientes de tiempo entre los ciclos de trabajo, para que el acumulador almacene fluido y lo tenga en reserva hasta que llegue el momento en que sea preciso recurrir a él.

En el circuito indicado se emplea un acumulador de resorte. El operario coloca la pieza en el carro desplazable (1) y acciona la palanca de la válvula de dos posiciones y cuatro vías (2), para que el aceite fluya del acumulador al fondo ciego del cilindro (1). El pistón avanza a una velocidad que se regula con la válvula de regulación del caudal (3), hasta que el carro desplazable (1) llega al final de su carrera y se efectúa la operación de curado.

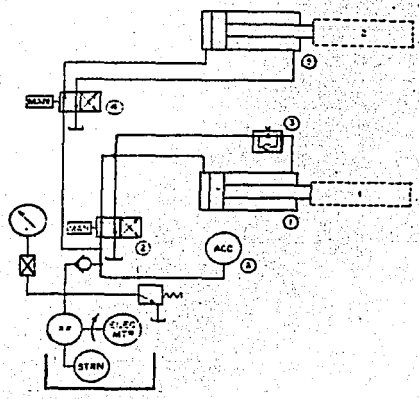


FIGURA 61

Mientras el operario está colocando la pieza en el carro desplazable (2) se carga el acumulador A. A continuación, el operario acciona la palanca de válvula maestra (4) y el aceite fluye del acumulador A hacia el fondo ciego del cilindro - del carro desplazable (5), y éste, ya cargado, se coloca en - la posición necesaria para trabajar la pieza.

A continuación, el operario acciona la palanca de la válvula (2) y el aceite procedente del acumulador A y de la unidad de bombeo fluye rápidamente hacia el fondo del vástago -- del cilindro (1) y el carro se desplaza hasta la posición de

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

menta la presión, se abre la válvula de secuencia (3) y el aceite fluye hacia las conexiones piloto de las válvulas (5) y (6), actuando sobre éstas y permitiendo que el que viene del acumulador (7) a través de la válvula (6) se dirija al fondo ciego del cilindro (8) y el que procede del acumulador (9) a través de la válvula (5) vaya al fondo ciego del cilindro --- (10). Los pistones de los cilindros (8) y (10) se desplazan uniformemente porque los acumuladores (7) y (9) hacen las veces de depósitos, almacenando las mismas cantidades de aceite cuando se cargan y evacuando idénticas cantidades en el mismo tiempo cuando se descargan. En otras palabras, auxiliados -- por los controles (12) y (13), actúan como igualadores de flujo.

Una vez que la operación se ha completado, el operario - acciona la palanca de la válvula (1) para llevarla a su posición inicial, y el aceite fluye hacia los fondos de los vástagos de los cilindros (8) y (10) para desplazar de nuevo los - pistones; a continuación, la presión vuelve a aumentar hasta abrir la válvula de secuencia (11), el aceite se dirige hacia los fondos de los vástagos de los cilindros de sujeción (2) y las garras que fijan la pieza en la bancada se aflojan. Los acumuladores se cargan durante la carrera de retorno de los - pistones de los cilindros (8) y (10). Para que el funciona-- miento sea plenamente satisfactorio todos los componentes de-

carga de las piezas. Aqui el operario descarga la pieza ya - trabajada, carga una nueva y desplaza el carro hasta la posición de trabajo. Una vez concluida la operación sobre la pieza montada en el carro desplazable (2), el operario acciona - la palanca de la válvula (4) y el aceite fluye, desde el acumulador y la unidad de bombeo, hacia el fondo de vástago del cilindro (5), llevando de nuevo el carro desplazable hasta la posición de carga.

Los resultados necesarios pueden obtenerse con un bomba muy pequeña, que funciona en combinación con un acumulador -- grande.

3.3.3 SINCRONIZACION DEL MOVIMIENTO DE LOS PISTONES DE DOS - CILINDROS.

En el circuito de la Figura 62 se emplean dos acumuladores para sincronizar los movimientos de los pistones de dos cilindros hidráulicos. Con el fin de que los acumuladores no sean desproporcionados con respecto al resto de la instala--- ción, las carreras de los cilindros deben ser cortas.

El circuito funciona como a continuación se indica: el - operario coloca la pieza en la bancada de la máquina y acciona la palanca de la válvula de cuatro vías y dos posiciones - (1). El aceite fluye hacia el fondo ciego del cilindro de su

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

jeción (2) y la pieza queda sujeta en la bancada. A continuación aumenta la presión, se abre la válvula de secuencia (3) y el aceite fluye hacia las conexiones piloto de las válvulas (5) y (6), actuando sobre éstas y permitiendo que el que viene del acumulador (7) a través de la válvula (6) se dirija al fondo ciego del cilindro (8) y que el que procede del acumulador (9) a través de la válvula (5) vaya al fondo ciego del cilindro (10). Los pistones de los cilindros (8) y (10) se desplazan uniformemente porque los acumuladores (7) y (9) hacen las veces de depósitos, almacenando las mismas cantidades de aceite cuando se cargan y evacuando idénticas cantidades en el mismo tiempo cuando se descargan. En otras palabras, auxiliados por los controles (12) y (13), actúan como igualadores de flujo.

Una vez que la operación se ha completado, el operario acciona la palanca de la válvula 1 para llevarla a su posición inicial, y el aceite fluye hacia los fondos de los vástagos de los cilindros (8) y (10) para desplazar de nuevo los pistones; a continuación, la presión vuelve a aumentar hasta abrir la válvula de secuencia (11), el aceite se dirige hacia los fondos de los vástagos de los cilindros de sujeción (2) y las garras que fijan la pieza en la bancada se aflojan. Los acumuladores se cargan durante la carrera de retorno de los pistones de los cilindros (8) y (10). Para que el funciona--

miento sea plenamente satisfactorio todos los componentes deben registrar fugas internas muy pequeñas.

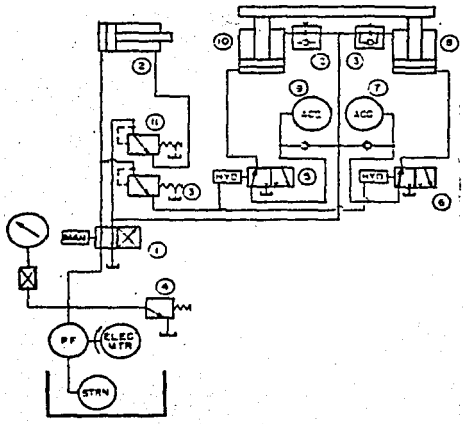


FIGURA 62

3.3.4 LOS ACUMULADORES COMO FUENTE DE ENERGIA DE EMERGENCIA.

Los acumuladores del circuito de la Figura 63 se emplean como fuentes de energía de emergencia. En algunas aplicaciones hidráulicas es preciso que los pistones de algunos cilindros vuelvan a su posición inicial aunque falle el suministro de energía eléctrica a consecuencia de tormentas, incendios o inundaciones. Por ejemplo, si fallase el suministro de ener-

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

gía y no pudiese funcionar el sistema hidráulico de la com--- puerta de descarga de una esclusa, los daños que ello pudiera originar podrían ser muy graves. En esta aplicación el acumulador debe tener el volumen suficiente para llenar el cilin-- dro con aceite a una presión de trabajo suficiente para devolver el pistón a la posición inicial.

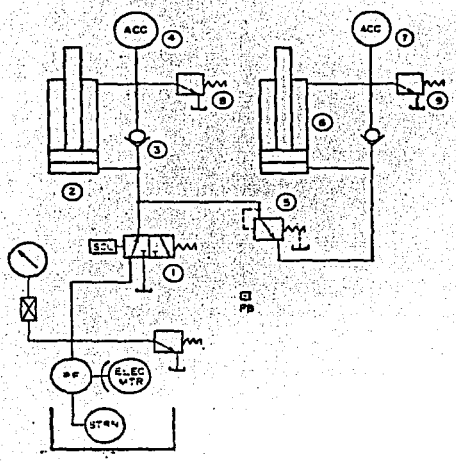


FIGURA 63

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los dos sistemas de acumulador funcionan como a continua

ción se indica: el operario acciona el mando que energiza el solenoide de la válvula maestra de control de triple paso (1) y el aceite se dirige al fondo ciego del cilindro (2). Este cilindro tiene un vástago de pistón de una diferencia de 2:1 es decir, la superficie de la sección del vástago es la mitad de la de la luz del cilindro. Al mismo tiempo que el aceite a presión se dirige hacia el fondo ciego del cilindro, desplaza de su asiento a la válvula de retención (3) y a medida que avanza el pistón el aceite a presión se dirige también hacia el fondo de vástago del cilindro y el acumulador (4), cargando éste.

Cuando este último llega al final de su carrera la presión aumenta, se abre la válvula de secuencia (5) y el aceite se dirige al fondo ciego del cilindro (6). En el cilindro (6) y el acumulador (7) se verifica el mismo proceso que en el cilindro (2) y en el acumulador (4). Las válvulas de seguridad (8) y (9) evitan que la presión que se forma sea superior a la calculada, ya que, de lo contrario, los cilindros podrían detenerse en su carrera de ida. Si el sistema cuenta con un interruptor automático (que no se indica en la figura) entonces cuando el pistón del cilindro (6) haya alcanzado el final de su carrera de ida, el conmutador se abre para detener el motor eléctrico de la unidad de potencia. Esto evitará que ésta funcione durante períodos largos de parada de la

instalación.

Si se registrase un fallo en el suministro de energía, el émbolo de la válvula (1) se desplazaría a su posición original cuando ya no se suministrará corriente al solenoide y el aceite de los fondos ciegos de los cilindros (2) y (6) escapa a través del orificio de evacuación. Este desplazamiento de la válvula se debe a la presión del muelle que actúa sobre el extremo opuesto de ésta. A continuación, el aceite pasa de los acumuladores neumáticos de vejiga a los fondos de los vástagos de los cilindros (2) y (6) y los pistones vuelven a su posición inicial.

3.4 EL ACUMULADOR DE VASIJA ELASTICA.

3.4.1 DESCRIPCION.

Consiste en una botella de acero, en cuyo interior existe una vasija elástica de material sintético, como se vió en la Figura 58, donde va encerrado el gas. La presión de éste obliga a la vasija a dilatarse hasta ocupar todo el espacio que deja libre el líquido, sobre éste actúa siempre la presión del interior de la vasija, como se ve en las Figuras 64A y B.

Este tipo de acumulador ofrece al proyectista de circuitos hidráulicos y oleodinámicos una extensa gama de ventajas que con ciertas aplicaciones resultan de importancia fundamental. Este sistema garantiza, en primer lugar, una perfecta separación entre la cámara correspondiente al gas y la destinada al líquido; por su parte, el elemento separador de material sintético no presenta prácticamente inercia alguna; además, por no existir ningún deslizamiento recíproco entre elementos metálicos, no es necesario un cuidado particular en el mecanizado interior del recipiente.

El elemento separador es una vasija más o menos alargada construída de material sintético de gran flexibilidad y provista en su parte superior de una válvula para la introduc---

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ción de la carga de gas y el cierre ulterior. El material usado para la construcción de la vasija es el Buna N en sus diferentes calibres, aunque también se usan materiales como el Neopreno, Butilio y Goma de Etileno Propileno.

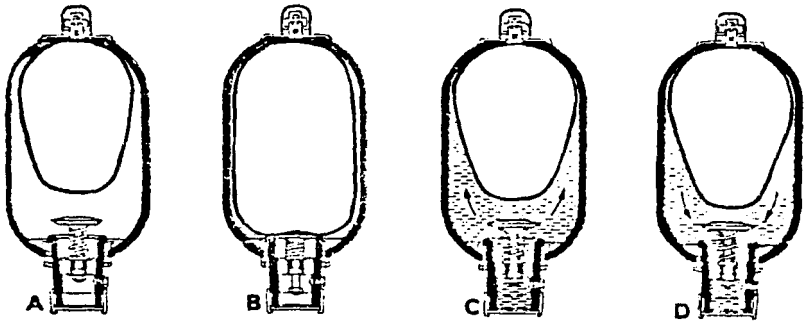


FIGURA 64. Ciclo de preparación y funcionamiento de un Acumulador Hidráulico.

Los gases empleados en los acumuladores han de ser inertes (no debe emplearse nunca oxígeno, por ejemplo). El tipo de gas más conveniente para la carga; la mayoría de las veces se usa nitrógeno, cuya inactividad química excluye todo el fenómeno de combustión o de explosión (fenómeno Diesel, siempre posible en presencia de aire comprimido y de aceite) y no determina el envejecimiento de la goma sintética de juntas, vasijas ~~o diafragmas~~. La carga con aire se acepta sin más cuando los acumuladores se instalan en circuitos a base de agua, mientras que el empleo del oxígeno debe excluirse siempre por

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

tratarse de un gas químicamente activo.

El recipiente forjado de una sola pieza, soporta fácilmente presiones altísimas y sus eventuales dilataciones no provocan incoveniente alguno de funcionamiento. La válvula fungiforme situada en la acometida de conexión al circuito líquido permite descargar completamente la presión del circuito sin dañar la vasija elástica; como se ve en las Figuras 64 C y 64 D; en efecto, en estas condiciones el cierre de dicha válvula se produce a expensas de una modesta dilatación de la vasija, después de lo cual el sistema retorna al estado de equilibrio, y el acumulador puede ser incluso desmontado de la instalación si así conviene.

3.4.2 CALCULO DE LOS ACUMULADORES EN SUS DIFERENTES APLICACIONES.

En lo que respecta a sus funciones, ya se ha indicado la principal, que es la que además da nombre a los aparatos que estamos considerando. La acumulación de energía es un problema típico de muchísimos campos de la técnica, suscitado por el objeto de equipar una instalación determinada con la mínima potencia posible, pero con la posibilidad de obtener durante ciertos períodos del ciclo suministros de energía instantáneos muy superiores a la potencia media instalada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para dar un ejemplo, entre los muchos posibles: la inserción de un acumulador de unos 9 Gal de volumen total en un circuito oleodinámico que alimenta un grupo de 6 prensas de 110000 lb. para fusión por presión, dotado de un motor eléctrico de apenas 5 HP, confiere a dicho sistema unas características funcionales equivalentes a las que, sin el acumulador, hubiese requerido la instalación de un motor eléctrico de cuádruple potencia.

Otra de las aplicaciones del acumulador con respecto a circuitos líquidos de cualquier clase, pero indudablemente fundamental para el dimensionamiento y la racionalización de los circuitos oleodinámicos es como reserva de presión. Unido a un determinado tramo de un circuito y convenientemente cargado de aceite a presión durante una fase del ciclo, el acumulador puede defectivamente mantener bajo presión dicho tramo y sus receptores correspondientes incluso cuando, por razones impuestas por el propio ciclo, la conexión con la bomba debe ser interrumpida.

Las características elásticas del acumulador permiten así también las aplicaciones estáticas como la descrita, secundar eventuales desplazamientos del receptor con la mayor facilidad, sin que el fenómeno vaya acompañado de grandes variaciones de presión. Un ejemplo típico de esta aplicación se

halla representado por los dispositivos hidráulicos de apriete y ensamblado.

En su función como reserva de presión está implícitamente contenida la de suplir a la bomba en los casos de falta accidental de alimentación; este cometido, como fuente de energía de emergencia, es de particular importancia en instalaciones donde se requiere un funcionamiento quizás a intermitencias, pero absolutamente garantizado.

La adaptación a las variaciones de volumen sobre la cual se basa la ya descrita función regularizadora tiene, a su vez dos interesantes ventajas: la primera radica en la absorción de las dilataciones a las que por cualquier razón (térmica, mecánica, cinemática) estuviese sujeto un circuito momentaneamente seccionado, y por tanto privado de descarga; la segunda atañe más específicamente a los circuitos cerrados sin alimentación exterior, en los cuales el cilindro actúa como bomba bajo la acción mecánica de otros dispositivos de la máquina, como sucede en los pisadores para sujetar la plancha en las prensas, o en los mecanismos para el cierre de tolvas tras la descarga del material, etc.

El cálculo de un acumulador de vasija elástica destinado a funcionar como reserva de energía y como reserva de presión

es el siguiente: llamemos P_2 y P_1 , respectivamente, a las -- presiones máxima y mínima que se desea alcanzar en el circuito hidráulico; sea además P_0 las presión de carga del acumulador, es decir, la del gas introducido en la vasija cuando en la acometida de conexión al circuito no está aplicada ninguna presión de aceite; sean finalmente W el volumen del líquido - que se quiere introducir y luego extraer, y v_0 el volumen total del acumulador (es decir, su volumen geométrico interior). El cálculo se ejecuta, en primera aproximación, aplicando la conocida Ley de Boyle, según la cual en todo gas perfecto a - temperatura constante, el producto de la presión por el volumen es a su vez constante. A las presiones P_0 , P_1 , P_2 , la vasija ocupará respectivamente los volúmenes v_0 , v_1 , v_2 , - donde la diferencia $v_1 - v_2$ es precisamente W.

De acuerdo con la Ley de Boyle se podrá escribir:

$$P_0 \, v_0 = P_1 \, v_1 = P_2 \, v_2 = \text{const.} \qquad (56)$$

Despejando separadamente v_1 y v_2 y restando ambas expresiones se obtiene:

$$W = v_1 - v_2 = \frac{v_0 \, (P_2 - P_1)}{P_2} \cdot \frac{P_0}{P_1} \qquad (57)$$

donde la relación $P_0 / P_1 = Z$ define la presión previa del gas (Z suele ser comprendida, a título indicativo entre 0.5 y --- 0.9). De la ecuación 57 tenemos:

$$v_0 = \frac{W \, P_2}{Z \, (P_2 - P_1)} \qquad (58)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Esta fórmula solo puede considerarse válida cuando los cambios de estado termodinámicos del gas que actúa como un resorte se realizan con cierta lentitud, de manera que durante los mismos se cumpla la hipótesis de isotermia (constancia de la temperatura), para tiempos de carga o de descarga superiores a unos tres minutos.

Cuando por el contrario, el ciclo de carga o de descarga tiene lugar en un tiempo bastante breve, el comportamiento del gas, y por tanto el del acumulador, es sensiblemente adiabático (a calor constante), y puede expresarse por la ecuación $P\ v^{1.4} =$ constante. Siguiendo el mismo proceso matemático del caso anterior, tendremos ahora:

$$P_0\ v_0^{1.4} = P_1\ v_1^{1.4} = P_2\ v_2^{1.4} = \text{const.} \qquad (59)$$

despejando

$$W = v_1 - v_2 = v_0\ \frac{(P_2^{.72} - P_1^{.72})}{P_2}\ \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^{.72} \qquad (60)$$

Si $\frac{P_0}{P_1} = Z$

$$v_0 = \frac{W\ P_2^{.72}}{Z^{.72}(P_2^{.72} - P_1^{.72})} \qquad (61)$$

Para la elección correcta de un acumulador de vasija elástica como reserva de energía o como reserva de presión, debemos tomar en cuenta lo siguiente:

$.25\ P_2 \leq P_0 \leq .9P_1$

$\frac{P_2}{P_1} \leq 3$ a 3.5

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.4.3 EL ACUMULADOR HIDRAULICO Y EL GOLPE DE ARIETE.

Una de las mayores aplicaciones de los acumuladores hidráulicos en los circuitos hidráulicos está en la eliminación o reducción de las altas pulsaciones de presión o choques en las líneas.

Se han usado diversidad de sistemas y equipos para eliminar los choques de onda, pero actualmente los acumuladores están siendo usados ampliamente como amortiguadores por un gran número de procesos de manufactura y sistemas hidráulicos industriales.

La instalación de un acumulador del tamaño adecuado cerca de donde se produce el choque de onda puede eliminar o minimizar las vibraciones en un circuito hidráulico.

Para la aplicación de un acumulador como amortiguador, la magnitud del choque o golpe de ariete debe de ser calculada para determinar la capacidad del acumulador.

Para un mejor resultado el tamaño del acumulador debe de ser correctamente evaluado con todos los parámetros de un sistema en particular.

Hemos visto que el golpe de ariete es producido por una

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

rápida des-aceleración del flujo del fluido y la presión au-- menta debido al choque de un modo proporcional a la velocidad de des-aceleración del flujo. En otras palabras, si una co-- lumna de fluido en movimiento se para gradualmente, el choque y por consecuencia la variación de presión será mucho menor - que si el fluido es frenado rápidamente. Entonces vemos que un equipo con un acumulador hidráulico instalado justo antes de una válvula de cierre rápido, amortiguará gradualmente las ondas de presión que se generen en el circuito hidráulico.

Para determinar la capacidad del acumulador debemos to-- mar en cuenta dos aspectos:

1. Las pérdidas por fricción son muy pequeñas y pueden ser - omitidas.
2. La energía absorbida por la columna del fluido y por la - expansión de la tubería es muy pequeño en comparación con la energía que absorbe el acumulador y por lo tanto es -- despreciable.

Un fluido que circula a través de una tubería tiene una cantidad de energía cinética igual a:

$$E.C. = \frac{wALV_0^2}{2g}$$

Si el fluido es frenado rápidamente, la energía cinética que tiene en ese momento, se transforma en otra forma de ener

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

gía haciendo un trabajo de expansión en la tubería o por me-- dio de calor.

Si un acumulador con una capacidad v_1 se instala antes y lo más cercano posible a la válvula de cierre rápido, la energía cinética presente en el fluido antes de que la válvula se cierre puede ser transformada en energía potencial (P.E.), acumulada en el gas compresible del acumulador, precargado con anterioridad. Este fenómeno tiene lugar cuando la presión de precarga del acumulador P_1 , que es también la presión normal del sistema.

Así tenemos que:

Energía cinética presente en el sistema antes de cerrar la -- válvula = energía almacenada en el volumen de gas del acumulador entre los límites de presión P_1 y P_2 .

Si la compresión del gas en el acumulador sigue un proceso adiabático, de tal modo que PV^{η}= constante. Entonces de la Figura 65 la energía almacenada en el acumulador se puede expresar como:

$$P.E. = -\int_1^2 \rho dv$$

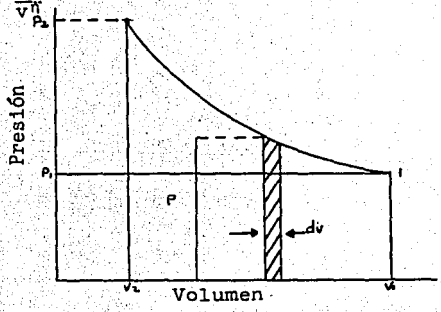
(El signo negativo es debido a que si integramos del volumen 1 al 2 la dirección de integración es hacia abajo, negativo).

Sabemos que:

$$P_1 v_1^{\eta} = P_2 v_2^{\eta} = \text{cons.} \qquad (62)$$

$$Pv^{\eta} = \text{cons.} \Rightarrow P = \frac{c}{v^{\eta}}$$

FIGURA 65



Sustituyendo

$$P = \frac{c}{v^{\eta}} \quad \text{en} \quad -\int_1^2 \rho dv$$

Tenemos que

$$P.E. = -\int_1^2 \rho dv = -c\int_1^2 \frac{\rho v}{v^{\eta}}$$

$$P.E. = -\left[\frac{cv^{-\eta+1}}{-\eta+1}\right]_1^2 \Rightarrow P.E. = -c\left[\frac{v_2^{1-\eta} - v_1^{1-\eta}}{1-\eta}\right]$$

$$P.E. = \frac{cv_1^{1-\eta}\left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{1-\eta}\right]}{1-\eta} \qquad (63)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De la 62

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1/n} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-1/n} \qquad (64)$$

Sustituyendo 64 en 63

$$P.E. = \frac{(P_1 v_1^n)(v_1^{1-n})\ [1-(\frac{P_2}{P_1})^{n-1/n}]}{1 - n}$$

$$P.E. = \frac{P_1 v_1 [(\frac{P_2}{P_1})^{\frac{n-1}{n}} - 1]}{n - 1} \qquad (65)$$

Si P.E. = C.E.

$$\frac{P_1 v_1 [(\frac{P_2}{P_1})^{\frac{n-1}{n}} - 1]}{n - 1} = \frac{wALV_0^2}{2g} \qquad (66)$$

$$v_1 = \frac{wALV_0^2(n-1)\ (12)}{2gP_1[(\frac{P_2}{P_1})^{\frac{n-1}{n}} - 1]} \qquad (67)$$

Para acumuladores precargados con presión Px, diferente a la presión P_1 del sistema, la capacidad del acumulador vx -- puede ser calculada por

$$v_x = v_1\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1/n} \qquad (68)$$

3.4.4 FUNCIONAMIENTO GENERAL DE UN ACUMULADOR HIDRAULICO EN LA AMORTIGUACION DEL GOLPE DE ARIETE.

Los acumuladores hidráulicos son diseñados para contro-- lar los rápidos cambios de velocidad que puede causar un alza

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

de presión en la tubería, originando el fenómeno de golpe de ariete.

Este fenómemo hidráulico varía en importancia desde un simple cambio de velocidad o presión del flujo, hasta generar vacios o presiones de considerable magnitud que colapsen o revienten tuberías y uniones o que dañen a la bomba.

Los acumuladores minimizan este fenómeno por el uso de una vasija cargada con aire o gas y conectada a la tubería que lleva el líquido. Esta vasija tiene la capacidad de convertir la energía cinética del movimiento del líquido en energía potencial cuando una sobre-presión en el líquido ocurre. Cuando una bomba se para, la vasija elástica del gas se expande y "bombea" el fluido necesario a la tubería y evita así la formación de vacio y la separación de la columna.

En esta característica hidroneumática la que da al acumulador hidráulico la habilidad de controlar estos cambios de energía.

Una analogía puede ser usada para explicar este fenómeno hidráulico y como el acumulador hidráulico controla los cambios de energía.

Considerando que una locomotora empuja unos vagones cuesta arriba, que es similar a que una bomba empuje una columna de líquido a través de una tubería a un tanque elevado.

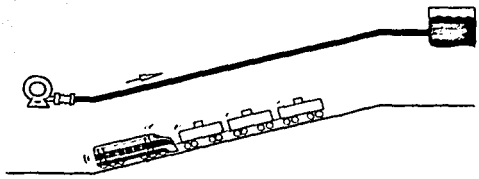


FIGURA 66

Cuando la locomotora se para, los vagones del convoy continuan moviéndose hasta que se paran por la fricción y la gravedad.

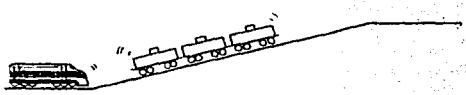


FIGURA 67

La gravedad provoca que el convoy se venga cuesta abajo hasta que chocan con la locomotora.

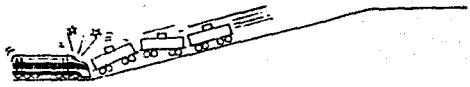


FIGURA 68

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Se pueden ver fácilmente los resultados. Ningún choque se produciría si existiera otra locomotora con más vagones en una línea lateral que impidiera que el convoy se vieniera abajo y chocara con la locomotora parada.

FIGURA 69

Así es el sistema de bombeo al tanque elevado. Cuando la bomba se para, el líquido fluye y se va de la bomba, la columna de líquido se separa y forma vacio aguas abajo de la válvula de retención hasta que por la influencia de la gravedad y de la fricción deja de moverse.

FIGURA 70

Entonces la gravedad provoca que se venga en reversa hasta que choca con la válvula de retención cerrada. El resultado del choque puede resultar sin importancia o puede causar -

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

una falla catastrófica.

FIGURA 71

Y otra vez, ningún choque resultaría si al sistema de -- bombeo se le une un acumulador hidráulico. Este introduciría líquido en la tubería reemplazando a la bomba durante el tiempo necesario para impedir la separación de la columna de líquido y evita que el fluido vaya en reversa hasta que se establezca el equilibrio.

FIGURA 72

Los choques con tuberías también pueden ser causados por movimientos rápidos de la válvula. Esto puede ser reducido - por una regulación lenta de la acción de la válvula. Requerimientos de emergencia de las válvulas como en incendios, diluvios e instalaciones en donde se transfiere combustible no --

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

permiten este tipo de regulación.

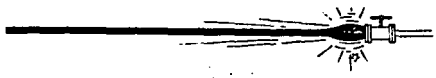


FIGURA 73

Si se usa un movimiento rápido de la válvula para frenar el flujo de un fluido puede ser como si un muro de piedra sólida es usado para frenar un convoy y su locomotora que co--- rren a gran velocidad.

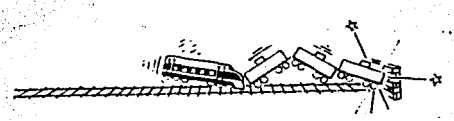


FIGURA 74

Llevando al tren a un paro gradual por frenado, es semejante a un cerrado controlado de la válvula. Un tramo de vía lateral con pendiente hacia arriba pararía el convoy sin ninguna complicación si la obstrucción no se puede remover.

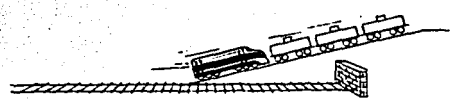


FIGURA 75

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una válvula de acción rápida no causa un choque dañino - si un acumulador hidráulico es instalado aguas arriba en una línea lateral el cual frenaría de modo seguro el movimiento del fluido.

FIGURA 76

Otro lugar en donde se gasta energía con potencia sufi-- ciente como para causar serios daños es el arranque de las -- bombas. Esta energía se reconoce fácilmente con la analogía del ferrocarril. La locomotora debe revolucionar sus motores y patinar sus ruedas hasta obtener inercia suficiente para mo ver el convoy.

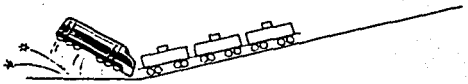


FIGURA 77

~~Si la~~ energía puede ser proporcionada por el uso de un - gran resorte entre la locomotora y los vagones, un arranque -

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

suave puede resultar.

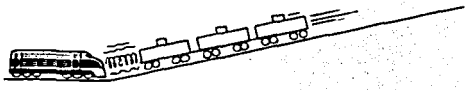


FIGURA 78

El alto consumo de energía para arrancar una bomba puede ser proporcionada por un acumulador hidráulico en la línea de descarga de la bomba.

FIGURA 79

3.4.4.1 Funcionamiento de un Acumulador Hidráulico cuando se Para la Bomba.

Cuando se para la bomba de la Figura 80, la presión en la tubería (A) aguas abajo de la válvula de retención de la bomba empieza a decrecer. Este cambio en la presión es detectado a través de la brida (B) y el gas (E) se expande, forzando al líquido almacenado (F) a salir del acumulador (D) a la tubería, actuando como una bomba neumática hasta que la pre--

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

sión deja de disminuir. En este tiempo, el acumulador se va a vaciar de líquido y la presión de la tubería es más baja - que la estática del sistema.

Esta presión mínima es solo pasajera y el sistema empieza a regresar flujo al área de bombeo ajustándose por sí solo. El líquido que regresa fluye dentro del acumulador con - una resistencia producida por la fricción de la válvula de -- disco cónico (C), que tiene una caída baja de presión cuando el líquido sale y una alta cuando el líquido entra.

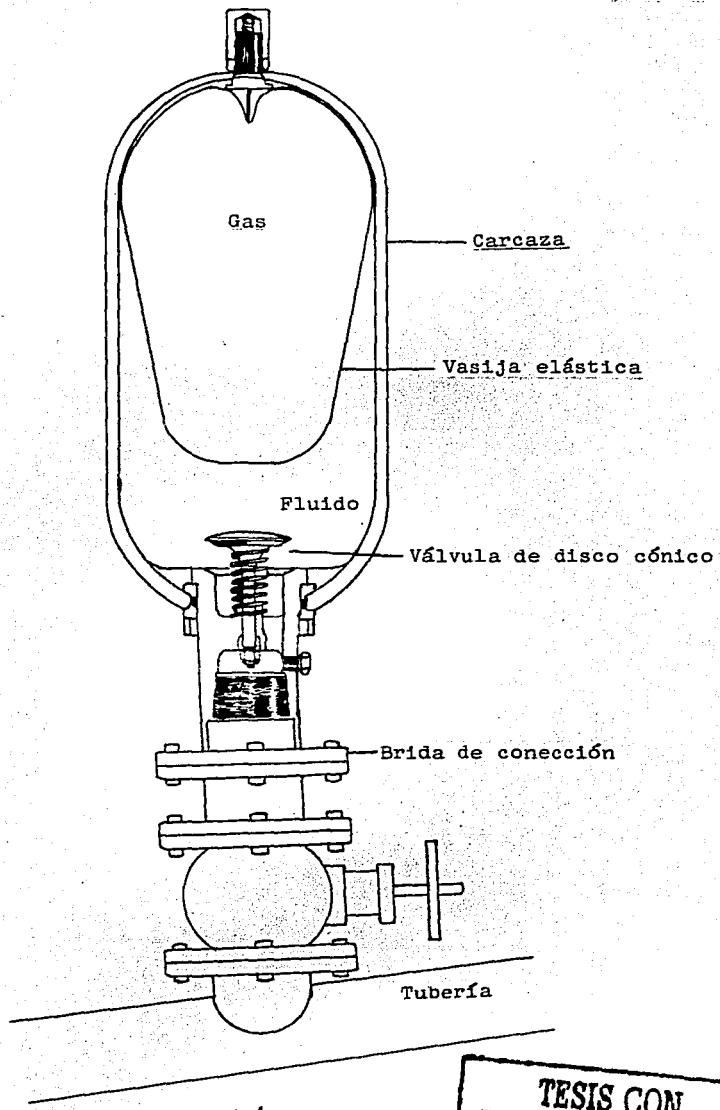
3.4.4.2 Funcionamiento durante el Arranque de la Bomba.

Cuando se arranca una bomba, la columna aguas abajo se - resiste al movimiento y provoca que la presión en la bomba -- aumente considerablemente. Cuando bombas de turbinas verticales sin válvula de pie se arrancan, el líquido en la columna de la bomba se eleva con gran velocidad y choca contra una -- válvula de retención que está disparada por el líquido estático provocando un choque severo.

Con un acumulador hidráulico, el flujo de la bomba es recibido por el acumulador comprimiendo el gas de la vasija e-- lástica. La energía de la bomba que es así almacenada es liberada de una forma controlada para estabilizar el flujo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA 8c



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.4.4.3 Funcionamiento durante la Reducción del Flujo.

Cuando una válvula de la Figura 80 es cerrada en (A) conectada a un acumulador (D) por la brida (B), la presión en la línea adyacente a la válvula empieza a elevarse. El gas (E) en el acumulador es comprimido conforme el líquido entra al acumulador. El flujo hacia adentro continua hasta que la presión alcanza el punto de diseño. En este tiempo el flujo se para y el acumulador está lleno de líquido y con un pequeño volumen de gas comprimido. La presión será mayor que la presión estática del sistema y el gas comprimido bombeará líquido de regreso al sistema. El dispositivo de fricción o válvula de disco cónico (C) controla el flujo de salida, estabiliza el sistema y minimiza las oscilaciones de presión.

3.4.5 DISEÑO DE UN ACUMULADOR HIDRAULICO DE VASIJA ELASTICA.

Para diseñar y posteriormente calcular y construir un acumulador hidráulico de vasija elástica, mencionaremos brevemente las características de diseño de sus diferentes partes.

Como vimos anteriormente un acumulador hidráulico de este tipo, se compone básicamente de tres partes:

1. El recipiente.
2. La vasija elástica.
3. La válvula de disco cónicc

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.4.5.1 Diseño del Recipiente.

Los acumuladores hidráulicos de vasija elástica son generalmente cilíndricos con cabezas semi-esféricas. Los recipientes cilíndricos son la forma más usada en el diseño de recipientes a presión. Esta forma es desarrollada mediante la rotación de una línea recta paralela al eje de rotación.

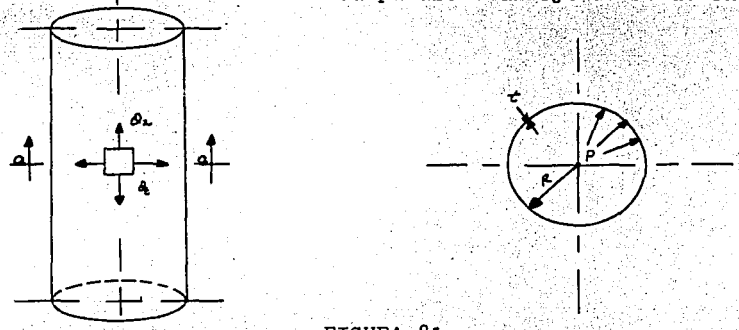


FIGURA 81

Los esfuerzos en un recipiente cerrado bajo la presión interna P pueden ser calculados por las condiciones de equilibrio estático mostrado en la Figura 81 en la dirección longitudinal.

De la primera ecuación de equilibrio

$P/te = (\sigma_t/R_t) + (\sigma_L/R_L)$

sabiendo que el radio meridional de curvatura $R_L=\infty$ y el segundo, el mínimo radio de curvatura que es el radio del cilindro $R_t=R$.

Tenemos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$(\sigma_L/\infty)\ (\sigma_t/R) = P/te$

$\sigma_t = PR/te$

El crecimiento radial del recipiente es:

$\Delta R = R_{et} = (R/E)\ (\sigma_t - v\sigma_L) = PR^2/Ete)\ (1-v/2)$

El esfuerzo tangencial puede ser expresado en términos del radio interno.

$$\sigma_t = PR/te = P(Ri + .5\ te)/te \qquad (69)$$

El espesor de la membrana es entonces

$$te = PRi/(\sigma_t - .5P) \qquad (70)$$

Las fórmulas del espesor del recipiente y el código de esfuerzos basados en el radio interno se aproxima de un modo más exacto a la fórmula de espesor de pared de Lamé.

$$SE = (PRi/te) + .6P \qquad (71)$$

o

$$te = (PRi)/(SE - .6P) \qquad (72)$$

usando 0.6P en vez de 0.5P, en donde E es la eficiencia de soldadura y S es el esfuerzo del código.

Ambos σ_t y σ_L son esfuerzos principales sin ningún esfuerzo cortante en el lugar del elemento diferencial.

Los recipientes esféricos o las cabezas semi-circulares se desarrollan haciendo rotar un círculo alrededor de un eje. Para recipientes esféricos bajo presión interna ambos radios principales son los mismos, por tanto σ_t y σ_L son iguales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De la ecuación de equilibrio estático. Figura 82, así tenemos que:

$(\sigma_L \cos\alpha)\ t\ 2\ \pi R \cos\alpha = \pi\ R^2 \cos^2 \alpha P$

y como

$\sigma_L = PR/2t$

pero

$\sigma_L/R + \sigma_t/R = P/t$

así que

$\sigma_t = PR/2t = \sigma_L$

La fórmula del código de esfuerzos basada en el radio interno y eficiencia de la junta E:

$SE = PRi/2t + .1P$

o

$t = PRi/(2\ SE - 2P)$ (73)

en donde 0.1P es el factor de corrección. El crecimiento radial ΔR es:

$\Delta R = R(\sigma_t/E - v\sigma_L/E) = PR^2/tE\ [(1 - v)/2]$

en donde E es el módulo de elásticidad.

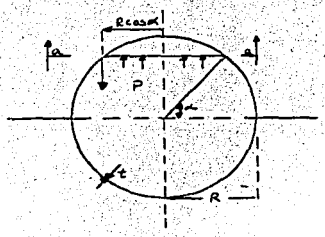


FIGURA 82

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Ambos esfuerzos σ_L y σ_L son uniformes en todo el espesor del recipiente a presión.

La discontinuidad de los esfuerzos en un recipiente cilíndrico con cabezas semi-esféricas puede ser minimizado mediante el desvanecimiento en la unión del cilindro con la cabeza semi-esférica. Si el crecimiento del cilindro es el mismo que el de la cabeza entonces tenemos que:

$$\Delta R_c = \Delta R_s$$

$$(PR^2/2\,Et_c)\,(2 - v) = (PR^2/2Et_s)\,(1 - v)$$

$$t_s = t_c\,(1 - v)/(2 - v) = .41\,t_c \qquad (74)$$

3.4.5.2 Diseño de la Vasija Elástica.

Las características de diseño de una vasija elástica son las mismas que las usadas en el diseño del recipiente que vimos en el inciso anterior.

3.4.5.3 Características de la Válvula de Disco Cónico.

Las válvulas de disco cónico, pertenecen a las válvulas de asiento, en donde el movimiento es normal al plano del orificio y parelelo a la fuerza que la presión estática ejerce a través de la válvula.

La válvula de asiento que mejor se adapta al control de potencia es la válvula de disco cónico.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La válvula de disco cónico o válvula fungiforme es muy usada en los acumuladores hidráulicos para controlar el flujo de salida, minimizar las oscilaciones y estabilizar el sistema.

Esta válvula también es usada en algunos motores de vapor, prácticamente en todos los motores de combustión interna y como interruptores de flujo en circuitos hidráulicos.

Es relativamente fácil y barata su fabricación y algunas de sus virtudes son: su relativa inmunidad a la suciedad y su efectivo cierre. Entre sus desventajas tenemos que, no se puede usar como elemento de control preciso.

El material con el que debe ser fabricada la válvula no debe de ser muy duro ni muy dúctil, y debe mantener siempre sus dimensiones originales cuando está en servicio o cuando está parada. Normalmente se usa un acero SAE 52100 y si hay problemas de corrosión se usa un acero inoxidable.

Para un mejor funcionamiento de la válvula, el diseño adecuado del resorte con que opera es escencial.

3.4.5.3.1 Diseño del Resorte de la Válvula de Disco Cónico.

La correcta operación de muchas válvulas dependen del di

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

seño adecuado del resorte de la misma. El resorte puede de-- terminar la presión de salida, la distancia que se va a mover la válvula y la eficiencia de cerrado de ésta. Un diseño adecuado del resorte, nos ayuda a reducir la tendencia de la válvula a vibrar y aumenta su estabilidad.

La mayoría de las válvulas operan con resortes helicoidales a compresión hechos de sección transversal circular aun-- que también hay válvulas que operan con resortes helicoidales a torsión.

En este estudio nos limitaremos a los resortes helicoidales a compresión.

Resortes a Compresión.

El diseño de un resorte helicoidal a compresión se basa principalmente en las ecuaciones siguientes:

$$R_R = \frac{F_R}{Y} \tag{75A}$$

$$R_R = \frac{d^4{}_R G}{8D^3{}_R N} \tag{75B}$$

y

$$S_R = \frac{2.55\ F_R\ D_R\ K_R}{d^3{}_R} \tag{76}$$

La ecuación 75A es la expresión general de la Ley de ---

TESIS CON
FALLA DE ORIGI

Hooke en donde se muestra a la constante elástica del resorte en términos de la fuerza y la deformación.

Siendo R_R la constante elástica del resorte, F_R la fuerza aplicada y la deformación se expresa por Y.

La ecuación 75B nos muestra la constante elástica en términos de los factores geométricos y de las propiedades del material y es válida hasta el límite elástico del material.

En donde d_R es el diametro del alambre, G es el módulo de torsión, D_R es el diametro medio de la espira y N es el número de espiras activas del resorte.

La ecuación 76 nos da el máximo esfuerzo al que puede ser sometido un resorte bajo la acción de una carga.
El factor Wahl, K_R, se define como

$$K_R = \frac{4\,C_R - 1}{4\,C_R - 4} + \frac{0.615}{C_R} \qquad (77)$$

en donde C_R es la razon de diametros D_R/d_R, D_R es el diametro de la espira y d_R es el diametro del alambre.
El factor Wahl se debe tomar siempre en cuenta para resortes de operación cíclica, vibración, cargas de impacto y en situaciones en donde el esfuerzo calculado esté cerca del esfuerzo límite del material.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV. CALCULO DE UN ACUMULADOR Y SU ADAPTACION A UN GENERADOR DE GOLPE DE ARIETE

4.1 DESCRIPCION DEL APARATO DE GOLPE DE ARIETE.

El aparato de la Figura 83 fue diseñado para el estudio del fenómeno de Golpe de Ariete.

Básicamente consiste de un tubo de cobre en espiral que es alimentado con agua de la línea principal del lugar donde se instale, y de una válvula solenoide al final de la tubería para que el cerrado sea rápido y así producir mejor el fenómeno. Tiene un transductor deforfimétrico de presión muy cerca de la válvula, el cual es conectado al osciloscopio en donde se observan los cambios de presión que ocurren cuando se cierra la válvula. Una válvula de paso es colocada en la entrada de la tubería y otra similar después de la válvula solenoide, con estas dos válvulas podemos controlar el flujo y la -- presión del líquido antes de cerrar la válvula solenoide. Un manometro Bourdon es colocado entre la válvula solenoide y la válvula de paso situada al final de la tubería, para indicar la presión del sistema y calibrar el transductor.

Una caja de control en la mesa de operación del aparato contiene las baterías que excitan al transductor y al osciloscopio, junto con los interruptores de control.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Datos técnicos:

Longitud de la tubería:	200 ft.
Diámetro interior:	0.5 in.
Espesor de la pared de la tubería:	0.047 in.
Presión máxima:	215 lb/in^2
Presión de operación:	14.5 lb/in^2
Flujo de operación:	0.00353 $ft^3/seg.$

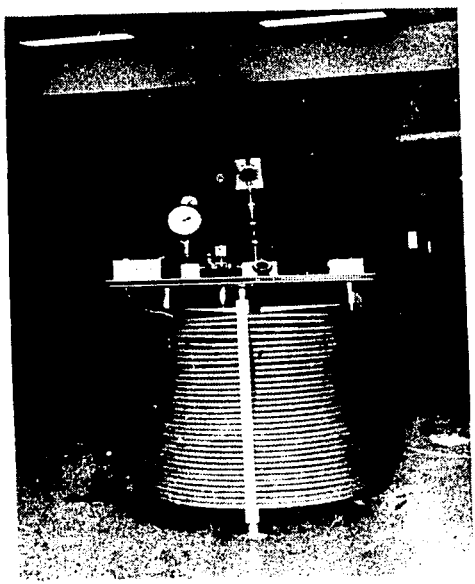


FIGURA 83

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.2 CALCULO DEL ACUMULADOR HIDRAULICO.

Los cálculos necesarios para determinar los parámetros de diseño del acumulador hidráulico se realizarán en función de las características y condiciones normales de operación del Generador de Golpe de Ariete descrito anteriormente.

Primero calcularemos la carga de oscilación del sistema, para determinar el volumen del acumulador y de este modo, poder calcular las diferentes partes de las que se compone el mismo, como lo son: el recipiente, la vasija elástica y el resorte de la válvula de disco cónico.

4.2.1 CALCULO DE LA CARGA DE OSCILACION.

La carga de oscilación la podremos encontrar resolviendo las ecuaciones 15 y 16 para

$H - Ho$ siendo $f(t + \frac{x}{a}) = 0$, por ser un movimiento rápido el de la válvula, tenemos que:

$$H - Ho = F(t - \frac{x}{a}) + f(t + \frac{x}{a}) \qquad (15)$$

$$V - Vo = -\frac{g}{a}[F(t - \frac{x}{a}) + f(t + \frac{x}{a}) \qquad (16)$$

$$H - Ho = -\frac{a}{g}(\Delta V)$$

En donde

Ho es la carga para condiciones estables.

H es la carga de oscilación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

a es la velocidad de la onda de presión.

g es la aceleración de la gravedad.

ΔV es el cambio en la velocidad del agua en la válvula.

sabiendo que:

Ho= 29.2 psia. = 67.3 ft.

a = 4307.6 ft/seg. de la ecuación 10.

g = 32.2 ft/seg^2

ΔV= 2.592 ft/seg.

tenemos que:

H = 279.449 ft.= 121.124 psia.

4.2.2 CALCULO DEL VOLUMEN DEL ACUMULADOR.

De la ecuación 67 podemos calcular el volumen del acumulador.

$$v_1 = \frac{w\ A\ L\ Vo^2 (n - 1)}{2\ g\ P_1\ [(\frac{P_2}{P_1})^{\frac{n-1}{n}} - 1} \quad (12)$$

en donde

w es el peso específico del fluido.

A el área de la sección transversal.

L la longitud.

Vo la velocidad del fluido.

n es el coeficiente

g es la aceleración de la gravedad.

P_1 es la presión para condiciones estables.

P_2 es la presión de oscilación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

sabiendo que

$w = 62.42$ lbs/ft^3

$A = 0.0013621$ ft^2

$L = 200$ ft.

$Vo = 2.592$ ft/seg.

$n = 1.4$

$g = 32.2$ ft/seg^2

$P_1 = 29.2$ psia.

$P_2 = 121.124$ psia.

tenemos que

$v_1 = 0.5832$ in^3

4.2.3 CALCULO DEL RECIPIENTE.

El recipiente más utilizado para la construcción de los acumuladores hidráulicos es el recipiente cilíndrico con cabezas semi-esféricas.

El material que se usará para el recipiente será acrílico con el objeto de visualizar el funcionamiento del acumulador.

Primero calcularemos el radio interior y la altura óptima para minimizar el área total del recipiente y posteriormente determinaremos el espesor de la paredes del mismo.

Si $A_{AC} = 2\pi r_{AC} h_{AC} + \pi (2r_{AC})^2$ (78)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$V_{AC} = \pi r^2_{AC} h_{AC} + 4/3 \quad r^3_{AC} \qquad (79)$$

Sustituyendo h_{AC} de la ecuación 79 en la 78 y minimizando el radio, nos queda

$$r_{AC}^3 = \frac{-4\ V_{AC}}{+\pi(-\frac{16}{3} + 8\pi)}$$

De la ecuación 70 calculamos el espesor (te) del cilindro.

$$te = P_2 Ri/(\sigma_t - .5\ P_2) \qquad (70)$$

En donde

P_2 es la presión de oscilación.

Ri es el radio interno.

σ_t es el esfuerzo permisible del material.

Sabiendo que la carcasa se maquinará en acrílico.

P_2 = 121.124 psia.

Ri = .3345 in.

$\sigma_t = 8.7 \times 10^3 lb/in^2$

Tenemos que

te = .00468 in.

Para las cabezas semi-esféricas de la ecuación 73.

$$te = PRi/(2\sigma_t - 2P)$$

Con los datos anteriores tenemos que

te = .002361 in.

4.2.4 CALCULO DE LA VASIJA ELASTICA.

Para la construcción de la vasija elástica, la forma geométrica que más recomienda es la de un cilindro con cabezas -

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

semi-esféricas, usando un hule vulcanizado o un hule conocido como Buna N.

De la ecuación 69 calculamos el espesor del cilindro

$\sigma_t = P_2R/te$

$te = P_2R/\sigma_t$

en donde

σ_t es el esfuerzo permisible del material.

P_2 es la presión de oscilación.

R es el radio

sabiendo que

$\sigma_t = 2.5 \times 10^3$

$P_2 = 121.124$ psia.

R = .3345 in.

tenemos que

te = 0.0162 in.

para las cabezas semi-esféricas

$te = PR/2\sigma_t$

con los datos anteriores tenemos que

te = .00810 in.

4.2.5 CALCULO DEL RESORTE DE LA VALVULA DE DISCO CONICO.

Para el cálculo del resorte de la válvula de disco cónico debemos tomar en cuenta las siguientes consideraciones: La presión de operación del resorte y la presión del sistema son iguales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Por cuestiones de instalación el diámetro exterior de la espira no debe de exceder el diámetro interior de la tubería del sistema y la deformación no debe de ser menor que la altura mínima necesaria para abrir completamente la válvula.

El material recomendado para este resorte es un acero inoxidable para no tener problemas de corrosión, por ser agua el fluido a controlar.

Para conocer el número de espiras del resorte sustituimos la ecuación 75A en la 75B y despejamos N.

$$R_R = \frac{F_R}{Y} \qquad (75A)$$

$$R_R = \frac{d^4_R \, G}{8 \, D^3_R N} \qquad (75B)$$

$$N = \frac{Y \, G \, d^4_R}{8 \, D^3_R (F_R)}$$

en donde

N es el número de espiras.

Y es la deformación del resorte.

G es el módulo de torsión.

D_R es el diámetro de la espira.

d_R es el diámetro del alambre (por recomendación del fabricante $d_R = 0.1 \, D_R$).

F_R es la fuerza axial aplicada al resorte.

K_R es el factor Wahl del resorte.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

sabiendo que

$Y = 0.3$ in.

$G = 10 \times 10^6$ lb/in^2

$D_R = .393$ in.

$d_R = .0393$ in.

$F_R = 1.758$ lb.

tenemos que:

$N = 8.38$

$N = 9$ espiras activas

De la ecuación 76 vemos si el material resiste.

$$S_R = \frac{2.55\ F_R\ D_R\ K_R}{d^3_R}$$

$S_R = 43608.407$ lb/in^2

Sabemos que el esfuerzo máximo permisible para un acero inoxidable es de aproximadamente 100,000 lb/in^2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3 ADAPTACION DEL ACUMULADOR AL GENERADOR DE GOLPE DE ARIETE.

Para adaptar el acumulador hidráulico al generador de golpe de ariete se realizó una pequeña modificación al equipo original. Esta consistió en conectar una unión Tee a la unión del transductor con el sistema para contar con dos líneas paralelas, a la primera va conectado el transductor o un manómetro que nos indica las variaciones de la presión en el sistema, y a la segunda va conectada una válvula de globo y en seguida de ésta, el acumulador hidráulico.

La válvula de globo tiene por objeto el permitirnos realizar pruebas sin usar el acumulador cuando ésta se encuentra cerrada y con el acumulador cuando se encuentra abierta.

El acumulador puede ser montado o desmontado del generador fácilmente cuando se requiera desarmarlo para ver sus partes detalladamente o cuando el generador no esté en uso.

La adaptación del acumulador al generador se muestra en la Figura 84.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

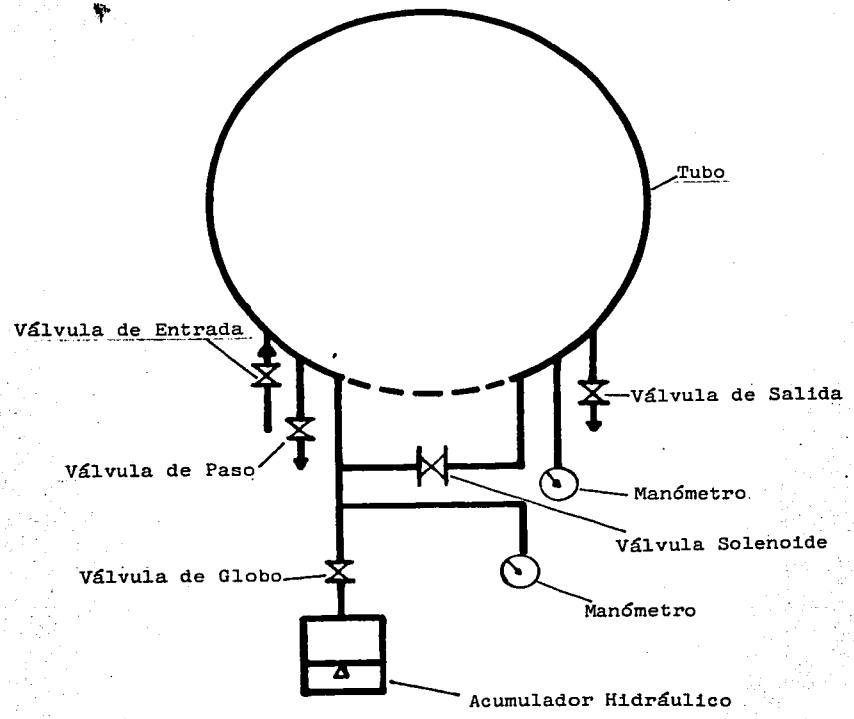


FIGURA 84

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.4 INSTRUMENTACION Y EQUIPO AUXILIAR.

Los principales aparatos de medición que se deben de considerar en este equipo son un manómetro Bourdon, que se utiliza para conocer la presión en el sistema; un osciloscopio que conectado al transductor nos indica las variaciones de la onda de presión cuando se produce el fenómeno de Golpe de Ariete, o un manómetro Bourdon para conocer la diferencia de presión en el choque hidráulico. Y para medir el flujo se utiliza un cronómetro y una probeta graduada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

V. CONSTRUCCION Y ADAPTACION DE UN ACUMULADOR

169

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.1 MATERIALES Y METODOS.

Antes de iniciar la construcción del acumulador hidráulico habrá que fijar algunas de sus características en base a su funcionamiento y al objetivo que se persigue.

Se deben determinar el tamaño, tipos de materiales para la construcción de las diferentes partes, forma de adaptación del acumulador al generador y todo aquello necesario para la construcción de un acumulador hidráulico de vasija elástica con fines didácticos.

De acuerdo al objetivo, se pretende observar el funcionamiento de un acumulador hidráulico en la amortiguación de las ondas de choque producidas por el cierre rápido de una válvula. Esto consiste en visualizar la deformación de la vasija elástica y el funcionamiento de la válvula de disco cónico.

Para cumplir con este objetivo se optó por construir el recipiente de dimensiones superiores a las calculadas en el capítulo anterior y en acrílico transparente ya que este material es más resistente y se puede trabajar más fácilmente que el vidrio que cumple con el requisito de transparencia. Además, el vidrio corre el riesgo de romperse y por ser éste un equipo didáctico se debe de tomar en cuenta un alto factor de

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

seguridad.

La vasija elástica es de hule vulcanizado y por no contar con la maquinaria para su fabricación, se adaptó una Pelota de Frontón a nuestras necesidades.

La válvula de disco cónico se fabricó de bronce el disco y de aluminio el vástago. El soporte de la válvula es de acrílico transparente para poder observar la acción del resorte en el funcionamiento de la misma; en su parte inferior cuenta con una rosca interior para adaptar el acumulador al conector del generador.

A continuación describiremos la construcción detallada de las partes antes mencionadas.

5.1.1 CONSTRUCCION DEL RECIPIENTE.

Para la construcción del recipiente se utilizaron dos bloques de acrílico de 3½" x 3½" x 2" cada uno. Se maquinó una cavidad semi-esférica de 1 1/5" de radio en ambos bloques de modo que si los unimos, tenemos una esfera en el interior. Ambos bloques se barrenaron en los polos, a uno se le hizo un barreno de 7/16" de diámetro para insertar la válvula de la vasija elástica y al otro, uno de 1" para insertar el soporte de la válvula de disco cónico.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para unir los bloques se usan cuatro tornillos que entran en cuatro barrenos roscados en su parte inferior. De este modo podemos desarmar el acumulador y ver sus partes detalladamente.

5.1.2 CONSTRUCCION DE LA VASIJA ELASTICA.

Por falta de maquinaria para la fabricación de la vasija elástica se encontró que una Pelota de Frontón cumplía con las características requeridas.

Para poder variar la presión de la pelota en base a nuestros requerimientos de experimentación, se le vulcanizó una válvula para aire de uso automotriz. La pelota tiene un diámetro exterior de 2 1/3".

5.1.3 CONSTRUCCION DE LA VALVULA DE DISCO CONICO.

La construcción de la válvula de disco cónico se realizó en dos etapas.

Primero se maquinaron el disco cónico de 1" de diámetro mayor y de 3/4" de diámetro menor y el vástago de 2" de longitud y 1/4" de diámetro. El disco se maquinó en bronce y el vástago en aluminio y ambos están atornillados entre sí.

Después, de un bloque de acrílico se maquinó el soporte

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

de la válvula, que consiste en un cilindro hueco con centro - sólido, de 2 3/4" de longitud, diámetro interior de 3/4". En un extremo el diámetro exterior es de 1" y es en donde asienta el disco cónico, este extremo se insertó en el barreno de 1" del recipiente. El otro extremo tiene 1½" de diámetro exterior, está roscado interiormente y es la conexión con el Generador del Golpe de Ariete.

El centro sólido es el soporte del resorte y tiene cinco barrenos, uno central y cuatro laterales. El barreno central tiene un diámetro de 17/64" y sirve como guía al vástago de - la válvula. Por los cuatro restantes de 1/8" de diámetro circula el fluido cuando entra o sale del acumulador.

El resorte que usa la válvula es el calculado en el capítulo anterior. Es de tipo comercial, de once espiras totales y extremos esmerilados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Después de haber sido construido y adaptado el acumulador al generador de Golpe de Ariete se realizaron las pruebas experimentales.

5.2.1 OBJETIVOS.

Los objetivos principales de estas pruebas son:

Mostrar una de las aplicaciones prácticas de un Acumulador Hidráulico de Vasija Elástica.

Comprobar y observar el funcionamiento de un Acumulador Hidráulico de vasija elástica en la amortiguación de las ondas de Golpe de Ariete.

5.2.2 CONDICIONES Y PARAMETROS.

Para iniciar las pruebas de Golpe de Ariete, se estableció un flujo de agua de 0.00353 $ft^3/seg.$, a una presión de 14.5 lb/in^2 en el generador de Golpe de Ariete (estas condiciones son recomendadas por el fabricante del generador), y se cargó la vasija elástica con aire a una presión igual a la del sistema, o sea a 14.5 lb/in^2.

Una vez establecidos estos parámetros se realizaron las pruebas. Primero, con la válvula de globo que permite la entrada del fluido al acumulador cerrada y después, con esta

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

válvula abierta. Las pruebas se realizaron de la siguiente manera:

Se disparó el interruptor que cierra la válvula solenoide y se observó en el manómetro anterior a ésta el súbito cambio de presión y las oscilaciones que sufre el sistema producto del choque hidráulico.

En el momento en que cesaron las oscilaciones y el sistema se estabilizó, se abrió la válvula solenoide hasta que se estabilizara nuevamente el sistema. Se repitió la operación del cerrado de la válvula solenoide con la válvula de globo abierta y se observó en el manómetro el cambio de presión y las pequeñas oscilaciones que produce el choque hidráulico en el sistema, cuando está funcionando el acumulador hidráulico.

Se efectuaron las pruebas para cuatro diferentes flujos, manteniéndo la presión del generador y de la vasija elástica constantes.

Las pruebas para cada flujo se realizaron cinco veces, para comprobar las lecturas tomadas del manómetro.

5.2.3 RESULTADOS.

En las Tablas 2, 3, 4 y 5 se muestran los resultados de las pruebas experimentales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En cada tabla se representa a un flujo diferente, con sus incrementos de presión en el generador cuando está en operación el acumulador y cuando no lo está, así como la diferencia entre ellos.

La Figura 87 es una representación gráfica de las tablas anteriores. Por los resultados obtenidos en estas pruebas experimentales, se puede ver que el incremento máximo de la presión en un sistema que opera con un acumulador hidráulico, disminuye aproximadamente en un 67% con respecto al incremento máximo de la presión del mismo sistema cuando opera sin acumulador para flujos iguales.

Debido a la rapidez en el cambio de la presión cuando se produce el fenómeno de Golpe de Ariete resulta difícil efectuar una lectura detallada del incremento de la presión en el manómetro a simple vista, por lo que se filmó (a 52 cuadros por segundo), el desarrollo de la prueba cuando el flujo y la presión inicial de operación en el generador son de 0.00353 ft^3/seg. y de 14.5 lb/in^2 respectivamente. De este modo, se pueden ver las variaciones de la presión en el sistema cada 0.0192 segundos. En la Tabla 6 se muestran los incrementos de la presión en el generador cada 0.0192 segundos cuando éste trabaja sin acumulador, y con acumulador para lapsos de tiempos iguales. En la Figura 88 se comparan gráficamente estos incrementos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TABLA 2.

NO. DE PRUEBA	GASTO (ft^3/seg.)	PRESION DEL SISTEMA (lb/in^2)	PRESION DE LA VASIJA (lb/in^2)	INCREMENTO DE LA PRESION SIN ACUMULADOR (lb/in^2)	INCREMENTO DE LA PRESION CON ACUMULADOR (lb/in^2)	DIFERENCIA DE LOS INCREMENTOS (lb/in^2)	% DE DISMINUCION DEL INCREMENTO
1	0.00161	14.5	14.5	18.49	5.68	12.71	68.7
2	0.00161	14.5	14.5	18.49	5.68	12.71	68.7
3	0.00161	14.5	14.5	18.49	5.68	12.71	68.7
4	0.00161	14.5	14.5	18.49	5.68	12.71	68.7
5	0.00161	14.5	14.5	18.49	5.68	12.71	68.7

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TABLA 3.

NO. DE PRUEBA	FLUJO (ft^3/seg.)	PRESION DEL SISTEMA (lb/in^2)	PRESION DE LA VASIJA (lb/in^2)	INCREMENTO DE LA PRESION SIN ACUMULADOR (lb/in^2)	INCREMENTO DE LA PRESION CON ACUMULADOR (lb/in^2)	DIFERENCIA DE LOS INCREMENTOS (lb/in^2)	% DE DISMINUCION DEL INCREMENTO
1	0.0022	14.5	14.5	69.70	19.91	49.79	71.4
2	0.0022	14.5	14.5	69.70	19.91	49.79	71.4
3	0.0022	14.5	14.5	69.70	19.91	49.79	71.4
4	0.0022	14.5	14.5	69.70	19.91	49.79	71.4
5	0.0022	14.5	14.5	69.70	19.91	49.79	71.4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TABLA 4.

NO. DE PRUEBA	FLUJO (ft^3/seg.)	PRESION DEL SISTEMA (lb/in^2)	PRESION DE LA VASIJA (lb/in^2)	INCREMENTO DE LA PRESION SIN ACUMULADOR (lb/in^2)	INCREMENTO DE LA PRESION CON ACUMULADOR (lb/in^2)	DIFERENCIA DE LOS INCREMENTOS (lb/in^2)	% DE DISMINUCION DEL INCREMENTO
1	0.00353	14.5	14.5	75.39	24.89	50.50	67.0
2	0.00353	14.5	14.5	75.39	24.89	50.50	67.0
3	0.00353	14.5	14.5	75.39	24.89	50.50	67.0
4	0.00353	14.5	14.5	75.39	24.89	50.50	67.0
5	0.00353	14.5	14.5	75.39	24.89	50.50	67.0

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TABLA 5.

NO. DE PRUEBA	FLUJO (ft^3/seg.)	PRESION DEL SISTEMA (lb/in^2)	PRESION DE LA VASIJA (lb/in^2)	INCREMENTO DE LA PRESION SIN ACUMULADOR (lb/in^2)	INCREMENTO DE LA PRESION CON ACUMULADOR (lb/in^2)	DIFERENCIA DE LOS INCREMENTOS (lb/in^2)	% DE DISMINUCION DEL INCREMENTO
1	0.003678	14.5	14.5	182.0	61.16	120.84	66.3
2	0.003678	14.5	14.5	182.0	61.16	120.84	66.3
3	0.003678	14.5	14.5	182.0	61.16	120.84	66.3
4	0.003678	14.5	14.5	182.0	61.16	120.84	66.3
5	0.003678	14.5	14.5	182.0	61.16	120.84	66.3

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 6.

Flujo: 0.00353 ft^3/seg.
Presión Inicial del Sistema: 14.5 lb/in^2
Presión Inicial de la Vasija: 14.5 lb/in^2

NO. DEL CUADRO	TIEMPO (SEGUNDOS)	INCREMENTO DE LA PRESION SIN ACUMULADOR (lb/in^2)	INCREMENTO DE LA PRESION CON ACUMULADOR (lb/in^2)
1	0.019	0	0
2	0.038	0	0
3	0.057	0	0
4	0.076	0	0
5	0.096	5.68	2.84
6	0.115	9.95	4.26
7	0.134	14.22	5.68
8	0.153	21.33	7.11
9	0.173	31.29	7.11
10	0.192	42.67	8.53
11	0.211	49.78	9.95
12	0.230	62.58	11.37
13	0.249	71.12	11.37
14	0.269	75.39	12.80
15	0.288	71.12	14.22
16	0.307	64.01	14.22
17	0.326	52.63	15.64
18	0.346	42.67	17.06
19	0.365	35.56	18.49
20	0.384	28.44	19.91
21	0.403	21.33	22.04
22	0.423	18.49	22.04
23	0.442	14.22	19.91

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

NO. DEL CUADRO	TIEMPO (SEGUNDOS)	INCREMENTO DE LA PRESION SIN ACUMULADOR (lb/in^2)	INCREMENTO DE LA PRESION CON ACUMULADOR (lb/in^2)
24	0.461	11.37	20.62
25	0.480	9.95	21.33
26	0.499	7.11	21.33
27	0.519	7.11	22.04
28	0.538	7.11	22.04
29	0.557	7.11	22.04
30	0.576	7.11	22.75
31	0.596	7.11	22.75
32	0.615	7.11	24.18
33	0.634	7.11	24.18
34	0.653	7.11	24.18
35	0.673	7.11	24.89
36	0.692	9.95	24.89
37	0.711	12.80	14.22
38	0.730	14.22	14.22
39	0.749	15.64	14.22
40	0.769	17.06	14.22
41	0.788	21.33	14.22
42	0.807	22.75	14.22
43	0.826	25.60	14.22
44	0.846	28.44	14.22
45	0.865	31.29	14.22
46	0.884	34.13	14.22
47	0.903	35.56	14.22
48	0.923	39.98	14.22
49	0.942	39.98	14.22
50	0.961	39.98	14.22
51	0.980	35.56	14.22
52	1.000	34.13	24.89
53	1.019	31.29	24.18

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

NO. DEL CUADRO	TIEMPO (SEGUNDOS)	INCREMENTO DE LA PRESION SIN ACUMULADOR (lb/in^2)	INCREMENTO DE LA PRESION CON ACUMULADOR (lb/in^2)
54	1.038	28.44	23.47
55	1.057	27.02	23.47
56	1.076	24.84	23.47
57	1.096	22.75	22.75
58	1.115	21.33	22.75
59	1.134	19.91	22.75
60	1.153	17.78	22.04
61	1.173	17.06	22.04
62	1.192	17.06	21.33
63	1.211	17.06	21.33
64	1.230	15.64	21.33
65	1.249	15.64	21.33
66	1.269	15.64	21.33
67	1.288	15.64	21.33
68	1.307	15.64	21.33
69	1.326	17.06	21.33
70	1.346	17.06	21.33
71	1.365	18.49	21.33
72	1.384	19.91	21.33
73	1.403	21.33	21.33
74	1.423	21.33	21.33
75	1.442	22.75	21.33
76	1.461	24.18	21.33
77	1.480	25.60	21.33
78	1.499	25.60	21.33
79	1.519	26.31	21.33
80	1.538	27.02	21.33
81	1.557	27.02	21.33
82	1.576	27.02	21.33
83	1.596	27.02	21.33

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

NO. DEL CUADRO	TIEMPO (SEGUNDOS)	INCREMENTO DE LA PRESION SIN ACUMULADOR (lb/in^2)	INCREMENTO DE LA PRESION CON ACUMULADOR (lb/in^2)
84	1.615	27.02	21.33
85	1.634	27.02	21.33
86	1.653	25.60	21.33
87	1.673	24.89	21.33
88	1.692	24.18	21.33
89	1.711	22.75	21.33
90	1.730	22.75	21.33
91	1.749	22.04	21.33
92	1.769	21.33	21.33
93	1.788	21.33	21.33
94	1.807	21.33	21.33
95	1.826	21.33	21.33
96	1.846	21.33	21.33
97	1.865	21.33	21.33
98	1.884	21.33	21.33
99	1.903	21.33	21.33
100	1.923	21.33	21.33
101	1.942	21.33	21.33
102	1.961	21.33	21.33
103	1.980	21.33	21.33
104	2.0	21.33	21.33
105	2.019	14.22	17.08
106	2.038	-2.84	2.13
107	2.057	-1.42	7.11
108	2.076	-2.84	8.53
109	2.096	-3.55	7.11
110	2.115	-3.55	7.11
111	2.134	-5.68	7.11
112	2.153	-5.68	7.11
113	2.173	-6.40	5.68

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

NO. DEL CUADRO	TIEMPO (SEGUNDOS)	INCREMENTO DE LA PRESION SIN ACUMULADOR (lb/in^2)	INCREMENTO DE LA PRESION CON ACUMULADOR (lb/in^2)
114	2.192	-7.11	4.26
115	2.221	-7.11	2.84
116	2.230	-7.11	1.42
117	2.249	-7.11	1.42
118	2.269	-7.11	1.42
119	2.288	-5.68	0.71
120	2.307	-5.68	0
121	2.326	-4.26	0
122	2.346	-4.26	0
123	2.365	-4.26	0
124	2.384	-4.26	0
125	2.403	-2.84	0
126	2.423	-2.84	0
127	2.442	-1.42	0
128	2.461	-0.71	0
129	2.480	0	0
130	2.499	0	0
131	2.519	0	0
132	2.538	0	0
133	2.557	0	0
134	2.576	0	0
135	2.596	0	0
136	2.615	0	0

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.2.4 DISCUSION DE LAS GRAFICAS.

En la Figura 87 se muestran gráficamente los resultados de las pruebas experimentales.

Las columnas rayadas diagonalmente representan los diferentes valores del máximo incremento de la presión obtenidos para diferentes gastos cuando el equipo está trabajando sin el acumulador hidráulico; mientras que las columnas punteadas representan los diferentes valores del máximo incremento de la presión para diferentes gastos cuando el equipo esta trabajando con el acumulador hidráulico.

En esta gráfica, se puede ver que para un mismo gasto, la columna que representa el máximo incremento de presión en el sistema cuando éste opera sin el acumulador hidráulico es aproximadamente tres veces mayor que la columna que representa el máximo incremento de presión cuando el sistema está trabajando con el acumulador hidráulico.

Por lo que se puede decir que el uso del acumulador hidráulico presentado en este trabajo disminuye en un 66.6% aproximadamente el incremento de la presión en el generador de golpe de ariete.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La Figura 88 nos muestra gráficamente el comportamiento detallado del incremento de la presión cuando opera con el acumulador y sin él.

En esta figura se puede ver lo siguiente:
El incremento máximo de la presión en el sistema cuando opera sin acumulador es superior al incremento máximo de la presión en el sistema cuando éste opera con un acumulador hidráulico. El máximo incremento de presión en un sistema que opera sin acumulador tiene lugar pocos instantes después de cerrar la válvula solenoide mientras que en un sistema que opera con un acumulador tarda más tiempo en alcanzar su máximo incremento. A un sistema que opera sin acumulador le toma más tiempo estabilizarse después de accionar la válvula solenoide (ya sea para abrirla o cerrarla), que a un sistema que opera con un acumulador hidráulico.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

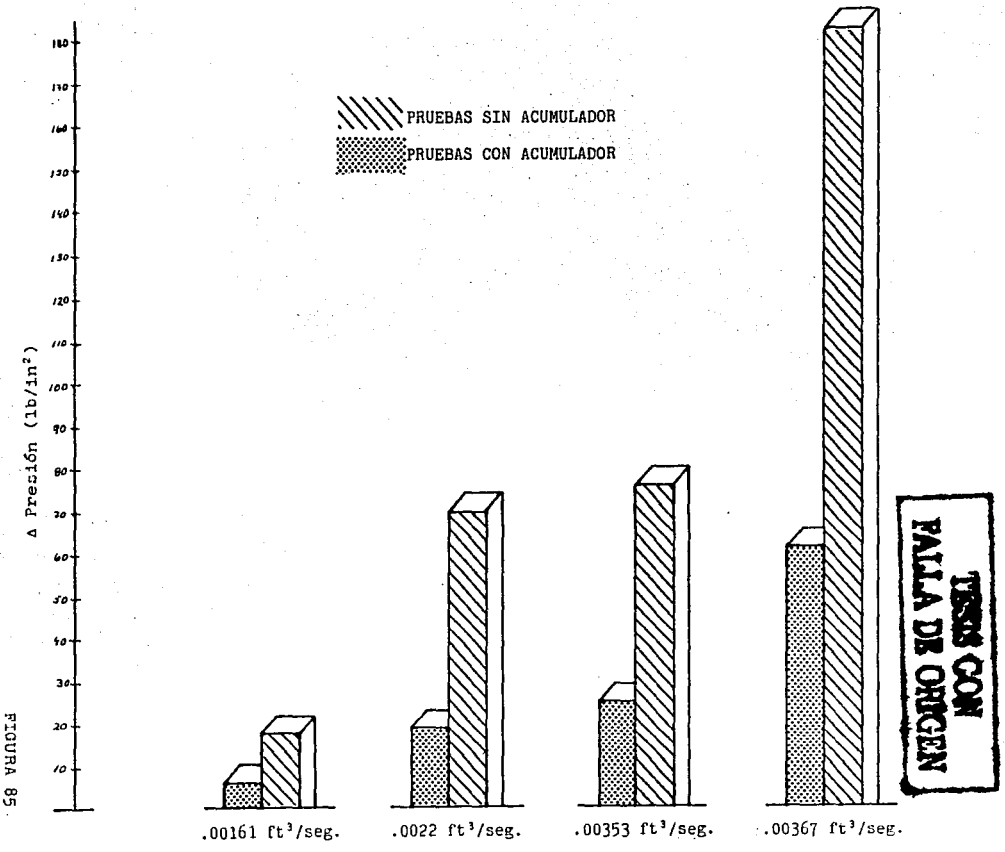


FIGURA 85

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

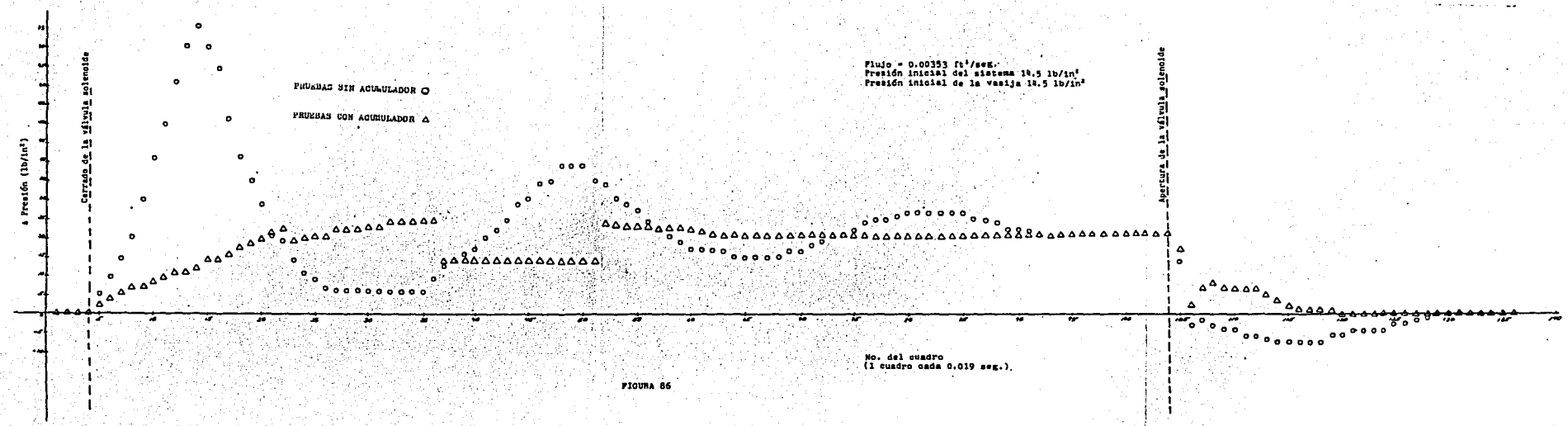
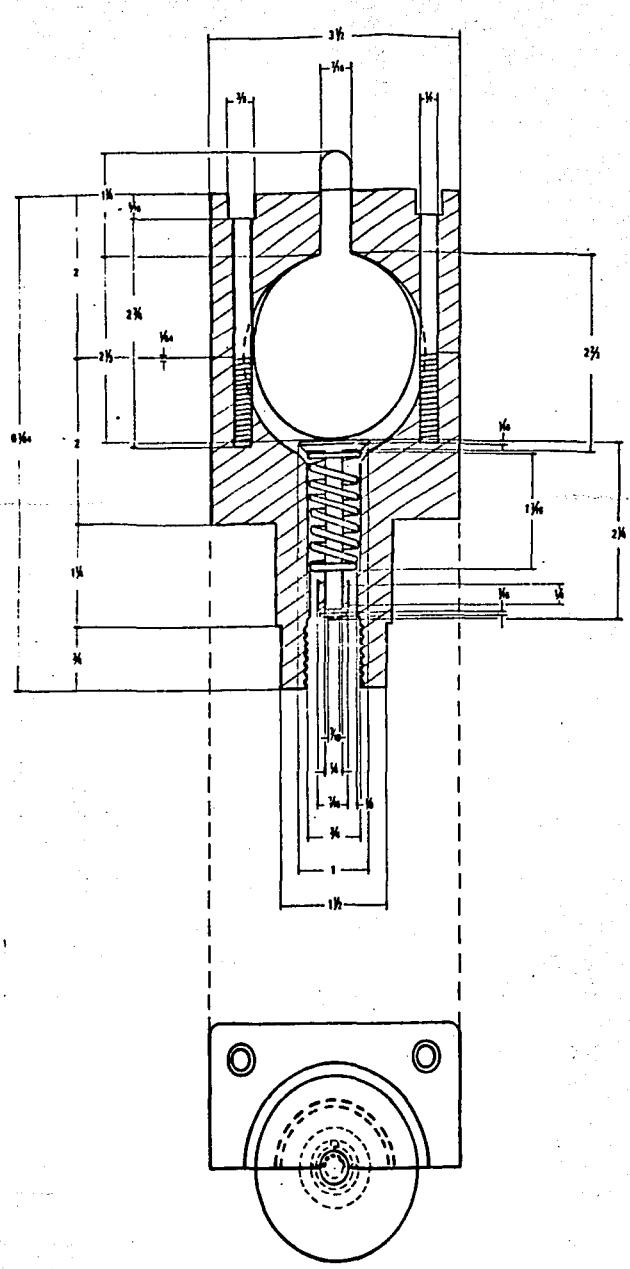


FIGURA 86

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

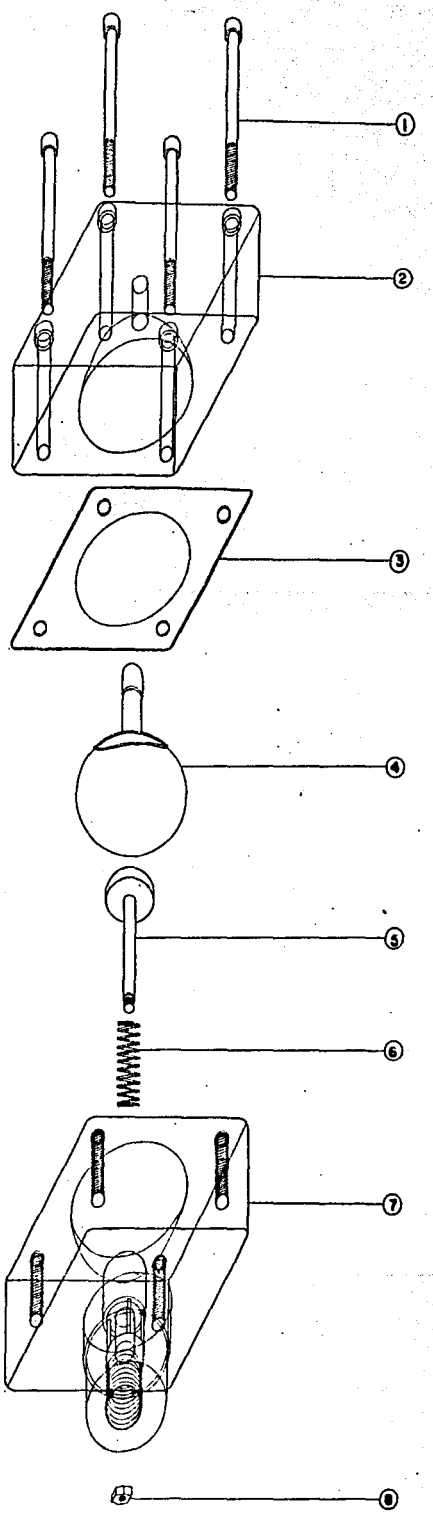


189-A

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

UNIVERSIDAD ANAHUAC	
ESCUELA DE INGENIERIA	
CORTE TRANSVERSAL	1
TESIS PROFESIONAL	
MODELO DE ACUMULADOR HIDRAULICO	1984
JUAN MANUEL AVILA G A	Escala

NO.	DESCRIPCION	CANT.
1	TORNILLO HEXAGONAL	4
2	RECIPIENTE (P.S.)	1
3	EMPAQUE	1
4	VASIJA ELASTICA	1
5	V. de DISCO CONICO	1
6	RESORTE	1
7	RECIPIENTE (P.I.)	1
8	TUERCA HEXAGONAL	1



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

189-B

UNIVERSIDAD ANAHUAC ESCUELA DE INGENIERIA	
PLANO DE ENSAMBLE	2
TESIS PROFESIONAL	
MODELO DE ACUMULADOR HIDRAULICO	1984
JUAN MANUEL AVILA G. A.	Escala

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6.1 CONCLUSIONES.

En la formación de un ingeniero es esencial la realización de pruebas prácticas en el laboratorio como complemento de los estudios teóricos, además al poner al estudiante en contacto con las máquinas del laboratorio o taller, se genera el desarrollo y destreza manual, logrando con ésto la mejor comprensión de los fenómenos que se estudiarán.

Estas pruebas prácticas se pueden realizar, tanto en equipos fabricados por firmas especializadas como en equipos diseñados y construidos por estudiantes, o en la adaptación de los unos en los otros.

Por los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir lo siguiente:

El fenómeno de Golpe de Ariete es muy perjudicial para los circuitos hidráulicos, por los súbitos cambios de presión que se presentan cuando tiene lugar este fenómeno.

Cuando se produce el fenómeno de Golpe de Ariete, el incremento de la presión en un sistema que opera con un acumulador hidráulico disminuye considerablemente con respecto al incremento de la presión de un sistema que carece de este equipo. Por lo que se puede decir, que una de las principales aplicaciones de los acumuladores hidráulicos está en la amortiguación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

de las ondas de Golpe de Ariete.

Con el diseño, construcción y adaptación de un acumulador hidráulico de vasija elástica al Generador de Golpe de Ariete del Laboratorio de Mecánica de los Fluidos, se aumenta el número de pruebas prácticas que se podían realizar con el equipo original.

El uso de un material translúcido en la fabricación de equipos para realizar experimentos garantiza la confirmación visual de algunos fenómenos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

6.2 RECOMENDACIONES.

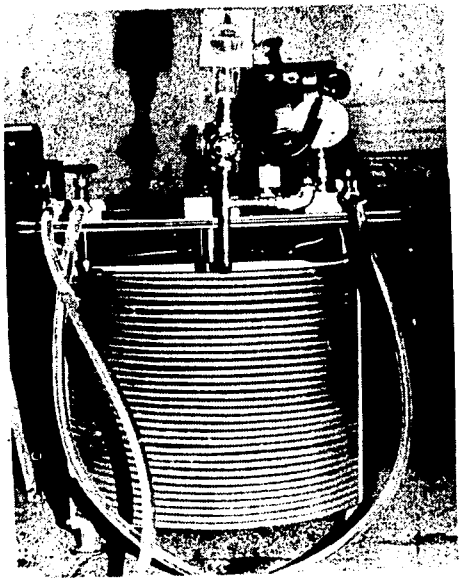
En este inciso se mencionarán algunas recomendaciones -- que se consideran importantes para mejorar, la realización de las pruebas prácticas y el funcionamiento del Generador de -- Golpe de Ariete en el futuro.

La instalación de un medidor de gasto a la salida del Generador de Golpe de Ariete, para tener un mejor control sobre el fluido que se maneja.

La instalación del Generador de Golpe de Ariete en un -- circuito hidráulico cerrado provisto de una bomba y un tanque de almacenamiento para evitar la dependencia que se tiene con el sistema hidráulico del laboratorio y el excesivo derrama-- miento del fluido que se maneja.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

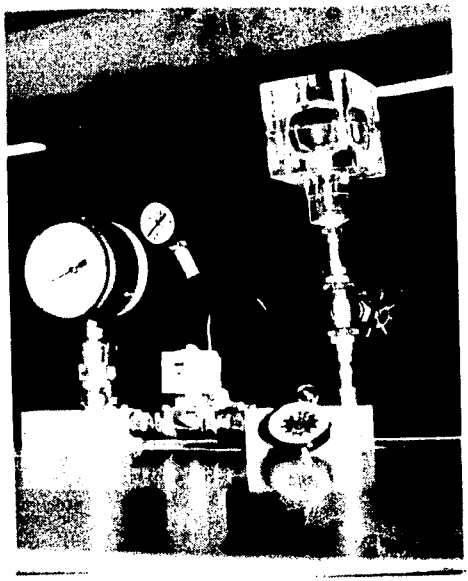
A P E N D I C E A



ASPECTO GENERAL DEL GENERADOR DE GOLPE DE ARIETE

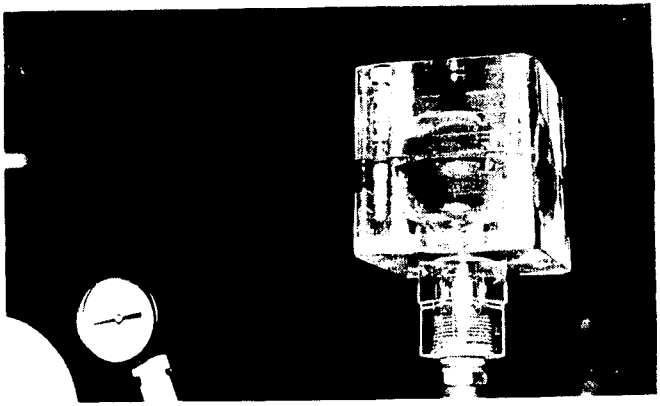
CON EL ACUMULADOR HIDRAULICO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



VISTA PARCIAL DE LOS PRINCIPALES INSTRUMENTOS
DEL GENERADOR DE GOLPE DE ARIETE
Y EL ACUMULADOR HIDRAULICO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



EL ACUMULADOR HIDRAULICO DE VASIJA ELASTICA
DISEÑADO Y CONSTRUIDO EN ESTE TRABAJO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A P E N D I C E B

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	DESCRIPCION	Pág.
1	Ciclo de Eventos en una Válvula Después de un Cierre Rápido.	6
2	Representación Gráfica para la Solución de la Ecuación de Bernoulli.	12
3	Solución para las Ecuaciones 4 y 5.	14
4	El Golpe de Ariete para un Movimiento Uniforme de la Válvula.	17
5	Representación de una Tubería con Cambio en su Sección Transversal.	18
6	Condición para el Equilibrio Dinámico de un Elemento de Agua.	20
7a	Elemento de Agua en Cualquier Tiempo t.	23
7b	Elemento de Agua en un Tiempo t + dt.	23
8	Deformación de un Elemento de la Tubería.	24
9	Representación del Movimiento de la Válvula de Control Situada en la Parte Baja de la Tubería.	29
10	Tubería con un Extremo Cerrado.	31
11	Cambio en la Sección Transversal de una Tubería.	32
12	Unión de Tres o Más Tuberías.	33
13	Tubería con una Válvula Parcialmente Abierta.	33

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA	DESCRIPCION	Pág.
14	Representación de las Diferentes Condiciones Después del Cierre de la Válvula.	38
15	Localización del Punto de Carga Máxima para Diferentes Intervalos de Tiempo.	42
16	Golpe de Ariete para Movimientos Lentos de la Válvula.	44
17	Incremento de Presión por Movimientos Lentos de la Válvula.	45
18	Condiciones Pasajeras Después de la Falta de Poder.	47
19	Curvas del Comportamiento de la Bomba.	50
20	Diagrama de la Región Normal de Operación de la Bomba.	50
21	Parábola del Tipo h = K V en una Gráfica h - v	51
22	Características de Operación de una Bomba.	51
23	Línea de Descarga de una Bomba.	54
24	Gráfica Carga-Velocidad.	55
25	Línea de Descarga cuando Falte Poder en el Motor de la Bomba.	55
26	Análisis Gráfico del Golpe de Ariete cuando Falte Poder en el Motor de la Bomba.	56
27	Gráfica de los Máximos Cambios Positivos y Negativos de Presión.	59
28	Resultados de un Largo Número de Soluciones de Golpe de Ariete.	60

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA	DESCRIPCION	Pág.
29	Solución Gráfica de Golpe de Ariete para una Tubería de Descarga.	64
30	Efectos de un Cierre Rápido de las Válvulas de Retención.	67
31	Efectos de un Cierre Rápido de las Válvulas de Retención.	68
32	Efectos de un Cierre Lento de las Válvulas de Control.	68
33	Solución Gráfica de Golpe de Ariete incluyendo Pérdidas Hidráulicas.	70
34	Pérdidas de Carga Junto a la Solución de Golpe de Ariete y una Falta de Poder en los Motores.	72
35	Unión de Tres Tuberías.	74
36	Solución Gráfica de una Tubería con Conexión Sin Salida.	76
37	Solución Gráfica de un Sistema con Dos Válvulas de Control.	77
38	Tubería con Cambio de Diametro y de Espesor.	80
39	Solución Gráfica de Golpe de Ariete.	85
40	Solución Gráfica de Golpe de Ariete.	87
41	Representación Gráfica de las Ecuaciones Conjugadas.	87
42	Solución para el Cerrado Parcial de la Válvula.	88
43	Solución para cuando la Válvula de Control se encuentra Fuera del Final de la Tubería.	88

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA	DESCRIPCION	Pág.
44	Solución Gráfica Si la Válvula de Control está Localizada en la Parte Superior de la Tubería.	91
45	Solución Gráfica del Golpe de Ariete Producido por la Abertura de la Válvula.	92
46	Gráfica del Máximo Aumento de Carga Producido por la Abertura de la Válvula.	93
47	Máximo Aumento de Carga en la Válvula Debido al Movimiento Rítmico en la Misma.	93
48	Carta de Ray para Movimientos Uniformes de la Válvula.	96
49	Aumento de la Carga en la Válvula Debido al Cierre Uniforme desde Diferentes Posiciones Iniciales.	96
50	Mínima Carga Debido a la Abertura Uniforme de la Válvula.	97
51	Diagrama de Allievi para el Máximo Aumento de Presión con Movimiento Uniforme de la Válvula.	99
52	Diagrama de Allievi para el Máximo Aumento de Presión con Movimiento Uniforme de la Válvula.	100
53	Diagrama de Allievi para la Máxima Caída de Presión para Movimiento Uniforme de la Válvula.	100
54	Acumulador Hidráulico de Contrapeso.	105
55	Acumulador Hidráulico de Muelle o Resorte.	107
56	Acumulador Hidráulico de Nivel Libre.	109

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA	DESCRIPCION	Pág.
57	Acumulador Hidráulico de Pistón.	111
58	Acumulador Hidráulico de Vasija Elástica.	112
59	Acumulador Hidráulico de Membrana Elástica.	113
60	Acumulador de Contrapeso Empleado en un Circuito de Presión Doble.	117
61	Acumulador de Resorte Empleado como Fuente Secundaria de Energía.	119
62	Sincronización del Movimiento de los Pistones de Dos Cilindros.	123
63	Los Acumuladores como Fuente de Energía de Emergencia.	124
64	Ciclo de Preparación y Funcionamiento de un Acumulador Hidráulico.	128
65	Gráfica Presión-Volumen.	137
66	Analogía del Funcionamiento de un Acumulador Hidráulico.	140
67	A.F. A.H. Falta de Poder en la Locomotora.	140
68	A.F. A.H. Choque del Convoy con la Locomotora.	140
69	A.F. A.H. Evitamos el Choque si Existe otra Locomotora.	141
70	A.F. A.H. Falta de Poder en la Bomba.	141
71	A.F. A.H. Choque de la Columna de Agua con la Válvula.	142

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA	DESCRIPCION	Pág.
72	A.F. A.H. Evitamos el Choque - si Existe un Acumulador Hidráulico.	142
73	A.F. A.H. Cierre Brusco de una Válvula.	143
74	A.F. A.H. Muro de Piedra Sólida para Frenar un Convoy.	143
75	A.F. A.H. Via Lateral para Frenar un Convoy.	143
76	A.F. A.H. Línea Lateral con Acumulador Hidráulico para Frenar el Movimiento del Fluido.	144
77	A.F. A.H. Energía Pérdida en - el Arranque de una Locomotora.	144
78	A.F. A.H. Arranque Suave de -- una Locomotora.	145
79	A.F. A.H. Arranque Suave de -- una Bomba con la Ayuda de un Acumulador.	145
80	Diagrama de las Partes Principales de un Acumulador Hidráulico de Vasija Elástica.	147
81	Diagrama de las Condiciones de Equilibrio Estático de un Cilindro.	149
82	Diagrama de las Condiciones de Equilibrio Estático de una Esfera.	151
83	El Generador de Golpe de Ariete de la Universidad Anáhuac.	158
84	Diagrama de la Adaptación del - Acumulador al Generador de Golpe de Ariete.	167

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURA	DESCRIPCION	Pág.
85	Gráfica de los Resultados de -- las Pruebas Experimentales.	188
86	Comportamiento Detallado del Incremento de la Presión en el Generador cuando Opera Con el Acumulador y Sin él.	189

LISTA DE PLANOS

NUMERO	DESCRIPCION
1	Corte Transversal del Acumula-- dor Hidráulico.
2	Plano de Ensamble del Acumula-- dor Hidráulico.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

LISTA DE TABLAS

NUMERO	DESCRIPCION	Pág.
1	Coeficientes de Velocidad y Torque en la Bomba.	57
2	Resultados de las Pruebas Experimentales (Flujo de 0.00161 -- ft /seg.).	177
3	Resultados de las Pruebas Experimentales (Flujo de 0.0022 --- ft /seg.).	178
4	Resultados de las Pruebas Experimentales (Flujo de 0.00353 -- ft /seg.).	179
5	Resultados de las Pruebas Experimentales (Flujo de 0.003678 - ft /seg.).	180
6	Incrementos de la Presión cada 0.0192 segundos para un Flujo - de 0.00353 ft /seg.	181

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

LISTA DE FOTOGRAFIAS

NUMERO	DESCRIPCION	Pág.
1	Aspecto General del Generador de Golpe de Ariete con el Acumulador Hidráulico.	195
2	Vista Parcial de los Principales Instrumentos del Generador de Golpe de Ariete y el Acumulador Hidráulico.	196
3	El Acumulador Hidráulico de Vasija Elástica Diseñado y Construido en este Trabajo.	197

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

B I B L I O G R A F I A

1. Bednar, Henry
"Pressure Vessel Design Handbook"
Van Nostra and Company (1981)

2. "Bladder Accumulator"
Maintenance Manual
Greer Hydraulics Inc. (1979)

3. Daugherty, Robert
"Fluid Mechanics with Engineering Applications"
McGraw Hill Book Company (1977)

4. Davis and Sorensen
"Handbook of Applied Hydraulics"
McGraw Hill Book Company (1970)

5. Egea, Pedro
"Mecanismos Hidráulicos"
Editorial Gustavo Gili (1980)

6. "Fluid Power Products"
Bulletin No. 202
Greer Hydraulics Inc. (1980)

7. Hoelscher, Randolph
"Graphics for Engineers"
John Wiley and Sons, Inc. (1968)

8. "Hydropneumatic Bladderless Surge Arrestors"
Bulletin No. S102
Greer Hydraulics Inc. (1979)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

9. King, Horace
"Handbook of Hydraulics"
McGraw Hill Book Company (1958)

10. Lyons', Jerry
"Lyons' Encyclopedia of Valves"
Van Nostrand Company (1981)

11. Mantell, Charles
"Engineering Materials Handbook"
McGraw Hill Book Company

12. Parmakian, John
"Waterhammer Analysis"
Dover Publications, Inc. (1960)

13. Schlag, Albert
"Hidráulica"
Editorial Limusa (1976)

14. Shigley, Joseph
"Diseño en Ingeniería Mecánica"
McGraw Hill Book Company (1980)

15. Speich y Bucciarelli
"Oleodinámica"
Editorial Gustavo Gili (1980)

16. Streeter, Victor
"Mecánica de los Fluidos"
McGraw Hill Book Company (1980)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

17. Stewart, H.
"Energía Hidráulica y Neumática Industrial"
Editorial Interciencia

18. "Surge in Pipe Lines Carrying Liquids"
Bulletin No. S101
Greer Hydraulics Inc. (1979)

19. "Surgekushon"
Bulletin No. 5005
Greer Hydraulics Inc. (1980)

20. Vickers, Sperry
"Manual de Oleohidráulica"
Impreso en España (1979)

21. Yeapole, Frank
"Applying Hydraulic Accumulators"
Design Engineering
March 1981, pages 45-50

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I N D I C E

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I N D I C E

		PAG.
I.	INTRODUCCION	1
II.	BASES TEORICAS	5
2.1	Definición del Problema	5
2.1.1	El Golpe de Ariete	5
2.2	Ecuaciones Básicas	12
2.2.1	Teoria de la Columna Rigida de Agua	12
2.2.2	Teoria de la Columna Elástica de Agua	19
2.2.3	Ecuaciones Fundamentales de Golpe de Ariete	27
2.2.4	Velocidad de las Ondas de Golpe de Ariete o Celeridad	28
2.2.5	Reflexión de las Ondas en el Golpe de Ariete	28
2.2.6	El Golpe de Ariete para Movimientos Rápidos de la Válvula (Movimientos Instantáneos)	35
2.2.7	El Golpe de Ariete para Movimientos Lentos de la Válvula.	44
2.2.8	El Golpe de Ariete Causado por la Falta de Poder en la Bomba	45
2.2.8.1	Ecuaciones de Inercia	48
2.2.8.2	Características de la Bomba	49
2.2.8.3	Ecuaciones de Golpe de Ariete	54

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

		PAG.
2.2. 9	Análisis Gráfico del Golpe de Ariete	55
2.2.10	Separación de la Columna de Agua	58
2.2.11	Gráficas de Golpe de Ariete	62
2.2.12	Soluciones Especiales de Golpe de Ariete	62
2.2.13	Efecto de las Válvulas de Control	65
2.2.14	Arrancando y Parando las Bombas	67
2.2.15	Análisis del Golpe de Ariete Incluyendo las Pérdidas Hi-- dráulicas	69
2.2.16	Análisis del Golpe de Ariete para Tuberías Compuestas	72
2.3	Métodos de Solución	78
2.3.1	Solución Matemática	78
2.3.2	Método Gráfico de Angus para el Análisis del Golpe de Ariete	79
2.3.2.1	Ecuaciones de Descarga de la Válvula	82
2.3.2.2	Solución Gráfica para el Cerrado de la Válvula	83
2.3.2.3	Solución para una Tubería con Cambio de Diametro	86
2.3.2.4	Solución para el Cerrado Parcial de la Válvula	89
2.3.2.5	Solución para cuando la Válvula de Control se encuen tra Fuera del Final de la Tubería	89

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PAG.

2.3.2.6	Golpe de Ariete Producido por la Abertura de la Válvula	91
2.3.2.7	Golpe de Ariete Producido por el Movimiento Uniforme de la Válvula	94
2.3.3	Método de las Cartas de Allievi	98
III.	ACUMULADORES HIDRAULICOS	101
3.1	Descripción	102
3.2	Tipos Principales de Acumuladores Hidráulicos	104
3.2.1	El Acumulador de Gravedad o Contrapeso	104
3.2.2	El Acumulador de Muelle o Resorte	106
3.2.3	Los Acumuladores Accionados por Aire o por Gas	108
3.3	Diferentes Aplicaciones de los Acumuladores Hidráulicos	115
3.3.1	Acumulador de Contrapeso Empleado en un Circuito de Presión Doble	115
3.3.2	Acumulador de Resorte Empleado como Fuente Secundaria de Energía	117
3.3.3	Sincronización del Movimiento de los Pistones de dos Cilindros	121
3.3.4	Los Acumuladores como Fuente de Energía de Emergencia	123
3.4	El Acumulador de Vasija Elástica	127

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

PAG.

3.4.1 Descripción 127

3.4.2 Calculo de los Acumuladores en sus Diferentes Aplicaciones 129

3.4.3 El Acumulador Hidráulico y el Golpe de Ariete 134

3.4.4 Funcionamiento General de un Acumulador Hidráulico en la Amortiguación del Golpe de Ariete 138

3.4.4.1 Funcionamiento de un Acumulador Hidráulico cuando se Para la Bomba 145

3.4.4.2 Funcionamiento durante el Arranque de la Bomba 146

3.4.4.3 Funcionamiento durante la Reducción de Flujo 148

3.4.5 Diseño de un Acumulador Hidráulico de Vasija Elástica 148

3.4.5.1 Diseño del Recipiente 149

3.4.5.2 Diseño de la Vasija Elástica 152

3.4.5.3 Características de la Válvula de Disco Cónico 152

3.4.5.3.1 Diseño del Resorte de la Válvula de Disco Cónico 153

IV. CALCULO DE UN ACUMULADOR Y SU ADAPTACION A UN GENERADOR DE GOLPE DE ARIETE 156

4.1 Descripción del Aparato de Golpe de Ariete 157

4.2 Cálculo del Acumulador Hidráulico 159

4.2.1 Cálculo de la Carga de Oscilación 159

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PAG.

4.2.2 Cálculo del Volumen del Acumulador 160

4.2.3 Cálculo del Recipiente 161

4.2.4 Cálculo de la Vasija Elástica 162

4.2.5 Cálculo del Resorte de la Válvula de Disco Cónico 163

4.3 Adaptación del Acumulador al Generador de Golpe de Ariete 166

4.4 Instrumentación y Equipo Auxiliar 168

V. CONSTRUCCION Y ADAPTACION DE UN ACUMULADOR 169

5.1 Materiales y Métodos 170

5.1.1 Construcción del Recipiente 171

5.1.2 Construcción de la Vasija Elástica 172

5.1.3 Construcción de la Válvula de Disco Cónico 172

5.2 Resultados Experimentales 174

5.2.1 Objetivos 174

5.2.2 Condiciones y Parámetros 174

5.2.3 Resultados 175

5.2.4 Discusión de las Gráficas 186

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 190

6.1 Conclusiones 191

6.2 Recomendaciones 193

APENDICE A 194

Fotografías 195

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

	PAG.
APENDICE B.	198
Lista de Figuras y Planos	199
Lista de Tablas	206
Lista de Fotografías	207
BIBLIOGRAFIA	209

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN