

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, Centro América

"CONSIDERACIONES SOBRE ARIETES"

TESIS

Presentada a la Junta Directiva

de la

Facultad de Ingeniería

de la

Universidad de San Carlos de Guatemala

por

HECTOR EDUARDO MOLINA MEJIA

al conferírsele el Título de

INGENIERO CIVIL

Guatemala, Enero 1967

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

BIBLIOTECA CENTRAL-USA
DEPOSITO LEGAL
PROHIBIDO EL PRESTAMO EXTERNO

DL
08

T(87)

JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Decano	Ing. Amando Vides T.
Vocal Primero	Ing. Otto E. Becker M.
Vocal Segundo	Ing. Francisco Ubieta B.
Vocal Tercero	Ing. Leonel Pinot L.
Vocal Cuarto	Br. Roberto Orantes T.
Vocal Quinto	Br. Alfonso Padilla J.
Secretario	Ing. José Massanet P.

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

Decano	Ing. Amando Vides T.
Vocal Primero	Ing. Otto Becker M.
Examinador	Ing. Octavio Cordón M.
Examinador	Ing. Roberto Zepeda A.
Secretario	Ing. José Massanet P.

ASESOR DEL TRABAJO DE TESIS:

Ing. Carlos Solares Buonafina

D E D I C A T O R I A

A MIS PADRES

Mario Eduardo Molina Riveiro
María Josefa Mejía A. de Molina

Y

A MIS HERMANOS

Lilian Aida
Raúl Francisco
Sergio Enrique
Imelda Haydée
Gilda Elizabeth
Gloria Yolanda
Oscar Alberto
Ingrid Renée

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con lo establecido por la ley Universitaria presento a vuestra consideración, previo a optar el título de Ingeniero Civil, mi trabajo de tesis intitulado:

"CONSIDERACIONES SOBRE ARIETES"

Tema que me afué asignado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería.

TESIS DE REFERENCIA
NO
SE PUEDE SACAR DE LA BIBLIOTECA
BIBLIOTECA CENTRAL - USAC.

C O N T E N I D O

CONSIDERACIONES SOBRE ARIETES

INTRODUCCION	1
<u>CAPITULO I</u>	2
MAQUINAS ELEVADORAS DE AGUA	2
Historia	2
Potencia Necesaria	8
Fórmulas de Potencia	9
Clasificación de las Máquinas Elevadoras	11
<u>CAPITULO II</u>	12
ARIETES	12
Energía Cinética	12
Energía Potencial	13
Flujo del Agua	14
Pérdidas de Energía	15
Flujo Continuo	17
Flujo Permanente	17

Flujo Uniforme	17
Golpe de Ariete	18
Deducción de Fórmulas	21

CAPITULO III 25

PARTES COMPONENTES DE UNA INSTALACION DE ARIETES HIDRAULICOS 25

Fuente 25

Tubo de Impulsión 25

Ariete 26

Tubería de Descarga 26

Tanque de Almacenamiento 26

Diseño de Obras Auxiliares 26

Condiciones topográficas e Hidrológicas para instalación de Arietes. 27

Aforos 28

CAPITULO IV 29

PARTES COMPONENTES Y FUNCIONAMIENTO DEL ARIETE 29

Partes Componentes:

Válvula de Desperdicio 29

Válvula de Descarga	29
Cámara de Aire	30
Funcionamiento del Ariete:	31
Puesta en Marcha	31
Caudal Disponible	32
Tiempo de Ciclo	33
Elevación de Presión y Gasto en la Descarga	34
Eficiencia	36
Eficiencia Máxima	43
<u>CAPITULO V</u>	46
TIPOS DE ARIETES	46
Tamaño	47
Selección	47
Baterías de Arietes	48
Campo de Aplicación	48
Capacidad	48
<u>CAPITULO VI</u>	51
COSTO DE ARIETES	51

Vida Util	51
Costo	51
Costo Adquisición e Instalación;	52
Costo Operación	53
Costo Inversión	55
Costo Producción	56
Comparación con Costos de Elevación de Agua por medio de Bom- bas	74
CONCLUSIONES	78
BIBLIOGRAFIA	81

I N T R O D U C C I O N

Una de las necesidades inmediatas del hombre es la del agua. La facilidad de obtenerla en cantidades suficientes como agua potable ha incidido en forma determinante en la salud pública propiciando el eficiente desarrollo de las ciudades.

Cabe mencionar su importancia en el aspecto agrícola como agua de riego y en el aspecto industrial por intervenir en una gran cantidad de procesos en las fábricas, además de ser un medio incomparable para la producción de energía eléctrica.

El contacto entre el hombre y el agua no es más que un aspecto del ciclo de ésta en la naturaleza.

El agua debe ser captada y conducida hasta el lugar de consumo.

Cuando éste queda a una elevación menor que la fuente, la conducción se hace por gravedad aprovechando la energía potencial para comunicarle al agua cierta presión y velocidad y para vencer las pérdidas de energía que ocasiona la conducción.

Si la fuente está localizada a una altura menor que el lugar de consumo el agua deberá ser acarreada directamente, o bien emplear máquinas que la eleven por peso o que le aumenten la presión de tal modo que tenga lugar el flujo a través de la tubería de conducción.

El objetivo de este trabajo es estudiar una de estas máquinas elevadoras de agua, el ariete hidráulico, para establecer un criterio que oriente al ingeniero sobre la conveniencia de su uso en nuestro medio; particularmente en el área rural, donde la falta de electricidad o dificultades de mantenimiento y reparación mecánica, hacen deseable un sistema de bombeo de larga vida útil, automático, que necesite de poca supervisión y cuya energía de operación pueda obtenerse de las condiciones topográficas de la localidad.

MAQUINAS ELEVADORAS DE AGUA

Toda máquina transforma un trabajo aplicado en un trabajo útil.

Esto se consigue mediante una disposición adecuada de elementos mecánicos que pueden modificar la magnitud, dirección y sentido de las fuerzas aplicadas.

No todo el trabajo cedido llega a transformarse en trabajo útil pues una parte se pierde en el proceso. La efectividad - conque esta transformación tiene lugar puede medirse con la relación T_u/T_m llamada eficiencia, "e".

El trabajo útil que produce una máquina elevadora de agua es igual al aumento de energía del líquido en virtud de su nueva posición, expresado como la cantidad de agua en peso elevada, multiplicada por la altura de elevación.

El trabajo motor lo ha de proporcionar la fuerza humana, animal, neumática, hidráulica, calorífica o eléctrica.

HISTORIA DE LAS MAQUINAS ELEVADORAS

El uso del cigüeñal para extraer agua de un pozo se conocía ya en Egipto alrededor de 1 550 años A.C. como puede verse - en figuras de los mas antiguos monumentos y puede considerarse - como la máquina más simple para elevar agua.

Con este dispositivo un contrapeso colocado en el extremo de una palanca eleva un recipiente suspendido del otro extremo. El contrapeso se eleva con energía humana por medio de la misma palanca al tirar hacia abajo el recipiente.

La utilización de la rueda es una un progreso apreciable porque facilitó la aplicación de mayor cantidad de fuerza y dió orí

gen a mecanismos de transmisión de la misma.

Como un buen ejemplo de esto se puede considerar la noria, conocida desde antes de la era cristiana en el antiguo Egipto, la cual consiste en una rueda según un plano vertical que posee en su periferia una serie de recipientes que se llenan conforme se van poniendo en contacto con el agua que sumerge la rueda en su parte inferior.

Con este aparato puede utilizarse no solamente fuerza humana sino también de animales domésticos o de la misma corriente de agua y permite elevar una mayor cantidad de la misma.

Pertenece también a la época precristiana el tornillo hidráulico, basado en el plano inclinado, atribuido a Arquímedes (287 - 212 A.C.) aunque se cree que era ya conocido en Egipto.

Con este dispositivo el agua es elevada pasando por una serie de celdas que una superficie helicoidal forma dentro de un cilindro sumergido en su parte inferior en agua y cuyo eje está inclinado con respecto a la horizontal.

El agua se eleva empleando la fuerza de giro en cambiar la posición del plano en que se apoya el agua.

El adelanto logrado hasta esta etapa se limitaba al descubrimiento, aplicación y perfeccionamiento de las máquinas simples, la rueda, la polea, la palanca y el plano inclinado y a la habilidad en transmitir el movimiento en planos diversos.

Sin embargo y a pesar de no tener una idea muy clara del fenómeno del vacío corresponde también a la época precristiana el avance que constituye el uso de las bombas aspirantes y las bombas de impulsión.

Con respecto a las primeras parece haber pruebas de que los griegos contemporáneos de Arquímedes las utilizaron en un diseño sencillo para achicar agua en los barcos.

El Arquitecto e Ingeniero romano Marcus Vitruvius Pollio (16 años A.C.) en sus escritos describe la bomba de impulsión a la que llama máquina de Ctesibio a quién atribuye su invención.

Se sabe que este sabio vivió alrededor del siglo II o III A.C., que escribió un tratado de neumática del que no se tiene conocimiento hoy día y que fue maestro de Filon de Bisancio quien también describió en sus escritos la bomba de impulsión agregando que se usaba también para apagar incendios.

En esta máquina el agua era aspirada al producirse un vacío parcial creado por un pistón que ascendía y luego impulsada en la carrera descendente del pistón.

Los descubrimientos arqueológicos de Bolsena en Italia, Silchester y Metz muestran que se aplicó esta bomba para elevar agua de pozo.

A pesar de representar en si mismas un notable avance, estas máquinas no tuvieron el desarrollo que podía esperarse, posiblemente por la dificultad que había para utilizar otra fuente de energía diferente de la humana para el movimiento de arriba a abajo del pistón.

Es solamente varios siglos después cuando el fenómeno del vacío fue explicado satisfactoriamente cuando pudo perfeccionarse esta ya lejana contribución de Ctesibio, pero en ese período de tiempo se lograron avances en los mecanismos transmisiones del movimiento y en el aprovechamiento de la fuerza hidráulica y de viento por medio de ruedas y molinos.

Así en 1526, la ciudad de Toledo se abastecía por una serie de bombas accionadas por ruedas hidráulicas según un diseño del Ing. Italiano Juanello Turiano. Por la misma época en Gloucester una bomba elevaba agua aprovechando una instalación para molino de viento.

En tiempos de Enrique IV se servía agua al palacio de Louvre y las Tullerías gracias a una instalación existente en el

Puente Nuevo en el Sena.

A medida que fué avanzando el siglo XVI las instalaciones para abastecimiento de agua se hicieron comunes.

En la mayoría de los casos esas instalaciones no representaban un problema muy grande porque no se elevaba el agua a grandes alturas. El problema del volumen se solucionaba multiplicando el número de ruedas y bombas hasta donde fuera necesario.

Corresponde a Galileo, Torricelli, Pascal Boyle (siglos XVI y XVII) el mérito de haber desarrollado una teoría que explicara el fenómeno del vacío, terminando con la confusión que a este respecto se tenía desde Aristóteles.

En 1675 el inglés Moreland patentó la bomba aspirante - impelente que a partir de entonces se usó considerablemente, ya que aparece en 1710 en los edificios públicos de Londres. En este tipo de bomba un motor levanta el émbolo que cae por su peso.

Igualmente importante para la ingeniería mecánica en general fueron los estudios que sobre el vapor de agua hizo Salomón de Caus (1576 - 1630) llegando a establecer que el vapor era un estado del agua, pudiendo pasar de uno a otro por cambio de temperatura.

Sobre estos principios se basó en gran parte el trabajo posterior de Worcester, Savery y Papín en el siglo XVII.

En el año 1650 Eduardo Somerset, 2o. Marqués de Worcester instala en el Castillo de Vauxhall una máquina para elevar agua.

Consistía ésta en dos cámaras a las que llegaba el agua por aspiración después del vacío provocado por la condensación del vapor.

El vapor a presión antes de condensarse expulsaba el a-

gua retenida en las cámaras por la aspiración anterior. El dispositivo perfeccionado se conoce hoy como pulsómetro.

En 1663 el parlamento concedió a Worcester y sus herederos un monopolio para el uso de su máquina durante 99 años y este trabaja en una instalación para abastecer a Londres, pero el proyecto no llega a realizarse.

La máquina de Worcester fué perfeccionada por Tomás Savery (1698) quien extendió su aplicación a trabajo en minas.

Sus principios de operación fueron de utilidad a Newcomen para inventar su famosa máquina atmosférica que aprovecha el vacío creado por la condensación del vapor en un lado de un pistón para que la presión del aire exterior realice un trabajo útil.

La primera máquina atmosférica de que se tiene noticia se construyó cerca de Wolverhampton en 1712 y su misión era elevar agua.

Esta invención marca el comienzo de la utilización de una nueva fuente de energía. Si bien la presión efectiva era la atmosférica la marcha de la máquina se basaba en la producción de vapor lo que no resultaba caro pues se quemaba carbón y además representaba una gran comodidad porque podía construirse en cualquier lugar.

James Watt en la segunda mitad del siglo XVIII completó la teoría de la máquina de vapor haciéndole notables mejoras.

Por otra parte la búsqueda de la utilización de los saltos y corrientes de agua impulsaron una fuerte investigación sobre las ruedas hidráulicas.

Esta se inicia en Leonardo de Vinci (1451 - 1519) quien estudia una rueda hidráulica horizontal. El enfoque del mismo problema muchos años después (siglos XVII y siguientes) - por Phalem, Euler, Defarcieur contribuyen notablemente para el a

provechamiento de las corrientes de agua, culminando con la invención de la turbina hidráulica de Fourneyron en el año 1832.

En este período ya se contaba con una teoría hidráulica - bastante completa, las matemáticas se habían desarrollado grandemente y el método experimental de la ciencia se había impuesto.

En 1796 Montgolfier inventa el ariete hidráulico e instala un buen número de ellos en Lyon Senlis, Mello y Clermont.

Eytelwein en Alemania hace un estudio sobre ellos llegando a establecer eficiencias y a hacer recomendaciones para su construcción, lo que publica en 1842 en su manual de Mecánica e Hidráulica. Sin embargo, y ya para aquella época, los resultados - de algunos arietes instalados por Montgolfier parecían estar en desacuerdo con la teoría de Eytelwein.

Las bombas centrífugas que hoy en día pueden considerarse como los aparatos mas versátiles y eficientes para elevar agua aparecen en el siglo XIX cuando los principios de la Hidrodinámica han sido establecidos y se cuenta con materiales resistentes susceptibles de trabajarse con un alto grado de exactitud, se dispone de aparatos motores de gran capacidad y pueden producirse grandes - velocidades de rotación.

Sus orígenes puede notarse, sin embargo en los trabajos - sobre hidráulica de Leonardo de Vinci y en los de Besson (1561).

En la exposición universal de París en 1855 se presentan ya bombas centrífugas; la Appold construída por Eaton & Amos en Londres y la Gwynne también construída en Londres.

Lebleu en 1867 describe bombas rotatorias ya construídas y en 1879 el Ing. Chizzolini inventa una forma de bomba de hélice, la cual es modificada por Guidi quien la usa para desecar mareas - Ostia.

A partir de la segunda mitad del siglo XIX el perfecciona -

miento tanto de motores hidráulicos como de bombas ha sido incesante al igual que el de la producción y distribución de la energía. Los motores eléctricos y de combustión interna de altas velocidades y no grandes dimensiones han permitido el uso cada vez mayor de bombas centrífugas lo que ha incidido en un perfeccionamiento de las mismas.

POTENCIA NECESARIA

La finalidad del trabajo útil de una máquina elevadora es satisfacer las necesidades de los consumidores. Esta necesidad es continua y puede medirse como la cantidad de litros o galones del líquido que se consumen por día. Lo que indica que la máquina debe realizar su trabajo, elevar una cantidad de agua en peso una altura determinada, en un tiempo máximo fijo, es decir a una potencia mínima determinada ya que trabajo en unidad de tiempo es potencia.

Por lo general la máquina trabajará a una potencia mu - cho mayor para evitar hacerlo continuamente pudiendo seleccionar se el período de operación.

La potencia motora quedará entonces determinada cuando se conozca la cantidad de agua en peso por elevar, la altura - de elevación, el tiempo de operación y la eficiencia del sistema, - máquinas y tubería, esto último para proveer una cantidad adicional de energía que se ha de perder en el proceso.

Así, la potencia con que opera un ariete habrá de ser - en general menor que la de una bomba para satisfacer iguales necesidades en el consumo, pues el ariete opera continuamente, - mientas que la bomba lo hace a intervalos más cortos.

UNIDADES DE MEDIDA DE POTENCIA SISTEMA METRICO MKS

$$\text{WATT} = \frac{\text{IOULE}}{\text{SEG}} = \frac{\text{NEWTON} \times \text{M}}{\text{SEG}} = \frac{\text{KG} \times \text{M}/\text{SEG}^2 \times \text{M}}{\text{SEG}}$$

Donde

KG es kilogramo masa

M es metro

SISTEMA GRAVITACIONAL

$$\frac{\text{KGF} \times \text{M}}{\text{SEG}}$$

Donde

KGF es kilogramo fuerza

y las anteriores magnitudes y letras correspondientes

$$\text{CV} = 75 \text{ KGF} - \text{M}$$

Donde CV es caballo de vapor

SISTEMA INGLES

$$\frac{\text{LIBRA} - \text{PIE}}{\text{SEG}}$$

$$\text{HP} = 550 \frac{\text{LB} - \text{PIE}}{\text{SEG}} + 33000 \frac{\text{LB} - \text{PIE}}{\text{MIN}}$$

Donde HP es caballo de fuerza (Horse Power)

FORMULAS DE POTENCIA

A continuación se expondrán las fórmulas de potencia en función de variables que mide la Hidráulica. Estas fórmulas se referirán a la potencia motora por lo que se introducirá el valor

"e" eficiencia.

SISTEMA METRICO

$$P = \frac{F \times E}{e \times T} = \frac{KGF \times M}{e \times T} = \frac{V \times w \times H}{e \times T}$$

W corresponde al peso específico y si se llama caudal "Q" al valor V/T, volumen por unidad de tiempo, queda

$$P = \frac{wQH}{e}$$

Si w se expresa en KGF por litro, Q en litros por seg y H en metros la potencia quedará expresada en

$$\frac{KGF - M}{SEG}$$

Si las variables se miden en las mismas unidades anteriores la potencia expresada en watts será

$$P = \frac{9.81 w Q H}{e}$$

Ya que 1 KGF = 9.81 newtons

SISTEMA INGLES

$$P = \frac{wQH}{e}$$

Si w se expresa en LIBRAS/PIE CUB. Q en PIES CUB./SEG y H en PIES la potencia quedará expresada en

$$\frac{LIBRAS - PIE}{SEG}$$

Si se quiere expresar la potencia en H.P. se debe dividir por 550
ya que 1 H.P. equivale a 550 LB - PIE
SEG

CLASIFICACION DE LAS MAQUINAS ELEVADORAS

Se tomará en cuenta en esta clasificación las máquinas que son construídas en forma industrial que son las que generalmente el ingeniero habrá de seleccionar e instalar y se hará tomando en cuenta su principio de operación.

A BOMBAS CENTRIFUGAS

A - 1 Bombas de circulación axial

A - 2 Bombas de circulación radial

A - 3 Bombas de circulación mixta

B BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO

B - 1 Bombas rotativas

B - 2 Bombas de pistón

C BOMBAS ACCIONADAS POR FLUIDOS DIRECTAMENTE

C - 1 Inyectores hidráulicos

C - 2 Inyectores neumáticos de aire o vapor

C - 3 Arietes

CAPITULO II

ARIETES

Los arietes utilizan la energía cinética del agua causada por una caída, en producir un trabajo útil, elevando parte de esa agua a una altura mayor.

Esto se consigue debido a una sobre - elevación de la presión, causada por el detenimiento súbito del agua en movimiento.

En el ariete y en la tubería de impulsión tienen lugar, debido a este fenómeno, transformaciones de energía hidráulica, por lo que me parece oportuno estudiar a continuación sus diversas formas.

La energía es la habilidad para producir trabajo; como se ha visto anteriormente se mide en KGF - METRO, LIBRA-PIE o JOULES.

Las dos formas en que se manifiesta son como energía potencial y como energía cinética.

La energía potencial de un líquido puede considerarse como energía debida a la posición que ocupa con respecto a un nivel determinado o como energía debida a su confinamiento.

ENERGIA CINETICA

Es la habilidad del líquido para producir trabajo en virtud de la velocidad de sus partículas.

Su valor es igual a la mitad de la masa del líquido multiplicada por el cuadrado de la velocidad que posee y está expresada así:

$$E_c = \frac{M \times V^2}{2}$$

Como la masa es igual al peso dividido entre la aceleración de la gravedad la fórmula puede expresarse en función del peso

$$E_c = \frac{W V^2}{2g}$$

Siendo: W el peso, V, velocidad y g la aceleración de la gravedad.

Si expresamos el peso en KGF, la velocidad en METROS/SEG y la aceleración de la gravedad en M/SEG², la expresión

$\frac{V^2}{2g}$ quedará expresada en

$$\frac{(M/SEG)^2}{M/SEG^2} = \text{METROS}$$

Considerando W = 1, la expresión $V^2/2g$ dará la energía por unidad de peso expresada en KGF - METROS.

Al valor $V^2/2g$ se le llama carga de velocidad.

ENERGIA POTENCIAL DE ELEVACION

Es la habilidad de desarrollar un trabajo en virtud de la fuerza de gravedad, en cuanto que el líquido puede pasar a otra posición variando su altura respecto a un plano, dado en una cantidad "H".

El trabajo realizado sería igual a WH, siendo W el peso del líquido.

Considerando W = 1, el valor "H" dará la energía por

unidad de peso expresada en KGF - METROS si se ha tomado estas unidades de medida. A este valor se le llama carga de altura.

ENERGIA POTENCIAL DE PRESION

Es la habilidad para producir trabajo, debido a la presión a que está sometido el líquido.

Se diferencia de las anteriores formas de energía en que ninguna masa de líquido la posee por si misma, sino en virtud del contacto con otras masas que tienen alguna forma de energía.

La presión puede realizar un trabajo cuando es posible el movimiento del líquido en alguna dirección.

Si es "A" la sección transversal del conducto perpendicular a la dirección del movimiento, la fuerza ejercida será $P \times A$, el trabajo realizado será $P \times A \times L$, siendo "L" la distancia a lo largo de la cual actúa la fuerza $P \times A$. Habiéndose realizado a expensas de una cantidad de líquido en peso, de $A \times L \times w$ por lo que el trabajo por unidad de peso será

$$\frac{P \times A \times L}{A \times L \times w} = \frac{P}{w}$$

Que dimensionalmente se expresa en unidades de longitud si se usan KGF y metros; el valor P/w se expresará en metros y será la carga de presión.

FLUJO DE AGUA

El agua puede escurrir libremente sobre la superficie de la tierra o en conductos contruídos especialmente para ese efecto. Si el líquido está animado de una velocidad media "V", en la unidad de tiempo habrá recorrido una distancia "V" que multiplicada por la sección transversal atravesada "A", da el volúmen que ha pasado por la sección en la unidad de tiempo. A este valor

mencionado se le llama gasto "Q" y como se ha mostrado es igual a:

$$Q = A \times V$$

En las consideraciones que se harán seguidamente me referiré tan solo a las tuberías a presión.

PERDIDAS DE ENERGIA

El movimiento del agua implica una transformación de energía de la misma.

En una conducción de agua la resistencia al movimiento que ofrecen las paredes del conducto y principalmente de las mismas partículas del fluido hacen que una parte de esa energía se consuma transformándose en calor.

La pérdida de energía depende de la velocidad del líquido, la rugosidad, diámetro y longitud de la tubería conductora y puede expresarse, mediante la fórmula de Darcy - Weisbach, entre otras.

$$H_f = f \frac{V^2}{2g} \times \frac{L}{D}$$

Donde f es un factor que depende de la velocidad del líquido y su viscosidad y del diámetro de la tubería. V es la velocidad, L es la longitud y D el diámetro del tubo.

La energía total por unidad de peso en cualquier punto "A" de un líquido en movimiento será

$$ET_A = \frac{V_A^2}{2g} + H_A + \frac{P_A}{w}$$

Usualmente la energía total del líquido se refiere al centro de la sección considerada. Para un conducto circular la pre-

sión y altura promedio corresponderá a las del centro de la sección y se puede asumir sin introducir un error apreciable que las partículas del líquido están animadas de la misma velocidad por lo que la energía total por unidad de peso en la sección considerada será

$$E = \frac{V^2}{2g} + H + \frac{P}{w}$$

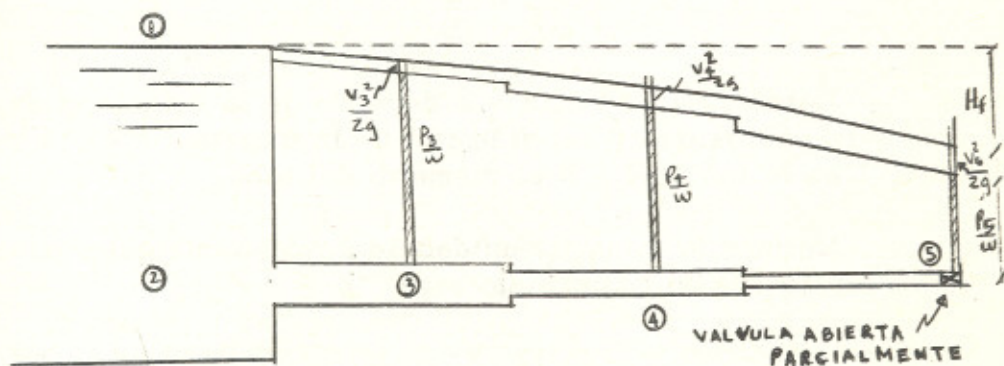
Al evaluar la energía total en diferentes secciones del conducto podrá determinarse la pérdida que ocasiona la conducción.

Se llama gradiente de energía la línea que une los diferentes valores de la energía total, expresados como altura de agua respecto a un plano dado.

Se llama gradiente hidráulico a la línea que une los diferentes valores de energía potencial expresadas como altura de agua respecto al plano anterior.

La carga de velocidad separa estos niveles de energía. En la figura se muestra un esquema de una conducción simple que ilustrará lo que se ha expuesto.

FIG. 1



La válvula en (5) impide el flujo del agua. Al no haber movimiento no hay pérdida de energía. La energía en los diversos puntos es la misma aunque aparece en diversas formas. En (1) será energía de elevación y en (2) (3) (4) y (5) - energía de presión.

Si la válvula se abre parcialmente se establecerá una corriente de agua cuya velocidad dependerá de la abertura de la válvula y de las características del sistema, carga total que produce el movimiento y la resistencia total al mismo.

El gasto quedará determinado por la sección de la tubería en la descarga y con ello las diferentes velocidades en cada punto de la conducción que presente diferente sección transversal.

Esto origina una determinada línea de la gradiente de energía y de la gradiente hidráulica como se muestra en la figura

FLUJO CONTINUO

Cuando el número de partículas del líquido que atraviesan cada sección de la tubería en la unidad de tiempo constante, se trata de un flujo continuo; se supone que el agua es incompresible y que a lo largo de la conducción no hay derivaciones de tubería.

FLUJO PERMANENTE

Si el gasto es constante para cada sección y tiempo considerado el flujo es permanente en esa sección. La gradiente de energía y la gradiente hidráulica variarán a lo largo de la tubería pero no se modificarán con el tiempo.

FLUJO UNIFORME

Se presenta cuanto tanto la velocidad como el gasto per-

manecen constantes con el tiempo en todas las secciones de la tubería.

Para que un flujo permanente sea uniforme es necesario que la tubería sea del mismo diámetro. La inclinación de la gradiente de energía y de la gradiente hidráulica será la misma y permanecerá invariable con el tiempo.

Como ejemplo de flujo no contínuo ni permanente puede darse el que ocasiona el fenómeno hidráulico conocido como Golpe de Ariete.

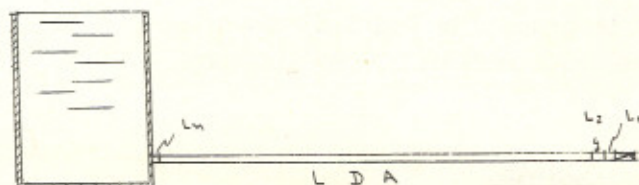
El flujo a través de una tubería que descarga de un tanque hidroneumático y en general el que se produce por una carga total de energía variable con el tiempo, será un ejemplo de flujo no permanente. En tanto que un flujo no uniforme será aquel en que la tubería no sea del mismo diámetro.

GOLPE DE ARIETE

Cuando en un punto de una tubería a través de la cual corre el agua se interrumpe bruscamente el paso de esta, se produce una elevación de la gradiente hidráulica por encima de la presión estática correspondiente al transformarse la energía cinética en energía de presión. A este fenómeno se le llama Golpe de Ariete.

La anulación de la velocidad del líquido se conseguirá a expensas de un trabajo a realizar, la expansión de las paredes del tubo y la compresión del agua.

FIG. 2



Refiriéndose a la figura que muestra una tubería de sección A , longitud L , y diámetro D que parte del recipiente y termina en una válvula, se estudiarán las características del fenómeno.

Inmediatamente después que la válvula se cierra, el volumen de agua contenido en la longitud L , animado de una velocidad " V " es obligado a detenerse.

Mientras menor sea el tiempo en que este paro ocurre, la fuerza producida será mayor ya que:

$$F = M \times a$$
$$F = \frac{M(V - V_f)}{T}$$

Siendo en este caso $V_f = 0$

Podría pensarse que en un paro súbito, el tiempo es cero, con lo que la fuerza será infinita, pero esto es imposible pues el detenimiento del agua se consigue solamente después que esta efectúa un trabajo al deformar la tubería y deformarse ella misma.

Cuando el volumen contenido en L_1 se ha inmovilizado, una presión alta mantiene confinado en esa parte de la tubería, una cantidad de agua mayor que lo normal, debido a la expansión del conducto y a la compresión del agua.

Inmediatamente la sección L_2 se habrá de inmovilizar con la consiguiente elevación de la presión hasta un valor exactamente igual al logrado anteriormente, pues la longitud L_1 se considera igual a la longitud L , está animada de la misma velocidad que lo estaba ésta, y el trabajo a realizar es el mismo.

Al ser la presión igual, la sección L_2 mantendrá confinada la sección L , con lo que la presión persiste.

Así sucesivamente van quedando en reposo todas las secciones en la tubería propagándose la perturbación en forma de una onda de presión dando por resultado una sobre-elevación de la

presión en todo el tubo con la consiguiente deformación del mismo y del agua contenida.

Cuando la sección última L_n es detenida, no puede anlarse ya más velocidad, por lo que la tubería tiende a comprimirse arrojando el líquido hacia el recipiente.

Este movimiento se propaga desde la sección última L_n hasta la válvula permitiendo un gradual retorno a la presión normal en la tubería.

Sin embargo debido a la inercia del líquido, que estando en exceso en la tubería se mueve hacia el depósito, una cantidad de más regresa, dando por resultado que en la válvula la presión decrece de lo normal.

Esta presión negativa se propaga entonces hacia el recipiente hasta hacer que toda la tubería se encuentre a una presión menor.

La sección última L_n debido a la carga que actúa en - ella retorna inmediatamente a la presión normal y sucesivamente - todas las demás hasta alcanzar la válvula, con lo que se tiene de nuevo las condiciones que dieron origen al fenómeno.

Este se repite una y otra vez, pero las pérdidas de - energía ocasionada hacen que vaya reduciéndose hasta desaparecer.

Si la válvula se ha cerrado en un período de tiempo "T" menor al que toma la perturbación en ir hasta el depósito y regresar para iniciar la etapa de depresión, el efecto producido es equi - valente al de cierre instantáneo, porque la presión habrá estado - aumentando cada pequeño cierre de la válvula. Mientras que si ese período de tiempo es mayor, es decir si $T > 2L/V_w$ siendo L la longitud de la tubería y V_w la velocidad de la onda, habrá una super posición de efectos, el de la anulación de cierta velocidad, con el consiguiente aumento de la presión y el efecto de depresión que ocasiona la onda de presión negativa.

Por convenir al propósito de este trabajo, se estudiará el caso en que $T \leq 2L/V_w$

DEDUCCION DE FORMULAS

Se igualará el valor de la energía cinética del agua antes del paro súbito, al trabajo realizado en expandir las paredes del conducto y en comprimir el líquido.

ENERGIA CINETICA

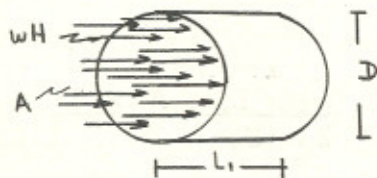
Para el volúmen de agua contenido en la sección L_1 será:

$$E_c = \frac{1}{2} MV^2 = \frac{w}{g} \times A \times L_1 \times \frac{V^2}{2}$$

TRABAJO REALIZADO EN EL AGUA

Siendo E_A el módulo de elasticidad del agua. Y H la elevación de la gradiente hidráulica.

FIG. 3



El trabajo habrá sido:

$$T = \frac{wH}{2} \times A \times e$$

Tomando no el valor final de la presión "wH" sino el promedio de ésta ya que al principio de la deformación era "0".

"e" = $\frac{wH}{E_A} \times L_1$, por lo que la expresión final del trabajo será:

y despejando a H, queda

$$H = \frac{V}{\sqrt{\frac{w}{g} \left(\frac{1}{E_A} + \frac{D}{E_T b} \right)}}$$

Interesa conocer la velocidad con que se propaga la onda de presión. En un tiempo "t" una porción del líquido de volumen $V_w \times t \times A$ es detenido. Este tiene una masa de $V_w \times t \times A \times \frac{w}{g}$ y estaba animado de la velocidad "V".

El cambio de la cantidad de movimiento por unidad de tiempo es igual a la fuerza aplicada, $w \times H \times A$.

$$V_w = \frac{g H}{V}$$

Sustituyendo el valor de H

$$V_w = \frac{g}{V} \times \frac{V}{g} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{w}{g} \left(\frac{1}{E_A} + \frac{D}{E_T b} \right)}}$$

$$V_w = \frac{1}{\sqrt{\frac{w}{g} \left(\frac{1}{E_A} + \frac{D}{E_T b} \right)}}$$

que equivale a la velocidad del sonido en la tubería ya que este se transmite por medio de ondas de presión.

La carga H de sobre presión puede expresarse también así:

$$H = \frac{V \times V_w}{g}$$

Los arietes hidráulicos aprovechan los efectos del golpe de ariete, tanto en sus fases de sobre presión como de de

presión para elevar agua de una manera automática.

El funcionamiento automático se logra mediante una adecuada disposición, proporción y operación de válvulas que conducen el líquido alternativamente a la tubería de descarga y al desagüe de la máquina.

La velocidad del agua, que al anularse produce la presión necesaria se suministra por medio de una diferencia de nivel entre la fuente y el ariete. Para evitar la fatiga del material de la máquina y para regularizar el gasto a través de la tubería de descarga se incorpora al aparato cámara de aire.

Los arietes hidráulicos se diseñan para resistir grandes presiones por lo que se usan materiales de gran resistencia, su construcción es sencilla en cuanto a las partes que lo componen, al igual que el trabajo que cada una de ellas realiza.

En el capítulo siguiente se describirán las partes componentes de una instalación de arietes y en los subsiguientes, las partes de que se componen estas máquinas y como funcionan.

CAPITULO III

PARTES COMPONENTES DE UNA INSTALACION DE ARIETES HIDRAULICOS

Se describirán en el orden en que intervienen en el proceso de transporte del agua desde la fuente al lugar de consumo.

FUENTE:

Esta puede ser una corriente de agua o un pozo artesiano surgente. En el primer caso se hará una pequeña presa y en segundo se hará fluir el agua aprovechando la carga de presión - de una columna vertical del líquido formada por el pozo artesiano.

TANQUE DE ALIMENTACION

Cuando no es posible alimentar el ariete directamente de la fuente se usa un tanque colocado de modo que el tubo de impulsión llene todos los requisitos que recomiendan los fabricantes. El tanque es alimentado por una tubería de diámetro adecuado provisto de una coladorea en su parte superior. En vez de un tubo puede usarse en muchos casos, un canal. Las dimensiones del tanque dependerán del agua a utilizar.

TUBO DE IMPULSION

Este conducto llevará el agua impulsora desde la fuente o el tanque de alimentación al ariete. Su diámetro variará según el tamaño del ariete a usarse. Para cada situación de bombeo existirá una longitud más adecuada, la que se tratará de lograr. Debe estar construido de tubería galvanizada o de acero. Según el tamaño de los arietes que alimenta, tienen juntas roscadas, bridas o de plomo.

El tubo debe colocarse con una inclinación uniforme para una operación satisfactoria del ariete, debiéndosele adaptar una válvula de paso para suspender la operación de bombeo.

ARIETE

Este debe ser montado sobre una base de concreto mediante pernos. Debe estar en un lugar a prueba de inundaciones y otras posibles causas de destrucción. Se recomienda encajar el ariete en una caseta construída con ladrillos o concreto.

Se debe proveer un drenaje para el agua desperdiciada.

TUBERIA DE DESCARGA

Por medio de esta tubería se entrega el agua del ariete al sitio de consumo. Su diámetro está limitado a modo de tener una pequeña pérdida de carga.

TANQUE DE ALMACENAMIENTO

El tanque de almacenamiento sirve para proporcionar - agua en los momentos de mayor demanda, ya que el ariete bombea lentamente acumulando agua en los momentos de menor o - inexistente demanda.

Puede construirse sobre una torre o partes altas de los edificios y su capacidad dependerá de la demanda diaria del sistema.

CONSTRUCCION DE OBRAS AUXILIARES

Se entenderá por tales, aquellas construcciones que - deben emprenderse para la instalación del ariete y las tuberías. Los materiales que usaran principalmente; tierra, mampostería y hormigón.

Si la presa de captación de agua, se construye de tierra se podrá tomar esta de las inmediaciones del lugar compactándose adecuadamente. El ancho deberá ser alrededor de 1/4 de la

altura, con un mínimo de 4'. Los taludes se adoptarán de acuerdo con el ángulo de reposo del material. En la unión entre el suelo y la presa deberá eliminarse todo aquel material inadecuado y la materia orgánica.

También se podrá construir de mampostería o concreto, y en general, debido a su pequeño tamaño no requerirá un estudio especial.

Usualmente la caseta del ariete no estará sometida a esfuerzos muy grandes, su misión es defender la máquina de los agentes atmosféricos y otros percances que pudieran dañarla.

Sus dimensiones dependerán del tamaño del ariete y podrá construirse de ladrillos o concreto.

El resto de las obras auxiliares la constituirán depósitos de agua para alimentación del ariete o para almacenamiento, los cuales deben ser cubiertos con una losa de concreto colocándose un tubo de ventilación y otro de rebalse.

CONDICIONES TOPOGRAFICAS E HIDROLOGICAS PARA INSTALACION DE ARIETES

CONDICIONES TOPOGRAFICAS

Al tomarse el agua superficial, como en el caso de un río o presa para operar un ariete, es necesario contar con una caída mínima de 0.50 metros, es indudable que para obtener mejores rendimientos se debe procurar conseguir mayores caídas. El terreno debe proveer suficiente desnivel en poca distancia para ese efecto y también para permitir el drenaje del agua de desperdicio que sale del ariete. Para la mayoría de los arietes que se encuentran en el comercio, una caída de 2 a 4 metros produce resultados satisfactorios mejorando al aumentar aquella.

En algunos casos puede enterrarse el ariete, siempre

CAPITULO IV:

PARTES COMPONENTES DEL ARIETE HIDRAULICO:

Consta de una caja de válvulas y una cámara de aire.

CAJA DE VALVULAS:

Está constituida por tres válvulas, la válvula de desperdicio, la válvula de descarga y la válvula de aire.

VALVULA DE DESPERDICIO:

Esta válvula es la que produce el golpe de ariete al cerrarse súbitamente, impulsada por el agua que está descargándose a la atmósfera. Se abre hacia abajo accionada por el peso propio y la presión atmosférica cuando la onda de depresión la alcanza. Su carrera es vertical pudiéndose en algunos casos modificar según las variedades del agua alimentadora con lo que se modifica también el período de su operación.

VALVULA DE DESCARGA:

Su función es comunicar la caja de válvulas con la cámara de aire.

Se abre hacia arriba debido a la sobre-presión ocasionada en la caja de válvulas por el golpe de ariete, la cual vence el peso propio y el de la columna de agua que la mantiene normalmente cerrada, dejando pasar una cantidad de líquido que, parte es impulsada a la tubería de descarga, y parte es almacenado en la cámara de aire, ya que el orificio de salida hacia la descarga es menor que el orificio que presenta la válvula al paso del agua.

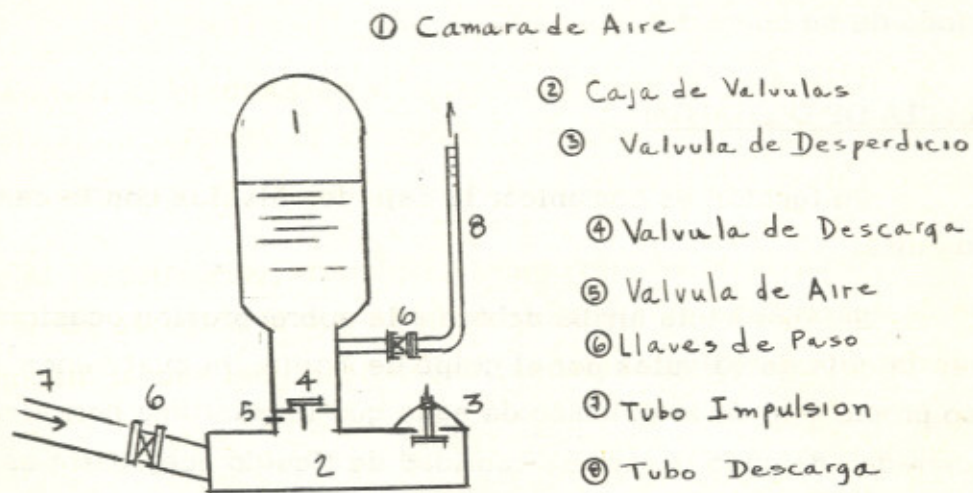
VALVULA DE AIRE:

Esta válvula se abre hacia adentro, su función es mantener el mismo volumen de aire en la cámara de aire, lo que se consigue cuando en la etapa de depresión que tiene lugar en la caja de válvulas, la presión atmosférica hace entrar una cantidad de aquél que compensa la parte que se pierde por mezcla con el agua descargada.

CAMARA DE AIRE:

En este recinto, el agua que ha entrado comprime una masa de aire que se encuentra allí, atenuando el efecto destructivo del golpe de ariete por fatiga del material y almacenando a presión una cantidad de líquido que permitirá regularizar el gasto cuando no esté pasando agua de la caja de válvulas.

FIG. 5 ESQUEMA



FUNCIONAMIENTO DEL ARIETE:

PUESTA EN MARCHA

Se abre la válvula de paso entre la tubería de impulsión y la máquina. El agua alcanza una velocidad "V" en el tubo de impulsión que cierra la válvula de desperdicio produciendo el golpe de ariete.

La válvula de desperdicio se abre hacia adentro de la caja de válvulas accionada por su propio peso, y por el efecto de depresión del golpe de ariete.

Las fuerzas que actúan sobre ella al momento del cierre, son el peso propio, "P". La presión correspondiente a la velocidad "V" multiplicada por el área de la válvula, $K^1(V)^2$ y la fuerza de choque proporcional a la velocidad al cuadrado, K^2V^2 , es decir una función de la velocidad al cuadrado $F(V)^2$ y algunas veces una resistencia elástica "R".

Cuando $F(V)^2 > P+R$ la válvula de desperdicio se cerrará, dependiendo este cierre, del peso y forma de la válvula, de las restricciones que se impongan y de la velocidad de la corriente.

Como cada máquina debe tener cierta versatilidad, la válvula de desperdicio es ajustable a fin de que el golpe de ariete se produzca diferentes velocidades, dependiendo del caudal disponible.

Durante los primeros golpes de ariete debe mantenerse cerrado la válvula de paso entre la máquina y la tubería de descarga para almacenar aire en la cámara de aire.

CAUDAL DISPONIBLE:

Según el caudal de agua impulsora con que se cuenta se escoge el tamaño del ariete cuando lo que se quiere es elevar la mayor cantidad posible.

A cada tamaño de ariete se debe adaptar un tubo de impulsión de diámetro determinado por la entrada que ofrece la máquina.

El agua se acelera en el tubo de impulsión partiendo del reposo, gracias a la carga o caída disponible, hasta alcanzar la velocidad "V".

El caudal promedio que habfa estado pasando por la máquina en ese tiempo será: $\frac{V \times A}{2}$

Y el caudal promedio con que opera el ariete tomando en cuenta el tiempo en que permanece cerrada la válvula de desperdicio será:

$$Q = \frac{V \times A}{2} \times \frac{t_1}{t_1 + t_2}$$

Siendo A, la sección del tubo de impulsión; t_1 el tiempo en que se cierra la válvula de desperdicio y t_2 el tiempo en que el agua comienza a salir por ella a partir del momento del cierre.

El tiempo t_1 puede valuarse, aplicando las fórmulas del movimiento uniformemente variado de la mecánica así:

$$V = g \frac{h}{L} t_1$$

$$\frac{V L}{g h} = t_1$$

Y el tiempo t_2 considerando la velocidad de propagación de la onda de presión cuyo valor V_w se dedujo en la capítulo II.

El tiempo t_2 será aquel que consta de las etapas de sobre presión; en que pasa agua de la caja de válvulas a la cámara de aire, depresión y presión normal en el tubo de impulsión, pudiendo expresarse como

$$t_2 = \frac{4L}{V_w}$$

TIEMPO DEL CICLO:

El tiempo de ciclo, o tiempo de pulsación será la suma de t_2 y t_1 ,

$$T_c = \frac{4L}{V_w} + \frac{VL}{gh}$$

y el inverso de este valor el número de pulsaciones por la unidad de tiempo considerada.

$$N = \frac{1}{\frac{4L}{V_w} + \frac{VL}{gh}}$$

PERDIDAS DE ENERGIA POR FRICCION

La pérdida por fricción en la tubería de impulsión y de descarga se puede determinar por medio de la fórmula de Darcy

$$\text{Weisbach } h_f = \frac{V^2}{2g} \times \frac{L}{D}$$

Esta pérdida reduce la energía motora en la tubería de impulsión y en la tubería de descarga aumenta el trabajo a realizar al hacer crecer la altura de descarga hasta un valor equivalente al desnivel físico más la pérdida por fricción. Por tal motivo se recomiendan velocidades pequeñas.

ELEVACION DE PRESION Y GASTO EN LA DESCARGA:

Al cerrarse la válvula de desperdicio, el agua en movimiento del tubo de impulsión, es súbitamente obligada a perder velocidad, ocasionando un aumento de presión el cual depende de las condiciones elásticas de la tubería y el líquido y de la velocidad anulada.

Mientras llega el reposo este volumen de agua, una parte de ésta ha pasado a la cámara de aire a través de la válvula de descarga donde la presión existente la impulsa por la tubería de salida elevándola.

Para conocer el volumen de agua elevado en cada pulsación se procederá en forma similar a la utilizada en la deducción de las fórmulas del golpe de ariete del capítulo II, considerando en este caso como pérdida de energía útil la empleada en comprimir el agua y esforzar las paredes del conducto.

La energía cinética del agua antes del cierre de la válvula de desperdicio es $E_C = \frac{wALV^2}{2g}$

la cual reaparecerá como energía potencial de una cantidad de agua en peso elevada hasta una altura "H" medida a partir de la válvula de desperdicio de la máquina; y como trabajo elástico, en la tubería y el líquido.

Si se expresa la cantidad de agua elevada como una parte "r" del agua contenida en el tubo de impulsión, y tomando en cuenta que la presión existente en la caja de válvulas antes del golpe de ariete es sensiblemente la presión estática "wh", dado el pequeño valor de V se puede escribir la ecuación

$$\frac{wALV^2}{2g} = \frac{w^2 (H-h)^2 AL}{2E_A} + \frac{w^2 (H-h)^2 DAL}{2E_T b} + wAlrH$$

Siendo E_A y E_T , los módulos de elasticidad del agua y tubería expresados en las correspondientes unidades.

De donde:

$$V^2 = \frac{wg (H-h)^2}{E_A} + \frac{wg (H-h)^2 D}{E_T b} + 2rHg$$

$$V^2 = \frac{g^2 (H-h)^2}{g} \times \frac{w}{g} \times \left(\frac{1}{E_A} + \frac{D}{E_T b} \right) + 2rHg$$

Ahora bien el valor

$\frac{w}{g} \left(\frac{1}{E_A} + \frac{D}{E_b} \right)$ representa el inverso de la velocidad de propagación de la onda al cuadrado, como se demostró en el capítulo II.

Por lo que la ecuación queda

$$V^2 = \frac{g^2 (H-h)^2}{V_w^2} + 2r Hg$$

De donde:

$$\frac{V^2 - g^2 \frac{(H-h)^2}{V_w^2}}{2 H g} = r$$

EFICIENCIA

La energía potencial obtenida será

$$\frac{V^2 - g^2 \frac{(H-h)^2}{V_w^2}}{2 H g} \times w A L \times H = \frac{\left[V^2 - g^2 \frac{(H-h)^2}{V_w^2} \right] w A L}{2 g}$$

y la energía cedida (E.Ced) la constituirá el agua que ha escapado por la válvula de desperdicio que puede determinarse sabiendo que el gasto promedio ha sido $\frac{V \times A}{2}$, la caída "h" y el tiempo transcurrido $\frac{VL}{gh}$.

$$E. \text{ Ced} = w \times \frac{V \times A}{2} \times \frac{VL}{gh} \times h = \frac{wALV^2}{2g}$$

La eficiencia teórica será:

$$e_t = \frac{\left[V^2 - \frac{g^2 (H-h)^2}{V_w^2} \right] \cancel{wAL}}{2g} \div \frac{\cancel{wAL} V^2}{2g}$$

$$e_t = \frac{V^2 - \frac{g^2 (H-h)^2}{V_w^2}}{V^2} = 1 - \frac{g^2 \frac{(H-h)^2}{V_w^2}}{V^2}$$

$$e_t = 1 - \frac{(H-h)^2}{\frac{(V_w V)^2}{g^2}}$$

El denominador del quebrado representa el golpe de ariete máximo pudiendo representarse como " \widehat{H} "

$$e = 1 - \frac{(H-h)^2}{\widehat{H}^2}$$

La expresión nos indica que la eficiencia mejora al aumentar "h" y disminuir "H" y asimismo al aumentar \widehat{H} o sea la velocidad máxima que alcanza el agua en el tubo de impulsión ya que

$$\widehat{H} = \frac{V_w V}{g}$$

Sin embargo, "V" no puede aumentar hasta mas alla de

ciertos valores pues produciría en el tubo de impulsión pérdidas de carga muy altas.

Por lo general se adoptan velocidades máximas entre 1 m/seg. y 2 m/seg, lo que viene determinado en cada ariete por su caudal máximo de trabajo y el diámetro de su respectivo tubo de impulsión.

Como ejemplo se calculará la eficiencia de un ariete cuyo tubo de impulsión tiene un diámetro nominal de 5" y un caudal de operación máximo de 410 litros/minuto operando a su máxima capacidad.

Las condiciones de la instalación son: una caída de 5 metros, una elevación de 70 metros medida a partir del nivel de la válvula de desperdicio. Y la longitud del tubo de impulsión 30 metros.

El área en cm^2 de la sección del tubo de 5" es de 127 cm^2 y el caudal expresado en $\frac{\text{cm}^3}{\text{seg}}$ es de 6800 $\frac{\text{cm}^3}{\text{seg}}$.

Para hallar la velocidad de cierre se aplica la fórmula

$$Q = \frac{V \times A}{2} \times \frac{t_1}{t_1 + t_2}$$

$$Q = \frac{V \times A}{2} \times \frac{\frac{VL}{gh}}{\frac{VL}{gh} + \frac{4L}{V_w}}$$

$$Q = \frac{V \times A}{2} \times \frac{V}{V + \frac{4gh}{V_w}}$$

De donde:

$$\left(V + \frac{4gh}{V_w}\right) \frac{2Q}{A} = V^2$$

$$\frac{2Q}{A} V + \frac{8Qgh}{V_w A} = V^2$$

$$V^2 - 2V \frac{Q}{A} = \frac{8Qgh}{V_w A}$$

Sumando a ambos lados de la ecuación el término $\frac{Q^2}{A^2}$ para completar el cuadrado del primero:

$$V^2 - 2V \frac{Q}{A} + \frac{Q^2}{A^2} = \frac{8Qgh}{V_w A} + \frac{Q^2}{A^2}$$

$$\left(V - \frac{Q}{A}\right)^2 = \frac{8gh}{V_w Q} Q^2 \times \frac{A}{A^2} + \frac{Q^2}{A^2}$$

$$V - \frac{Q}{A} = \frac{Q}{A} \left(\frac{8ghA}{V_w Q} + 1\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$V = \frac{Q}{A} + \frac{Q}{A} \frac{(8ghA + 1)^{\frac{1}{2}}}{V_w Q}$$

$$V = \frac{Q}{A} \left[1 + \frac{(8ghA + 1)^{\frac{1}{2}}}{V_w Q} \right]$$

Se tomará para la velocidad de propagación de la onda " V_w " el valor 1380 m/seg., que corresponde al caso de tubería de acero galvanizado, para un diámetro nominal de 5" y considerando un módulo de elasticidad del agua para 20° centígrados.

Operando en la expresión anterior se halla

$$V = 120 \text{ cms/seg.}$$

La eficiencia teórica de esta instalación será:

$$e_x = 1 - \frac{(H-h)^2}{H^2}$$

$$e_x = 1 - \frac{(70 - 5)^2}{\frac{(1.20 \times 1380)^2}{9.8^2}}$$

$$e_x = 1 - \frac{(70-5)^2}{(168)^2}$$

$$e_x = 1 - (0.386)^2$$

$$e_x = 1 - 0.149$$

$$e_x = 0.85$$

Tomando en cuenta la pérdida de carga por fricción en el tubo de impulsión la eficiencia teórica se verá afectada por la relación $\frac{h - hf}{h}$

El valor de "f" correspondiente a $V = 1.20$ m/seg. y $D = 5$ " (0.127 mts) es 0.025, por lo que según la fórmula de Darcy - Weisbach:

$$hf = \frac{1.20}{2 \times 9.8} \times 0.025 \times \frac{30}{0.127} = 0.435\text{m}$$

La eficiencia de la instalación será:

$$= \frac{5 - 0.435}{5} \times 0.85$$

$$= 0.775$$

La cantidad de agua en volumen elevada por pulsación será:

$$\text{Vol} = \text{AL} \times \left[\frac{V^2 - \frac{g^2 (H-h)^2}{V_w^2}}{2 H g} \right]$$

Expresando el volumen del tubo "AL" en decímetros cúbicos y los demás valores en las mismas unidades se tiene:

$$\text{Vol} = 300 \times 1.27 \times \left[\frac{(1.2)^2 - \frac{9.8^2 (70 - 5)^2}{1380^2}}{2 \times 9.8 \times 70} \right]$$

$$\text{Vol} = 381 \times \frac{(1.44 - 0.213)}{1372}$$

$$\text{Vol} = \frac{381 \times 1.227}{1372}$$

$$\text{Vol} = 0.341 \text{ litros/pulsación}$$

Tomando en cuenta la fricción en el tubo:

$$\text{Vol} = 0.341 \times \frac{(5 - 0.435)}{5} = 0.311$$

El número de pulsaciones por minuto será:

$$N = \frac{60 \times 1}{\frac{30 \times 1.2}{9.8 \times 5} + \frac{4 \times 30}{1380}}$$

$$N = \frac{60}{0.822} = 73$$

La descarga será éntonces:

$$73 \times 0.311 = 22.70 \text{ litros/minuto}$$

El valor podía hallarse también a partir del valor de la eficiencia así:

$$410 \times 5 \times .775 = Q \times 70$$

$$Q = \frac{410 \times 5 \times .775}{70} = 22.70 \text{ litros/min.}$$

En general los valores de eficiencia teóricos difieren de los encontrados en la práctica debido a pérdidas por fricción en la tubería de impulsión, por choques, válvulas, falta de homogeneidad del material del conducto y al carácter altamente perturbado del movimiento del agua.

La eficiencia práctica de estas instalaciones oscila entre 55% y 70%

EFICIENCIA MAXIMA

De acuerdo a las variaciones de eficiencia según las diferentes condiciones de gasto, que influye en la velocidad máxima en el tubo de impulsión, caída altura de descarga y longitud del tubo de impulsión se buscará alguna relación de estas variables que den la mejor combinación.

El valor de eficiencia puede expresarse:

$$e = \frac{h - h_f}{h} \times e_t$$

$$e = \frac{h - \frac{fLV^2}{D \times 2g}}{h} \times \left[1 - \frac{g^2 (H-h)^2}{V_w^2 V^2} \right]$$

$$e = \left(1 - \frac{fLV^2}{D2gh} \right) \times \left(1 - \frac{g^2 (H-h)^2}{V_w^2 V^2} \right)$$

$$e = 1 - \frac{fLV^2}{D \ 2gh} - \frac{g^2 (H-h)^2}{V_w^2 V^2} + \frac{fL \ g^2 (H-h)^2}{D \times 2ghV_w^2}$$

Derivando la función eficiencia respecto a la velocidad e igualando a cero la derivada hallada se tiene la relación para eficiencia máxima

$$\frac{d e}{d V} = 0 = - \frac{fL}{ghD} \frac{V}{V^3} + \frac{g^2 (H-h)^2}{V_w^2} \frac{x 2}{V^3}$$

Dividiendo ambos miembros de la ecuación por V se tiene:

$$\frac{d e}{d V} = 0 = - \frac{fL}{ghD} + \frac{g^2 (H-h)^2}{V_w^2} \frac{x 2}{V^4}$$

De donde:

$$\frac{fL}{ghD} = \frac{g^2 (H-h)^2}{V_w^2} \frac{x 2}{V^4}$$

$$\frac{ghD}{fL} = \frac{V^4}{2 g^2 (H-h)^2}$$

$$g \frac{(H-h)}{V_w} \times \left[\frac{(2ghD)}{fL} \right]^{\frac{1}{2}} = V^2$$

$$H - h = \frac{V_w V^2}{g} \times \frac{1}{\left[\frac{(2ghD)}{fL} \right]^{\frac{1}{2}}}$$

Asumiendo los datos siguientes hallaremos la relación $\frac{H}{h}$ que de mejor eficiencia.

$$h = 5 \text{ metros}$$

$$V = 1.00 \text{ m/seg.}$$

$$D = 5''$$

$$f = 0.025$$

$$L = 30 \text{ metros}$$

$$H - 5 = \frac{1380 \times 1.00^2}{9.8} \times \left(\frac{0.025 \times 30}{2 \times 9.8 \times 5 \times 0.125} \right)$$

$$H = 5 + \frac{141}{4.1}$$

$$H = 5 + 34.5$$

$$H = 39.5$$

$$h = 5$$

Entonces la mejor relación de altura de descarga H a caída h de acuerdo a los datos suministrados es:

$$\frac{H}{h} = \frac{39.5}{5} = 7.9$$

CAPITULO V

TIPOS DE ARIETES:

A lo largo del desarrollo del tema se ha hecho referencia al ariete convencional que eleva parte del agua que lo opera.

Las casas fabricantes construyen además un tipo especial de ariete en el cual la caída de funcionamiento puede obtenerse de agua que no llegará al consumidor pudiendo emplearse al efecto corrientes que no llenen los requisitos sanitarios para el consumo.

El agua potable se lleva de otra fuente al interior de la máquina en la etapa de depresión en el ariete y es expulsada por la sobrepresión del golpe de ariete.

En algunos casos, una membrana elástica impermeable separa las dos clases de agua y en otros llegan a ponerse en contacto aunque se previene toda posibilidad de que pueda ser bombeada agua insalubre.

Ya que en la etapa de descarga a la atmósfera a través de la válvula de desperdicio, se pierde alrededor de una tercera parte de agua limpia, incluyendo la pequeña porción que había estado en contacto con el agua insalubre.

Este ariete puede usarse para extraer agua de pozos, pero de poca profundidad debido a las limitaciones del vacío parcial logrado.

En el caso de abastecimientos de agua potable, su uso no es recomendable por el riesgo de bombear agua contaminada.

TAMAÑO:

Los arietes se construyen de diferentes tamaños, numerados en cierto orden, desafortunadamente los números solo corresponden con las dimensiones de las máquinas y la cantidad de agua que utilizan dentro de cada marca; por lo que no sirven como punto de comparación.

Existen varios modelos según las relaciones entre la caída de funcionamiento y la altura de descarga y según si su funcionamiento será continuo o no.

SELECCION:

El ariete es seleccionado de acuerdo a la demanda diaria del agua, a las condiciones topográficas del lugar y a la eficiencia de la instalación que espera lograrse. Estas condiciones fijan la potencia motora necesaria así:

$$P = \frac{Q_d \times H \times w}{e}$$

Siendo Q_d , el caudal de descarga necesario calculado en base a un funcionamiento continuo de la máquina, es decir la demanda diaria expresada en unidades de volumen por unidad de tiempo.

Al adoptar una caída "h" la máxima que pueda lograrse y pueda usar el ariete, el caudal de impulsión quedará fijado por la relación:

$$P_M = WQ_I h$$

Por lo cual igualando las dos expresiones de potencia motora se obtendrá el caudal de impulsión:

$$Q_I = \frac{Q_D \times H}{h \times e}$$

El problema se reduce a buscar entre los diferentes tamaños del ariete, aquel que pueda trabajar con el caudal de impulsión disponible.

BATERIAS DE ARIETES:

Para obtener caudales mayores en la descarga se pueden instalar varios arietes trabajando en paralelo, es decir alimentando una misma tubería de descarga.

Cada una de las máquinas estará provista de sus respectivas válvulas y tubo de impulsión que permitan aislarla del sistema cuando la demanda varíe o sea necesario hacer reparaciones.

CAPACIDAD DE BOMBEO DE LOS ARIETES.

La altura de descarga de los arietes está limitada por la máxima velocidad que alcanza el agua en el tubo de impulsión, la cual no debe pasar de ciertos valores debido a la pérdida de carga que ocasionaría. Limitando por consiguiente la velocidad del agua a 1.50 m/seg., la presión máxima que alcanza será:

$$\frac{V \times V_w}{g} = H \text{ o sea: } \frac{1.50 \times 1380}{9.8} = 210 \text{ metros}$$

Donde V_w es la velocidad de propagación de la onda del golpe de ariete.

Lo que fija en aproximadamente en 150 metros de altura máxima de descarga para tener rendimientos aceptables en estas instalaciones.

En cuanto al caudal de entrega de estas máquinas, las de mas capacidad operan un caudal de 2 800 litros por minuto, lo que suponiendo un aprovechamiento del 15% del agua utilizada dará un gasto de entrega de 420 litros, por minuto, o sean 604 800 litros por día, caudal que puede utilizarse para abastecimiento de agua potable a poblaciones de regular tamaño, o para irrigación en pequeña escala.

Además utilizando baterías de arietes puede obtenerse estos gastos con máquinas de menor tamaño a aumentar estos mismos.

Las máquinas de menor capacidad son convenientes para abastecimiento de agua en aldeas, fincas y fábricas.

CAPITULO VI

COSTO DE ARIETES

Vida útil:

Los arietes hidráulicos son máquinas que por su necesaria construcción sólida y características de funcionamiento, para el que pocos elementos mecánicos se ponen en movimiento, están destinados a durar mucho tiempo.

Para los efectos de este trabajo se supondrá una vida útil de 25 años asumiendo que durante este período no se necesitará de mantenimiento ni reparaciones que incidan apreciablemente en el costo.

Costo:

Este se expresará como costo por unidad de producción; -entendiéndose por producción, el número de unidades de volumen de agua elevado que satisfagan completamente la demanda en las condiciones de la localidad.

Para determinar este costo habrá que considerar primeramente, todas las erogaciones que fueron necesarias para la adquisición e instalación de materiales y equipo; seguidamente lo que cuesta mantener el servicio durante la vida útil de la instalación y además deberá cargarse al costo, la utilidad que el dinero destinado a la compra y puesta en marcha del equipo dejará de ganar y que transformado en maquinaria estará dejando de ganar a lo largo de su tiempo de vida.

Los arietes son máquinas que no se construyen en el país; el precio de fábrica estará incrementado por el transporte, los seguros y los impuestos. Todos estos factores variables según el peso y volumen de las máquinas, los riesgos que corren al transportarse, y la legislación tributaria existente.

En este trabajo se tomará el precio del equipo puesto en las salas de venta de las agencias, donde estos incrementos de precio estarán incorporados; pero en algunos casos, como cuando el estado es comprador habrá que hacerse las deducciones correspondientes por exención de impuestos.

A fin de ordenar los diversos factores que inciden en el costo clasificaré a éste en:

1. Costo de Adquisición e Instalación del equipo
2. Costo de Operación
3. Costo de Inversión

1. Costo de Adquisición e Instalación del equipo:

Lo constituirá la erogación total necesaria para la puesta en marcha del sistema; que pueda dividirse en: costo de equipo, costo de materiales, costo de transporte y costo de instalación.

a. Costo de equipo:

Será la cantidad pagada por el ariete, tubería, válvulas y accesorios.

b. Costo de materiales:

Lo formarán la cantidad de dinero pagada para obtener los materiales necesarios para la construcción de obras auxiliares y para la instalación del equipo.

c. Costo de transporte:

Es aquel que ocasiona el tener que transportar el equipo y los materiales que sean necesarios al lugar de instalación.

d. Costo de instalación:

Lo constituirá la remuneración a los trabajadores que hagan la

instalación, estará fijado por las horas de trabajo empleadas y los salarios por hora que prevalezcan en el lugar.

2. Costo de Operación:

Este costo es inherente al funcionamiento del equipo. Estará constituido por el costo de insumos, de materiales de reparación y salarios para operación y reparación y el costo de depreciación.

a. Costo de energía motora y materiales de reparación:

El ariete usa para operar el agua, por lo que no se paga sino se adquiere un derecho para utilizarla. Como se ha supuesto que las reparaciones en un ariete no serán dispendiosas es te costo será nulo.

b. Costo de salarios para operación y reparación:

El ariete es una máquina automática que no necesita de espe cial supervisión y mantenimiento por lo que tampoco se toma rá en cuenta.

c. Costo de depreciación:

La depreciación es la pérdida de valor ocasionado por el uso y la edad. El cargo de depreciación a la operación del equi po se hace con el objetivo de formar un capital que permita substituirlo al final de su vida útil. El costo anual de depre ciación dependerá del período de vida que se le asigne. Exis ten varios métodos para calcular la depreciación, los que se adaptan más o menos estrechamente a las variaciones de pro ducción que una máquina sufre a través del tiempo. La pro ducción que originará el ariete será aproximadamente la misma a través de su vida útil, por lo que me parece adecuado a adoptar el criterio de una devaluación anual constante, por ello, para calcular el costo de depreciación, se usará el mê todo de fondo de amortización, que permite obtener utilida des con el dinero que se provee anualmente.

Método de Fondo de Amortización:

En este método una cantidad fija se deposita anualmente a interés compuesto en una institución bancaria para constituir al final del período de funcionamiento del equipo, el capital que ha de permitir la adquisición de uno nuevo.

El valor de este depósito fijo "R" colocado al final del primer año importará el valor " C_1 " que corresponde a la cantidad depositada pues aun no se ha ganado interés.

Al finalizar el segundo se hará un segundo depósito que sumado al anterior y a su interés ganado "i" importarán la suma - " C_2 "

$$C_2 = R + R + iR$$

$$C_2 = R + R (1 + i)$$

Al final del tercer año el capital formado será:

$$C_3 = R + R (1 + i) + R (1 + i)^2$$

Y al término del año enésimo el capital reunido será:

$$C_n = R + R (1 + i) + R (1 + i)^2 + \dots + R (1 + i)^{n-1}$$

Expresión de una progresión geométrica cuya razón es $(1 + i)$ siendo su suma:

$$C_n = \frac{R (1 + i)^n \times (1 + i) - R}{(1 + i) - 1}$$

De donde despejando "R" queda

$$R = \left[\frac{i}{(1 + i)^n - 1} \right] \times C_n$$

El valor entre paréntesis puede encontrarse con suficientes cifras decimales para diversas tasas de interés y años de

capitalización consultando tablas de matemáticas de finanzas.

3. Costo de inversión:

Al emplear una cantidad de dinero para adquirir un equipo no se posee menos riqueza que antes porque solamente se ha trans formado el valor del dinero en el equipo. Ahora bién, todo aquel interés que la inversión ya no ganará si deberá calcularse como un costo imputable al equipo.

Se deberá calcular el valor promedio de la instalación a lo largo de su vida útil y aplicar a ese valor el interés correspondiente como costo anual de inversión.

Al principio del primer año el equipo valdrá "C"

Al final del primer año el equipo valdrá " C_1 ", que corresponderá al valor original menos la depreciación o sea:

$$C_1 = C - C/N$$

Al final del año "N" el equipo valdrá

$$C_N = C - (C/N) \times N$$

El promedio de valor en el período N será

$$\bar{C} = \frac{C + C_1 + C_2 + \dots + C_N}{N}$$

o sea:

$$\bar{C} = \frac{(N + 1) C - C/N - 2C/N - 3C/N - \dots - NC/N}{N}$$

Los términos negativos constituyen una progresión aritmética cu ya suma es:

$$S = \frac{(C/N + C) N}{2}$$

Por lo que

$$\bar{C} = \frac{(N+1)C}{N} - \frac{(C/N + C)}{2} N$$

$$\bar{C} = \frac{2C(N+1) - C - CN}{2N}$$

$$\bar{C} = \frac{C(N+1)}{2N}$$

Al valor promedio \bar{C} del capital se le aplicará un interés anual - que será el costo anual de inversión.

COSTO DE PRODUCCION

Se calculará este costo en quetzales por metro cúbico de agua elevada para las condiciones del lugar.

Para ello se calculará el número de metros cúbicos elevados al año y el costo de ese trabajo.

El costo anual de ese trabajo estará compuesto por:

1. Costo de inversión
2. Costo de operación. Siendo necesaria para su determinación conocer el costo de adquisición e instalación.

Para ilustrar lo que se ha expuesto, se dará el siguiente ejemplo:

Consumo:	35, 000	litros por día
	24.4	litros por minuto

Altura de descarga	50 metros
Longitud de la tubería de descarga	210 metros

Cafda disponible 5 metros
Eficiencia 60%

Caudal necesario:

$$Q = \frac{Q_0 \times H}{h \times e} = \frac{24 \cdot 4 \times 50}{5 \times 0.60} = 406.6 \frac{\text{litros}}{\text{MIN}}$$

Con el caudal de funcionamiento, se busca en los catálogos de las casas fabricantes aquel tamaño de ariete que pueda funcionar con ese caudal.

Según el tamaño seleccionado, quedará fijada la tubería de impulsión y sus accesorios.

La tubería de descarga quedará determinada de modo que no ocasione una pérdida por fricción alta en la conducción.

El costo de adquisición e instalación estará compuesto así:

Ariete Blake MODX No. 6	900.00
Tubo de impulsión de 5" x 24 metros	180.00
Válvula de compuerta de 5"	45.00
Tubería de descarga de 210 metros y válvula de compuerta de 1½"	270.00
Accesorios de tubería	10.00
Instalación	<u>200.00</u>
Total	1,605.00

Costo de inversión:

Valor promedio durante 25 años

$$\bar{C} = 1\,605 \frac{(25 + 1)}{50} = 834.64$$

Se usará un interés de 10% anual

Costo anual de inversión: Q. 83.46

Costo de depreciación

Asumiendo el interés anual "i" de 6% y consultando tablas para

$$T = 25$$

$$i = 6\%$$

$$R = 0.01822671 \times 1,605.00 = Q. 29.25$$

$$\text{Costo anual de operación e inversión} = 29.25 + 83.46 = 112.71$$

La producción anual habrá sido:

$$35 \times 365 = 12,775 \text{ m}^3$$

El costo por m^3 será: $\frac{Q0.0088}{\text{M}^3}$, es decir menos que 1 centavo por m^3 .

En la resolución del problema no se han tomado en cuenta el costo debido a la construcción de obras auxiliares y el costo de transporte de materiales y equipo al lugar. Se ha procedido así con el objeto de simplificar del problema, y hacer resaltar solamente el aspecto de la elevación del agua en sí, que es lo que principalmente se ha tratado en este trabajo.

Puede tomarse en cuenta estos costos determinando su incidencia en el costo de adquisición e instalación que como

puede verse, ha servido de base para llegar al costo de operación

ESTIMACION GENERAL DEL COSTO DE PRODUCCION

El costo del bombeo del problema anterior, es un buen ejemplo de las ventajas que ofrece el ariete en ciertas circunstancias, pero no puede tomarse como el costo normal o típico de una instalación de esta clase; ya que el funcionamiento del ariete depende de muchos factores, que repercuten en su eficiencia y que además influyen al hacer necesarios más materiales, tuberías y accesorios.

Entre los principales tenemos la altura de descarga H , la caída de funcionamiento " h " y la longitud del tubo de impulsión. Estos factores dependen de la topografía del lugar e inciden en el costo de varias maneras, así:

En primer lugar tienen efecto en la eficiencia de la máquina, lo que hace que ésta eleve más o menos agua; según lo que hemos visto, determinan el caudal de funcionamiento que fijará el tamaño del ariete, o sea, el costo de éste. También influyen en la cantidad de accesorios y tubería que haya que comprar y en el diámetro de ésta en la descarga con el objeto de limitar la pérdida de carga de la conducción y finalmente fijan la necesaria resistencia de la máquina a las cargas que estará sometida, lo que dependerá de la caída con que trabaje, haciendo necesaria la adquisición de un determinado modelo de ariete, lo que también se refleja en el costo.

Para tener un conocimiento completo de la variación del costo de agua elevada, habría que hacer combinaciones de diferentes valores de caída, longitudes de caídas, alturas de descargas, distancias de descarga y consumos requeridos, y calcular el agua elevada y costo de c/u de las instalaciones resultantes.

El ingeniero no tiene obligadamente que resolver de una vez todos los problemas que puedan combinarse, estos se presentan de uno en uno y generalmente se resuelven por tanteos según las condiciones existentes.

Sin embargo, si es útil conocer la dirección en que se mueven estos costos según las características del caso y de las disponibilidades de máquinas con que se cuente, sobre todo - cuando hay varias alternativas en la solución del problema.

Para ello, trataré de llegar a una estimación general del costo según diversas circunstancias haciendo algunas simplificaciones.

Como se ha visto, el ariete y tubo de impulsión dependen de la cantidad de agua que usa. Es decir su costo es función de Q .

$$C = f(Q)$$

El costo de los accesorios depende del ariete y puede integrarse en el de éste.

La instalación se puede expresar como un porcentaje del costo anterior.

El costo de la tubería de conducción será una función del diámetro y éste de " Q ", ya que es función del gasto de descarga Q_d , siempre que se limite la pérdida de carga a un valor por unidad de longitud.

La resistencia del ariete influirá también en el costo y éste depende de la caída máxima permitida.

Solamente éste último factor no depende de " Q "; por lo que se buscará hallar una expresión que dé el costo en función del gasto que usa el ariete para diversos modelos de ariete según la resistencia que ofrezcan.

El costo de una máquina no depende solamente de su capacidad, está influida en menor grado por los métodos de fabricación, las condiciones del mercado, el transporte y muchos otros factores complejos; es por ello que la única manera de relacionar estas variables es utilizando la Estadística.

El procedimiento a seguir será el siguiente:

Se formará un gráfico que muestre una curva que relacione los precios con el máximo gasto utilizado por cada ariete, se interpolará una curva de acuerdo con la tendencia de los puntos dibujados, que dé los valores de costo contra máxima agua utilizada para cada modelo de ariete que exista en el mercado.

Esta interpolación se hará por el método de mínimos cuadrados y se adoptará una curva de variación no lineal entre el caudal de operación y el costo.

En nuestro caso esto se reducirá a dos curvas. La curva de los arietes marca "A" x marca "B"

ADOPCION DE LA CURVA

Se adoptará la función: $C = mQ^b$

por tender a una recta los puntos determinados por los logaritmos de los valores de costo y caudal. (Véase figura 6)

Donde

- C = costo en quetzales
- Q = caudal utilizado en litros por minuto
- m y b = constantes a determinar

Aplicando logaritmos:

$$\log C = \log m + b \log Q$$

llamando a la variable: $\log C = Y$

a la variable: $\log Q = X$

y a $\log m = a$

La función nueva será:

$$Y = bX + a, \text{ la ecuación de la recta.}$$

Así se forma la tabla 1, que servirá para aplicar el método de mínimos cuadrados para encontrar la curva correspondiente al ariete "A".

T A B L A I

C	Q	Log. C Y	Log. Q. X	X ²	XY
240	16	2.380211	1.204120	1.449905	2.866060
292	25	2.465386	1.387940	1.926377	3.421808
350	55	2.544068	1.740363	3.028660	4.427602
525	96	2.720159	1.982271	3.929410	5.392100
601	137	2.778874	2.136721	4.565577	5.937678
786	270	2.895423	2.431364	5.911531	7.039827
1095	410	3.039414	2.612784	6.826640	7.941332
Σ		18.823535	13.495563	27.638300	37.026407

Para determinar las constantes de la ecuación de la línea que más se ajusta a los puntos,

$$Y = a + bX$$

se resuelve el sistema de ecuaciones normales de los mínimos cuadrados.

$$\begin{aligned}\sum Y &= a \times N + b \sum X \\ \sum XY &= a \sum X + b \sum X^2\end{aligned}$$

De donde:

$$a = \frac{(\sum Y) (\sum X^2) - (\sum X) (\sum XY)}{N (\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

$$b = \frac{N (\sum XY) - (\sum X) (\sum Y)}{N (\sum X^2) - (\sum X)^2}$$

En nuestro caso:

$$a = \frac{(18.8235) (27.6383) - (13.4955) (37.0264)}{7 (27.6383) - (13.4956)^2} = 1.813239$$

$$b = \frac{7 (37.0264) - (13.4956) (18.8235)}{7 (27.6383) - 13.4956^2} = 0.454286$$

Las constantes de la ecuación de la curva original serán:

$$m = \text{antilog de } 1.813239 = 65.04$$

$$b = 0.454286$$

Por lo que esta será:

$$C = 65.04 \quad Q^{0.45} \quad \text{Para arietes "A" con caída hasta de } -12 \text{ mts. (Fig. 7)}$$

Procediendo de igual manera con los datos de los arietes "B" (Fig 8) Es decir, integrando el costo de equipo para cada unidad de ariete deprecio conocido y caudal de operación se forma la tabla 2.

T A B L A 2

C	Q	Log C Y	Log Q X	X ²	XY
397.00	37.85	2.598791	1,577992	2.488481	4.094572
431.00	57.00	2.634477	1.755875	3.083097	4.625812
516.50	94.00	2.713070	1.975432	3.902331	5.359485
627.00	170.00	2.797268	2.230449	4.974902	6.239163
703.50	265.00	2.847264	2.433246	5.872121	6.899621
1012.00	475.00	3.005181	2.676694	7.164691	8.043950
1715.00	1320.00	3.234264	3.120574	9.737982	10.092760
	Σ	19.830315	15.759762	37.223605	45.360336

Resolviendo las ecuaciones normales de los mínimos cuadrados.

$$a = \frac{(19.8303)(37.2236) - (15.7598)(45.3603)}{7(37.2236) - (15.7598)^2} = 1.90959$$

$$b = \frac{7(45.3603) - (19.8303)(15.7598)}{7(37.2236) - (15.7598)^2} = 0.410168$$

Las constantes de la ecuación de la curva original serán:

$$m = \text{antilog de } 1.909590 = 81.2063$$

$$b = 0.410168$$

Siendo ésta:

$$C = 81.20 \times Q^{0.41} \quad (\text{Fig. 9})$$

El costo de la tubería de descarga dependerá del diámetro y longitud de la tubería

Si se asume una pérdida de carga por unidad de longitud es posible determinar el caudal "Q" en función del diámetro, como lo demuestra la fórmula

$$h_f = f \frac{V^2}{2g} \times \frac{L}{D}$$

$$\frac{2gh_f}{f L} = \frac{V^2}{D} \quad \text{Expresado V como } Q/A,$$

$$\frac{2g}{f} \times \frac{h_f}{L} \times \frac{\pi^2}{16} = \frac{Q^2}{D^5}$$

El primer miembro de la ecuación puede considerarse constante si se adopta un valor para h_f/L . Por lo que

$$K \frac{D^5}{16} = Q^2$$

$$K' \frac{D^{5/2}}{16} = Q$$

Habiendo determinado ya la relación entre Q y D se hará uso de la Estadística para hallar una función entre el costo de adquisición y cierta potencia del diámetro de tubería que existe en el mercado para el largo de 6 metros.

Como anteriormente, el procedimiento será seleccionar la forma de la curva a interpolar.

Se adoptará la curva geométrica $C = mQ^b$. Por las mismas razones de los anteriores casos. (Véase figura 10)

No se usarán valores mayores que 4", ya que es poco corriente en este tipo de instalaciones, que existan, y además distorsionan la tendencia a recta de los puntos dibujados.

El exponente a usarse en el diámetro será: $\frac{5}{2}$, con el objeto de que en la función resultante sea fácil sustituir el valor de $D^{\frac{5}{2}}$ por el gasto "Q" dividido por la constante K' (Q/K')

Así se forma la tabla 3 y se operan los datos. Para evitar trabajar con valores negativos que ocasionan los logaritmos de números pequeños, se multiplicará la variable $D^{\frac{5}{2}}$ por 100.

T A B L A 3

C	D	D	Log D	Log D ^{5/2}	Log 10 ² D ^{5/2} X	Log C Y	X ²	XY
2.00	3/8"	0.3750	-1.5740	-2.9351	0.9351	0.3010	0.8744	0.2815
2.50	1/2"	0.5000	-1.6990	-1.2474	1.2474	0.3979	1.5560	0.4963
3.50	3/4"	0.7500	-1.8751	-1.6877	1.6877	0.5441	2.8483	0.9183
5.00	1"	1.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.6990	4.0000	1.3980
6.00	1 1/4"	1.2500	0.0969	0.2423	2.2423	0.7781	5.0279	1.7447
7.50	1 1/2"	1.5000	0.1761	0.4402	2.4402	0.8751	5.9546	2.1354
8.50	2"	2.0000	0.3010	0.7526	2.7526	0.9294	7.5768	2.5583
14.00	2 1/2"	2.5000	0.3979	0.9948	2.9948	1.1461	8.9688	3.4323
16.50	3"	3.0000	0.4771	1.1928	3.1928	1.2175	10.1940	3.8872
22.00	4"	4.0000	0.6021	1.5051	3.5051	1.3424	12.2857	4.7052
				Σ	22.9980	8.2306	59.2865	21.5572

Resolviendo las ecuaciones de los mínimos cuadrados se llega a

$$a = \frac{(8.2306)(59.2865) - (22.9980)(21.5572)}{10 \times 59.2865 - (22.9980)^2} = -0.126770$$

$$b = \frac{10(21.5572) - (22.9980)(8.2306)}{10(59.2865) - (22.9980)^2} = 0.413236$$

El valor de m será

$$m = \text{antilog de } -0.122770$$

La mantisa del logaritmo debe ser positiva por lo que se sumará - 1.00000 y restará 1.00000

$$m = \text{antilog } -0.122770 + 1.00000 - 1.00000$$

$$m = \text{antilog de } -1.87723$$

$$m = 0.7721$$

$$b = 0.410328$$

La función buscada entonces:

$$C = 0.7721 \left[100 D^{5/2} \right]^{0.41} \quad (\text{Ver Fig. 11})$$

$$C = 0.7721 \times 100^{0.41} (D^{5/2})^{0.41}$$

$$C = 0.7221 \times 6.6 (D^{5/2})^{0.41}$$

$$C = 5.096 (D^{5/2})^{0.41}$$

Sustituyendo el valor de $D^{5/2}$ encontrado antes:

$$C = 5.096 \times (Q/K')^{0.41}$$

Pero:

$$K' = \left[\frac{2g \times h_f \times \pi^2}{f \times 16 L} \right]^{1/2} = \left[\frac{2g h_f}{f L} \right]^{1/2} \times \frac{\pi}{4}$$

Expresando el valor de la aceleración en pulgadas sobre segundo al cuadrado, la fórmula del gasto encontrada anteriormente

$$Q = K'D^{5/2}$$

dará valores de "Q" en pulgadas cúbicas por segundo si el diámetro se expresa en pulgadas.

Entonces:

$$K' = \left[772.8 \times \frac{h_f}{L} \times \frac{1}{f} \right]^{1/2} \times \frac{\pi}{4}$$

Limitando el valor $\frac{h_f}{L}$ a 0.005 y tomando para f un valor de 0.03,

$$K' = (128.80)^{1/2} \times 0.7854$$

$$K' = 11.34 \times 0.7854$$

$$K' = 8.9064$$

Ahora bien:

$$\frac{1 \text{ Pulg}^3}{\text{Seg}} \times \frac{60 \text{ Seg}}{1 \text{ MIN}} \times \frac{16.387 \text{ CM}^3}{1 \text{ Pulg}^3} = \frac{983.22 \text{ CM}^3}{\text{MIN}} = 0.98322 \frac{\text{Litros}}{\text{MIN}}$$

Por lo que, si se expresa el gasto en litros/minuto

$$Q = 8.9064 \times 0.98322 D^{5/2}$$

$$Q = 8.7570 D^{5/2}$$

$$\frac{Q}{8.7570} = D^{5/2}$$

Sustituyendo el valor de $D^{5/2}$ en la fórmula:

$$C = 5.096 (Q/8.7570)^{0.41}$$

$$C = \frac{5.096}{2.434} Q^{0.41}$$

$$C = 2.093 Q^{0.41}$$

El costo del total de tubería de descarga cargando un 10% por la instalación será:

$$C = 2.093 \times \frac{L}{6} Q_3^{0.41} \times 1.1$$

$$C = 0.3488 Q_3^{0.41} \times L \times 1.1$$

$$C = 0.3837 Q_3^{0.41} L$$

Para la composición del costo de adquisición e instalación del ariete tubería de impulsión y accesorios se expresará el valor de la instalación como el 10% del costo de adquisición por lo que cada una de las fórmulas establecidas anteriormente quedarán:

$$C = 1.1 \times 65.04 \times Q^{0.45} = 71.54 Q^{0.45} \text{ -- para arietes tipo "A"}$$

$$C = 1.1 \times 81.20 Q^{0.41}$$

$$C = 89.32 Q^{0.41} \text{ -- para ariete tipo "B"}$$

El costo de adquisición e instalación del ariete para diversos valores de caudal de operación altura de descarga, caída, longitud de descarga y consumo requerido estará expresado por la suma de las fórmulas ya calculadas.

El caudal de operación se puede expresar en función del caudal de descarga, así:

$$Q_h = \frac{Q_D H}{e}$$

$$Q = \frac{Q_D (H/h)}{e}$$

Llamando "r" a H/h

$$Q = \frac{Q_D r}{e}$$

Entonces el costo total de adquisición e instalación será

$$C.T = 71.54 \frac{Q_D^{0.45} r^{0.45}}{e^{0.45}} + 0.3837 Q_D^{0.41} \times L$$

Para arietes tipo "A"

$$C.T = 89.32 \frac{Q_D^{0.41} r^{0.41}}{e^{0.41}} + 0.3837 Q_D^{0.41} \times L$$

Para arietes tipo "B"

COSTO DE PRODUCCION

Para encontrar el costo por unidad de volumen producido se divide el costo anual total de operación e inversión entre las unidades de volumen que han sido elevadas. El costo anual total de operación estará constituido en el caso de los arietes, por los cargos de depreciación y de inversión, los cuales se determinan como se ha visto, multiplicando el costo total de adquisición e instalación por los valores $\left[\frac{i}{(1+i)^N - 1} \right]$ y $\left(\frac{N+1}{2N} \right)$ a los que llamaré A y B.

El número de unidades producidas (U.P.) en un año se obtiene a partir del gasto de descarga el cual está dado en litros por minuto.

Como el costo de producción se dará en metros cúbicos hace falta hacer las conversiones correspondientes, así:

$$U.P. = \frac{Q}{1000} \times 1440 \times 365$$

$$U.P. = Q \times 525.60$$

El costo de producción (C.P.) puede expresarse éntonces para cada serie de condiciones en especial.

$$CP = \frac{71.5 + Q_D^{0.45} r^{0.45}}{e^{0.45} \times 525.60 Q_D} \times (A + B) + \frac{0.3837 Q_D^{0.41} \times L (A + B)}{525.60 Q_D}$$

$$CP = \frac{0.136 r^{0.45}}{e^{0.45} \times Q_D^{0.55}} \times (A + B) + \frac{0.00073 \times L (A + B)}{Q_D^{0.59}}$$

$$CP = \frac{0.136 (A + B) r^{0.45}}{e^{0.45} Q_D^{0.55}} + \frac{0.00073 (A + B) L}{Q_D^{0.59}}$$

Para arietes tipo "A" considerados en el trabajo

$$CP = \frac{89.32 Q_D^{0.41} r^{0.41}}{e^{0.41} \times 525.60 Q_D} \times (A + B) + \frac{0.3837 Q_D^{0.41} \times L (A+B)}{525.60 Q_D}$$

$$CP = \frac{0.17 \times (A + B)}{e^{0.41} Q_D^{0.59}} r^{0.41} + \frac{0.00073 (A + B) L}{Q_D^{0.59}}$$

Para arietes tipo "B"

Las fórmulas anteriores nos indican que el costo por unidad de volumen, disminuye según disminuya la relación "H/h", la longitud de descarga "L" y aumente la eficiencia "e", el consumo, "f(Q)" y la vida útil "N".

A continuación se comparará por medio de la fórmula de los arietes "A", el costo de producción ya hallado directamente en el ejemplo ilustrativo de la página 58 cuyo valor fué de Q.0.0088.

Consumo: 35 000 litros/dfa
24.4 litros/minuto

Altura de descarga 50

Longitud de tubería descarga: 210 metros

Caida 5 metros

Eficiencia 60%

$$CP = \frac{0.136 (0.018 + 0.052) 10^{0.45}}{.60^{0.45} \times 24.4^{0.55}} + \frac{0.00073 (0.018 + 0.052) \times 210}{24.4^{0.59}}$$

$$CP = \frac{0.07 \times 0.136 \times 3.55}{5.8} + \frac{0.154 \times 0.07}{6.5}$$

$$CP = Q.0.00615 + Q.0.00168 = Q.0.00778$$

El resultado muestra una discrepancia de un 14%; pero debe hacerse notar que para establecer la fórmula se ha supuesto el valor de la instalación como un 10% del valor de adquisición, y en el ejemplo resuelto directamente fue de:

$$\frac{200}{1405} = 14.20\%$$

Además para el establecimiento de la fórmula se consideró un descuento en el ariete del 10% por pago el contado.

Si tomamos en cuenta las anteriores circunstancias, el costo total de adquisición e instalación será de Q1452.00 en vez de Q1 605.00 con lo que el costo de producción disminuye según la relación $\frac{1452}{1605}$ es decir $0.088 \times \frac{1452.00}{1605} = 0.00795$

Disminuyendo la discrepancia a 2%.

Según esto puede considerarse que el costo de producción en condiciones favorables, de una instalación de arietes será menor de Q0.01/M³.

COMPARACION DE COSTOS DE ELEVACION DE AGUA POR MEDIO DE ARIETES Y BOMBAS;

El costo de adquisición e instalación de las bombas son menores que los de los arietes para un mismo trabajo a realizar, elevar una cantidad de agua determinada a una altura dada; pero debido a la menor vida útil que tienen las primeras y al hecho de necesitar para su funcionamiento de materiales de reparación y

energía eléctrica o combustibles su costo de operación es mayor.

Como ejemplo de lo que se ha dicho consideremos solamente el costo de la electricidad que habría de accionar una bomba, para elevar 35000 litros por día a una altura de 50 m cuyo costo por medio de ariete ya se ha determinado directamente y por medio de las fórmulas calculadas.

Costo por medio del ariete: $0.0080 \times 35 = 0.28$ al día

Costo de electricidad para accionar la bomba:

Trabajo realizado=

$$35\ 000 \times 50 \text{ KGF} - \text{metros} = 17\ 150,000 \text{ joules}$$

$$1 \text{ KWH} = 3600000 \text{ joules}$$

Entonces el trabajo útil realizado medido en kilovatios-hora habrá sido:

$$\frac{17150000}{3600000} = 4.75 \text{ KWH}$$

Suponiendo una eficiencia hidráulica, mecánica y eléctrica combinada de 0.60, la energía eléctrica suministrada valdrá 7.90 KWH.

Tomando a Q0.04 el kilovatio-hora el costo por energía eléctrica será de Q0.32.

Si se tratara de una bomba accionada por motor a gasolina puede estimarse que el gasto de combustible es de 0.06 gal-

nes por H.P. por hora, Y como el galón vale 0.45, el costo de combustible será Q0.027 por H.P. por hora.

Suponiendo 5 horas de operación de la bomba el gasto en lit/min.

$$Q = \frac{7000}{60} = 117 \text{ litros/min}$$

La potencia expresada en watts será:

$$P = \frac{117 \text{ KGF}}{60 \text{ seg}} \times 50 \text{ m} \times 9.81 = 960 \text{ watts}$$

Suponiendo también una eficiencia total de 0.60

$$P = \frac{1590}{746} = 2.13 \text{ HP}$$

El costo de combustible será

$$2.13 \times 5 \times 0.027 = Q0.28$$

A este costo debe agregarse el de los lubricantes que se estimará en Q0.003 por hora por HP lo que hace Q0.03. El costo por combustible y lubricantes será entonces de Q0.31 al día.

Lo que muestra que el costo diario del ariete en esta situación es mucho menor que el de bombas accionadas por motores

eléctricos o de gasolina pues aún faltaría cargarles a éstas los costos de depreciación, inversión y reparaciones que por su menor vida útil son proporcionalmente mayores.

Conforme el gasto aumenta, el costo del agua disminuye, entanto que el de consumo de energía aumenta directamente, lo que muestra que la ventaja del ariete aumenta con el gasto.

CONCLUSIONES

- 1) La eficiencia de un ariete varía directamente a la caída disponible, la velocidad que alcanza el agua en el tubo de impulsión y la velocidad de propagación del efecto del golpe de ariete en la tubería de impulsión e inversamente a la altura de descarga y pérdidas por fricción en las tuberías de impulsión y descarga.
- 2) La mejor eficiencia se logra regulando la velocidad de cierre de la válvula de desperdicio según las condiciones topográficas existentes, altura y longitud de caída y descarga, y de modo que no ocasione una pérdida por fricción muy alta en la tubería de impulsión.
- 3) Los arietes hidráulicos pueden utilizarse en instalaciones simples o en baterías para abastecimiento de agua potable de poblaciones de regular tamaño, aldeas y fincas, para consumo en fábricas y para viveros o riego en pequeña escala, siempre que la altura de descarga sea no mayor de 100 metros.
- 4) El costo de producción del agua elevada por medio de arietes disminuye al aumentar la eficiencia, la vida útil y la demanda diaria del sistema. Asimismo cuando la longitud de la tubería de descarga y la relación de altura de descarga a caída disponible, "r" tienen valores pequeños.

- 5) Comparativamente a las bombas centrífugas, los arietes tienen una menor capacidad de adaptación a los cambios de caudal de la fuente. Por desperdiciar la mayor cantidad del agua con que operan deben preferirse las primeras cuando se prevea la necesidad de utilizar todo el caudal de la fuente.
- 6) El costo de adquisición de un ariete es mayor que el de una bomba centrífuga que realice el mismo trabajo, aunque su instalación permite a menudo utilizar un diámetro en la descarga mas reducido, debido al trabajo contínuo de bombeo de un gasto menor.
- 7) El costo de producción del agua elevada por medio de arietes, dentro de su campo de aplicación, es menor que por medio de bombas, debido a su mayor vida útil, su trabajo automático, la poca frecuencia y sencillez de sus reparaciones y por contarse con la energía motora. Es por ello que es conveniente la instalación de arietes en el medio rural de nuestro país, donde se carece de energía eléctrica, de mano de obra hábil para operación y mantenimiento de motores de combustión interna, de abastecimiento inmediato de combustible, y

piezas de repuesto y donde debido a la configuración topográfica y a los recursos de agua de que se dispone es posible esperar buenos rendimientos de estas máquinas.

Héctor Eduardo Molina M.

Vo. Bo.

Ing. Carlos Solares Buonafina
ASESOR

Imprímase:

Ing. Amando Vides Tobar
DECANO

BIBLIOGRAFIA

Principios de Física

S. Ballard E. P. Slack E. Hausmann

Física Curso Elemental

Marcelo Alonso

Hydraulics

H. King Ch. Wisler J. Woodburn

Análisis y Control de Costos de Ingeniería

Amando Vides T.

Catálogos de John Blake

Manual de Información de Rife Hydraulic Eng. Co.

Máquinas Hidráulicas

J. L. Parrés

Historia de la Invenciones Mecánicas

Usher Abbot Payson

Traite Theorique et Pratique DHydraulique Appliquée

L. Vigreux

Manual de Ingeniería Mecánica

Baumeister Marks

Les Irrigations

A. Ronna

Matemáticas del Contador

S. M. Specthrie

Statistics

M. R. Spiegel

Schaum Publishing Co.

FIG. 6

GRAFICO DE LA CURVA $Y = a + bX$ INTERPOLADA POR EL
METODO DE MINIMOS CUADRADOS ENTRE PUNTOS DETERMINADOS
POR LOG DE COSTOS Y LOG DE CAUDALES DE OPERACION
PARA ARIETES "A"

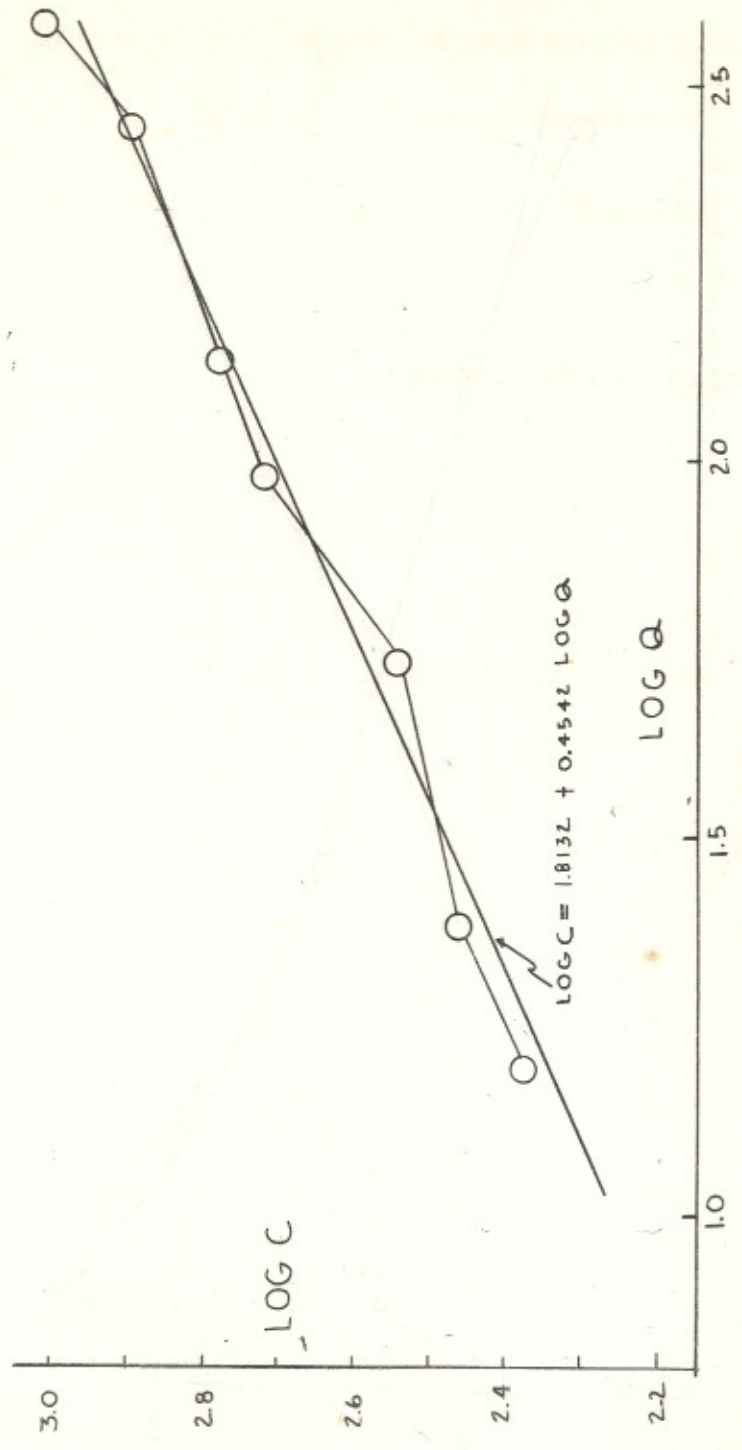


FIG. 7

GRAFICO DE LA CURVA $Y = mX^b$ OBTENIDA PARA ARIETES "A"
AL TRANSFORMAR LA FUNCION INTERPOLADA A LA FORMA
ALGEBRAICA

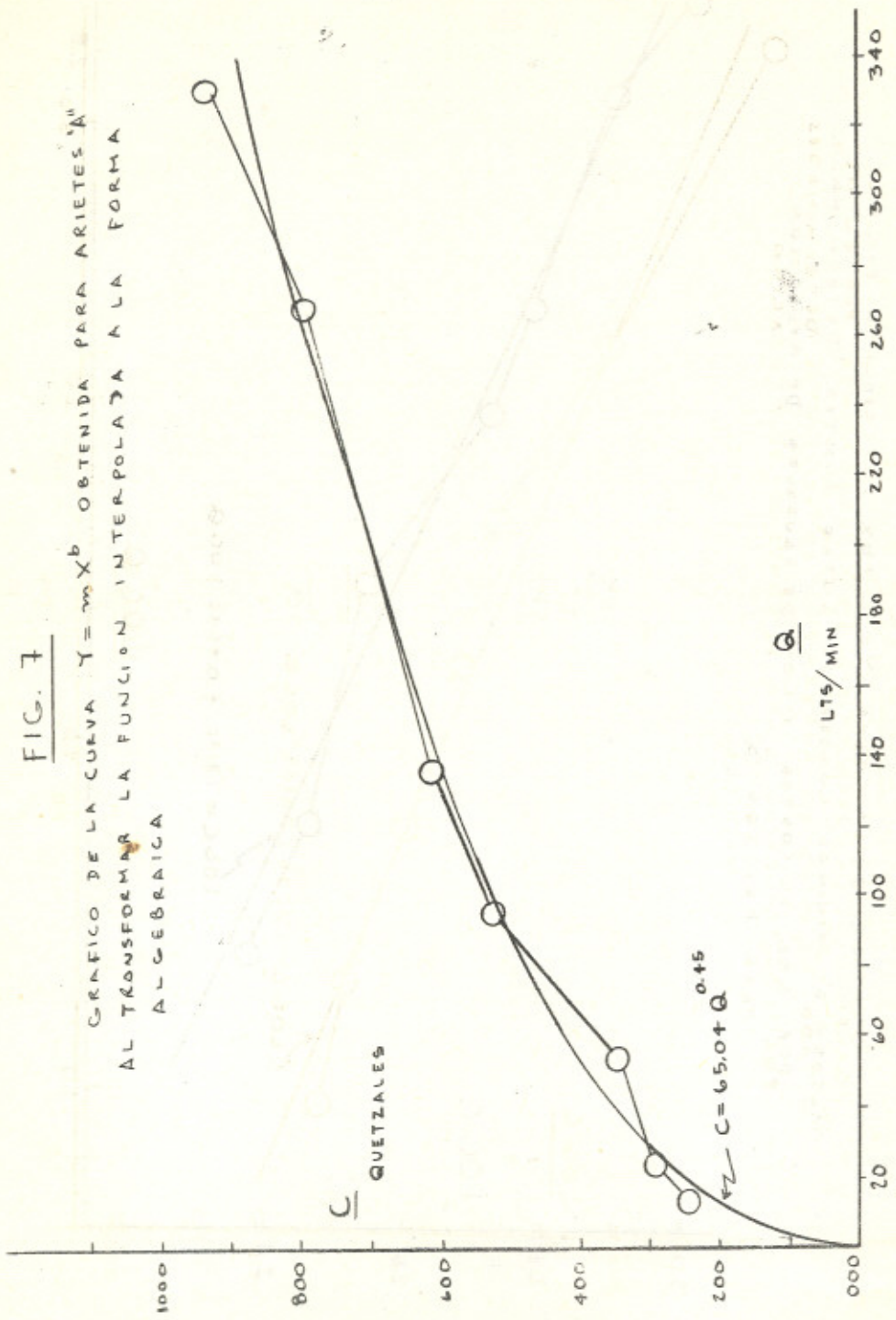


FIG. 8

GRAFICO DE LA CURVA $Y = a + bX$ INTERPOLADA POR EL ME
- TODO DE MINIMOS CUADRADOS ENTRE PUNTOS DETERMINADOS
POR LOG. DE COSTOS Y LOG. DE CAUDALES DE OPERACION
PARA ARIETES "B"

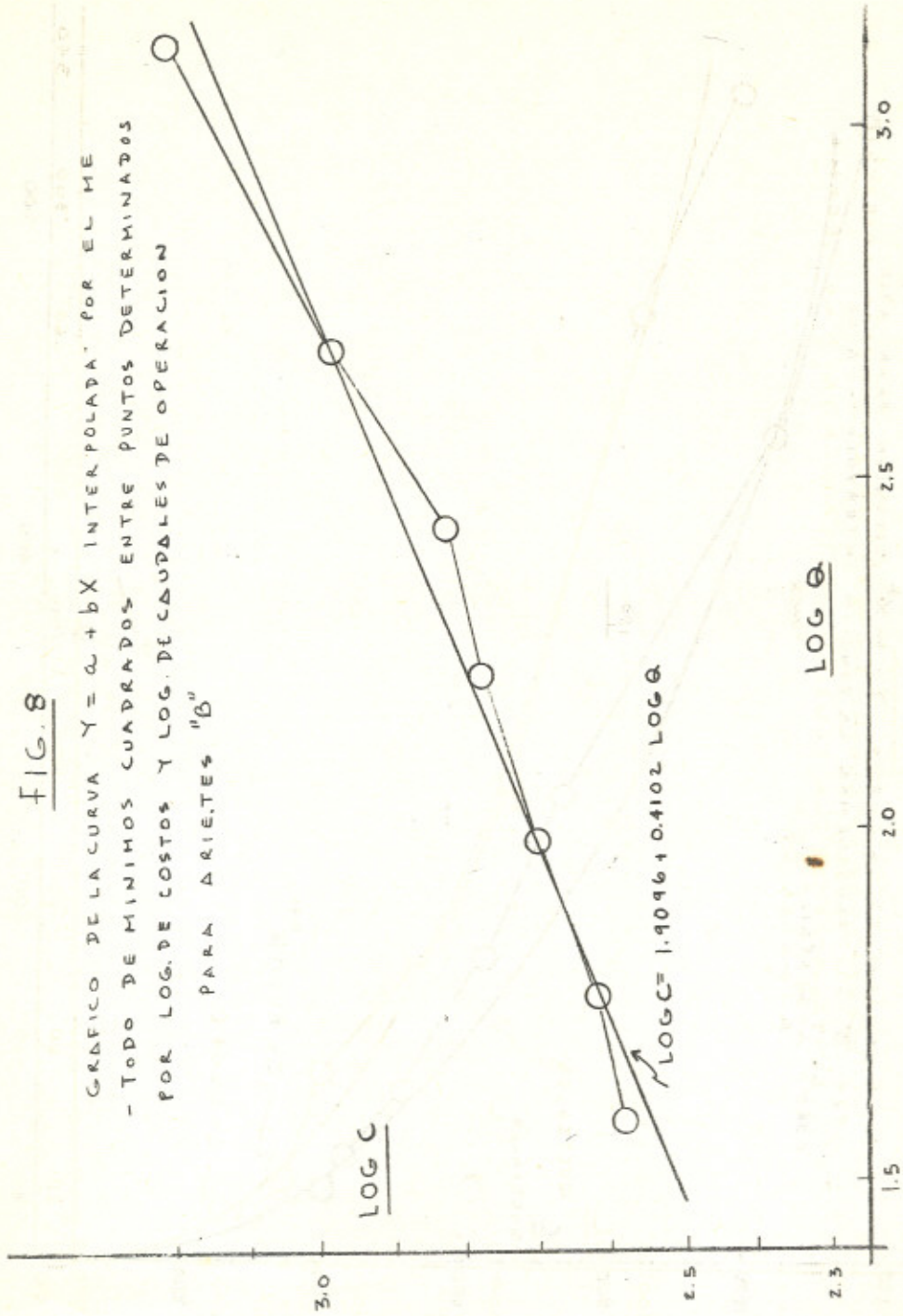


FIG. 9

GRAFICO DE LA CURVA $Y = mX^b$ OBTENIDA PARA ARIETES "B" AL TRANSFORMAR LA FUNCION INTERPOLADA A LA FORMA ALGEBRAICA

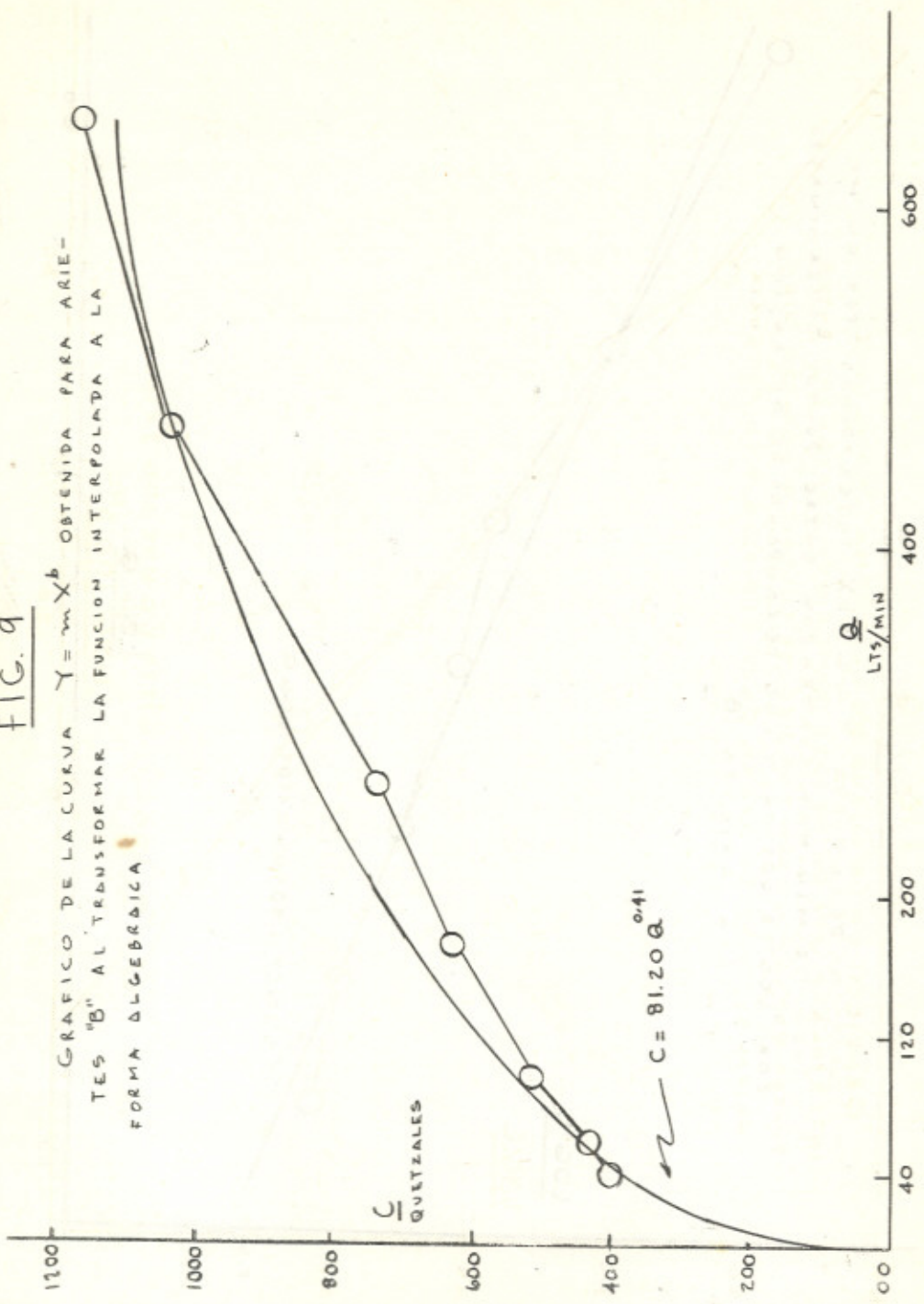


FIG. 10

GRAFICO DE LA CURVA DE LA FORMA $Y = a + bX$
 INTERPOLADA POR EL METODO DE MINIMOS CUADRADOS ENTRE
 PUNTOS DETERMINADOS POR LOG. DE COSTOS Y LOG. DE DIA-
 METROS DE TUBOS DE ACERO GALV. ELEVADOS A LA POTENCIA
 $5/2$ Y MULTIPLICADOS POR 100

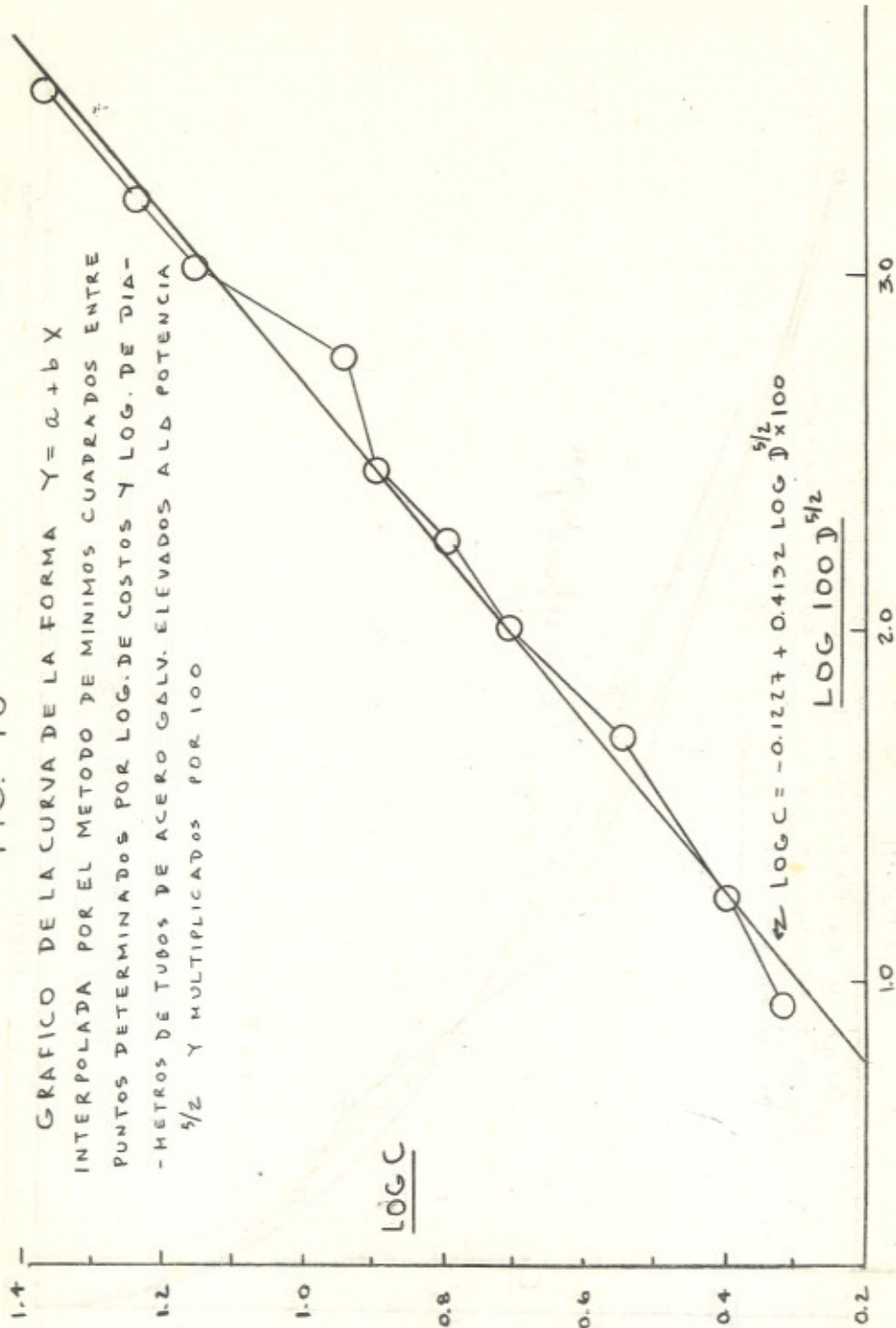


FIG. II

GRAFICO DE LA CURVA $Y = mX^b$ Y DE LOS
PUNTOS DETERMINADOS POR VALORES CORRESPONDIENTES
DE COSTO Y $100D^{5/2}$

