



UNIVERSIDAD VERACRUZANA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS HIDRODINÁMICO
DEL HIDROARIETE DTU-P4 BASADO
EN UNA RESPUESTA DE TRABAJO**

**UNIVERSIDAD
LIS DE VERACRUZ ARTE CIENCIA LUZ**
TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA HIDRÁULICA**

PRESENTA:

Justo Juvenal Solano Pérez

H. VERACRUZ, VER.

JULIO 1998

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana



UNIVERSIDAD VERACRUZANA INSTITUTO DE INGENIERIA

H. Veracruz, Ver., a 7 de Julio de 1998
DI371/98

Al candidato al Grado:
ING. JUSTO JUVENAL SOLANO PEREZ
PRESENTE:

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a Usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Dr. Ismael A. Muñoz Maya, para que lo desarrolle como tesis, para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería Hidráulica:

TEMA:

“ANÁLISIS HIDRODINAMICO DEL HIDROARIETE DTU-P4 BASADO EN UNA RESPUESTA DE TRABAJO”

- I .- Introducción
- II .- Planteamiento y Justificación del Problema
- III .- Hipótesis
- IV .- Objetivos
- V .- Antecedentes
- VI .- Evaluación del Hidroariete DTU-P4
- VII .- Resultados y Discusión
- VIII .- Conclusiones
- IX .- Apéndice
- X .- Bibliografía

Sin otro particular, me es grato quedar de Usted como su atento y seguro servidor.

ATENTAMENTE

“LIS DE VERACRUZ: ARTE, CIENCIA, LUZ”


DR. ENRIQUE A. MORALES GONZALEZ
DIRECTOR

EMG/apm*.

DEDICATORIAS

A mi Padre †

Juvenal Solano Obregón

Te dedico ésta Tesis donde quiera que te encuentres
Gracias por iluminar mi camino.



A mi madre

María Elena Pérez Pale

Por su amor, cariño, confianza y comprensión
brindado durante todo momento de mi vida

A mis Hermanos

Jorge Pepe y Hugo

Por todo su apoyo, comprensión y motivación

A toda mi Familia

Por todo su apoyo espiritual y moral que he recibido

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ismael Muñoz Maya por su confianza y apoyo incondicional para lograr que éste trabajo fuera un éxito

Al Dr. David Riestra Díaz por su experiencia y gran atingencia en darle el voto de confianza al trabajo de investigación.

Al Dr. Enrique A. Morales Gonzales por su investidura de autoridad y por todos aquellos momentos compartidos durante mi estancia en el Instituto.

Al Ing. Jaime Revilla Fajardo un especial agradecimiento sincero y fraternal por haber sido el que sembró en mí la semilla del estudio del comportamiento de las transitorias hidráulicas

Al M.I. Enrique Rodríguez Magaña por todos los momentos y experiencias compartidos durante mi carrera.

A los Ingenieros Elio Mendez Damasco, Demetrio del Angel Martinez y Alfonso Omar Ramírez Lopez sin ellos éste trabajo no hubiera tenido el sello de éxito y además el haber compartido los momentos de felicidad y fracaso.

Al Instituto Tecnológico de Veracruz, y en especial al director Dr. Alfonso García Reynoso por haberme autorizado el utilizar las instalaciones y equipo de la Institución y su gran confianza y apoyo en mi persona

A don Juan Ugalde y al Sr. Carlos Paéz Por su disposición siempre atenta que tuvieron conmigo.

Al personal de Jardinería y Mantenimiento del Instituto Tecnológico de Veracruz por su gran ayuda en los momentos que más necesite para realizar mis ensayos.

A la Universidad Veracruzana y en especial al Instituto de Ingeniería porque abrigaron en mí un nuevo profesionista.

Y A TODOS AQUELLOS QUE DE ALGUNA FORMA CONTRIBUYERON EN EL ÉXITO DEL TRABAJO , SOLAMENTE ME RESTA DECIR

GRACIAS

INDICE

	Página
INDICE DE FIGURAS	iv
INDICE DE TABLAS	v
I INTRODUCCIÓN	1
II PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	5
III HIPÓTESIS	8
IV OBJETIVOS	10
V ANTECEDENTES	12
5.1 Reseña histórica	12
5.2 Generalidades sobre la bomba de ariete	15
5.3 Análisis del golpe de Ariete	19
5.3.1 Velocidad de Onda	22
5.3.2 Cámara de Aire	26
5.3.2.1 Ecuación dinámica	26
5.3.2.2 Ecuación de Continuidad	32
5.3.2.3 Gasto elevado	35
5.4 Parámetros de Diseño	37
5.4.1 Tubería de Alimentación	37
5.4.2 Válvula de impulso	39
5.4.3 Cámara de aire	40
5.4.4 Gasto elevado. Ariete hidráulico-Goulds	43
5.4.5 Tubería de descarga	44
VI EVALUACIÓN DEL HIDROARIETE DTU-P4	45
6.1 Descripción del sistema	45
6.2 Metodología	49
6.2.1 Funcionamiento del sistema	49
6.3 Análisis dimensional	53

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
7.1 Cálculo de Carga, Gasto y Presión analíticamente	55
7.2 Evidencias observadas durante el ciclo de operación	57
7.3 Evaluación de campo del Gasto-Carga-Presión del Hidroariete DTU-P4	64
7.4 Pérdidas en el sistema	67
7.5 Solución por medio de la interpolación de <i>Hermite</i>	72
7.6 Rendimiento por eficiencia	78
7.7 Análisis del comportamiento de la cámara de aire	80
VIII CONCLUSIONES	87
IX APÉNDICE	90
A Dibujos	90
9.1 Cuerpo de la bomba de ariete DTU-P4	91
9.2 Válvula Check de la bomba de ariete DTU-P4	92
9.3 Despiece de la bomba de ariete DTU-P4	93
9.4 Cámara de aire de la bomba de ariete DTU-P4	94
B Gráficas	95
9.1 Relación Tirante-Presión-Gasto durante la fase inicial del proceso	96
9.2 Relación Presión-Tiempo durante la fase inicial del proceso	97
9.3 Relación Tirante-Tiempo durante la fase inicial del proceso	98
9.4 Relación Tirante-Presión-Gasto durante la fase de descarga de una pulsación	99
9.5 Relación Tirante-Tiempo durante la descarga de una pulsación	100
9.6 Relación Tirante-Tiempo durante la descarga de una pulsación	101
9.7 Relación Tirante-Tiempo-Gasto durante la carga de una pulsación	102
9.8 Relación Presión-Tiempo durante la descarga de una pulsación	103
9.9 Relación Tirante-Tiempo durante la descarga de una pulsación	104
9.10 Relación de Trabajo Tirante-Tiempo durante su ciclo completo de Trabajo	105
9.11 Relación de Trabajo Presión-Tiempo durante su ciclo de Trabajo	106

9.12 Operación del Hidroariete Hidráulico DTU-P4 con carrera mínima y diferentes aberturas	107
9.13 Operación del Hidroariete Hidráulico DTU-P4 con carrera mediana y diferentes aberturas	108
9.14 Operación del Hidroariete Hidráulico DTU-P4 con carrera máxima y diferentes aberturas	109
9.15 Relación Velocidad-Tirante-Tiempo durante el ciclode Trabajo del ariete de acuerdo con el polinomio de Hermite	110
9.16 Relación Presión-Tiempo del resultado de la interpolación de Hermite para todo el ciclo de operación	111
9.17 Eficiencias de operación del Ariete Hidráulico DTU-P4 a distintas carreras	112
C Anexos	113
D Resumen de la solución del gasto de la cámara a través de la discretización lineal	117
E Resumen de la solución del gasto de la cámara a través de la interpolación de <i>Hermite</i> .	124
X BIBLIOGRAFÍA	131



INDICE DE FIGURAS

	Página
5.2.1 Diagrama de una típica instalación de la bomba de ariete.	16
5.2.2 Curvas que muestran los cambios que suceden durante un ciclo normal de operación	17
5.3.1 Volumen de control para un cierre de válvula	20
5.3.2 Propagación de la onda de presión	23
5.3.3 Representación de un sistema hidroeléctrico con cámara de aire	27
5.4.1 Válvulas de impulso tipo Clack	41
5.4.2 Válvulas de impulso tipo Pelota y Check	41
5.4.3 Válvulas tipo Clack y de Carrera ajustable	42
6.1.1 Descripción del sistema	46
6.2.1 Vista del flujo a través de las 6 ventanas	50
6.2.2 Vista del momento del golpe de ariete cuando las 6 ventanas son obturadas	50
6.2.3 Momento que muestra el peso en su fase de nueva compresión	52

INDICE DE TABLAS

	Página
7.1.1 Datos obtenidos de la solución de la ecuación 5.3.31 que muestran la relación entre presión, tirante, gasto y tiempo durante la fase inicial del proceso	60
7.1.2 Datos obtenidos de la solución de la ecuación 5.3.31 que muestran la relación entre presión, tirante, gasto y tiempo durante la fase de descarga de una pulsación	61
7.1.3 Datos obtenidos de la solución de la ecuación 5.3.31 que muestran la relación entre presión, tirante, gasto y tiempo durante la fase de carga de una pulsación	63
7.3.1 Datos obtenidos de la solución en campo de la bomba de ariete hidráulico DTU-P4 a carrera mínima	65
7.3.2 Datos obtenidos de la solución en campo de la bomba de ariete hidráulico DTU-P4 a carrera mediana	65
7.3.3 Datos obtenidos de la solución en campo de la bomba de ariete hidráulico DTU-P4 a carrera máxima	66
7.5.1 Valores obtenidos del tirante a través del método de polinomio de <i>Hermite</i>	73
7.5.2 Valores obtenidos de la presión para el dominio $0.048 < t < 0.96$ a través del polinomio de <i>Hermite</i>	75
7.5.3 Valores obtenidos de la presión para el dominio $0.096 < t < 3.27$ a través del polinomio de <i>Hermite</i>	76
7.6.1 Eficiencias de la bomba de ariete hidráulico DTU-P4 a diferentes carreras y diferentes gastos de alimentación	79
8.1.1 Cuadro comparativo de los datos proporcionados por la U. de Warwick en Inglaterra contra los obtenidos de la evaluación técnica de la bomba de ariete hidráulico DTU-P4	87

1 Introducción

El agua constituye uno de los recursos naturales más importantes para la vida. Desde la aparición del hombre en la tierra, éste ha buscado y descubierto formas de controlarla y aprovecharla, como para de ella misma obtener energía, que es lo que actualmente mueve gran parte del mundo. El valor de este elemento es reconocido en todos los lugares del planeta.

En diversas regiones rurales, algunos pueblos están situados de forma tal, que reciben el agua por acción de la gravedad desde manantiales o galerías de filtración situadas en las colinas cercanas. Sin embargo, la mayoría, tienen que recurrir al empleo de bombas para elevar el agua de pozos, lagos, ríos o depósitos, o bien para impulsarlas por las tuberías de distribución. La elección de la bomba más adecuada para cada caso particular tiene, por lo tanto, una extraordinaria importancia.

La experiencia de diversos investigadores ha demostrado que las deficiencias en la elección e instalación de dispositivos de bombeo son la causa más frecuente del mal funcionamiento de los sistemas de abastecimiento de agua. Es de gran importancia recordar que cada

bomba se ha creado con una finalidad concreta y por lo tanto cada una tiene un campo de acción determinado.

Existen lugares donde es posible aprovechar o crear una mínima caída de agua para bombearla a cierta altura, mediante un dispositivo llamado **bomba de ariete hidráulico**, que ofrece la gran ventaja de no requerir ninguna fuente de energía externa, ya que emplea la energía potencial de la caída de agua, lográndose así un costo de operación casi nulo.

A partir del siglo XVIII, una serie de investigadores se dedicaron al estudio de la energía potencial del agua y la forma en que ésta pudiera ser aprovechada, lográndose así la construcción de las primeras bombas de ariete hidráulico. En México este artefacto se utilizó en algún grado en la década de 1930 pero su uso apropiado no se difundió ampliamente, debido entre otras causas, al inicio de la electrificación del medio rural y el empleo de bombas de corriente eléctrica, así como la diseminación en el uso de bombas de combustión interna.

Sin embargo, en la actualidad, los elevados costos de los energéticos, la corta vida de operación de las bombas de combustión interna y el alto costo que implica hacer llegar el servicio de energía eléctrica a congregaciones de difícil acceso, han propiciado que se retome la experiencia en diferentes centros de investigación y se comience a difundir el uso de bombas de ariete hidráulico, con el fin de

brindar soluciones prácticas y adecuadas a la necesidades de las comunidades. rurales.

No obstante, debido a todos los factores antes mencionados, la diferencia de costos entre los metálicos, que se utiliza actualmente para la fabricación de éstos y la reciente incursión de polímeros plásticos en la industria sanitaria, como **cloruro de Polivinilo** (PVC); ha propiciado que se investiguen algunas propiedades mecánicas y de frontera que lo distinguan como agente sustituto, al menos, en algunas partes importantes.

En base a lo anterior, la Universidad de Warwick, en Inglaterra a través del Departamento de Ingeniería en su Unidad de Desarrollo Tecnológico, ofrece una tecnología completamente diferente en la conceptualización y presentación del fenómeno con un modelo de vanguardia que aprovecha las propiedades físicas del **cloruro de Polivinilo**, como una nueva generación de hidroarrietes.

Esta nueva bomba, conocida por sus siglas DTU-P4, fue cedida mediante un convenio al grupo Tekiu de Veracruz y financiado por el grupo, International Friendships Developments (IFD), con sede en Japón para que se promueva su difusión, construcción y extensión a grupos localizados en zonas rurales o marginales, que tengan posibilidades de aprovechar el recurso agua.

Ante la carencia de mayor información de funcionamiento y de logística ya que solamente se contó con los planos de diseño, y para poder diseminar el uso de ésta, fue necesario primero que se debiese comprender su funcionamiento así como sus alcances de operación de este nuevo prototipo. Por tal motivo, con participación de algunos egresados del Instituto Tecnológico de Veracruz, y con el interés de presentar una explicación del fenómeno, se hace un **Análisis hidrodinámico del Hidroariete DTU-P4, basado en su respuesta de trabajo.**



2 Planteamiento y justificación del problema.

Después de los trabajos de *De Parres, (1966)* y *de Calvert, (1960)*; *citados por Aragón (1987)*, la utilización de hidroarrietes como dispositivos mecánicos para elevar agua a diferentes alturas sin la utilización de energía eléctrica, se generalizaron principalmente en zonas rurales de Asia, África y Centroamérica. Sin duda existe una gran cantidad de información acerca de los resultados en rendimientos obtenidos durante largos períodos de operación utilizando al fierro como elemento de cuerpo. Sin embargo, en la actualidad, en muchas comunidades sigue siendo oneroso el utilizar materiales metálicos en la construcción de éstos.

Recientemente, el uso de polímeros en la conducción de agua potable en zonas rurales ha originado una creciente inquietud de utilizar el "PVC" como material constitutivo en la construcción de hidroarrietes. Inicialmente las primeras sospechas de utilizar a éste como material constitutivo, frenaron por largo tiempo su uso, debido, entre otras cosas, a su débil posición como material rígido, baja tolerancia a altas cargas de trabajo, bajo valores de cedencia, de impacto, y a la alta capacidad elástica de los plásticos, que sugiere un

alto grado de absorción del golpe de ariete durante el transitorio y que trae como consecuencia inevitables condiciones favorables a la fractura. Sólo a través del tiempo y al rápido desarrollo de la mecánica de materiales, surge una nueva gama de polímeros reforzados destinados a la conducción de fluidos sometidos a altas presiones, como lo demuestran **Larson y Lennard (1992)**, en sus trabajos del uso de PVC sometido a transitorias hidráulicas.

Ante la suspicacia todavía existente para utilizar al PVC, como material de soporte, intentamos en el presente trabajo acrecentar aún más la posibilidad de uso como lo sugiere el prototipo de la **Universidad de Warwick** para mejorar el aprovechamiento de la dinámica del fluido.

El primer paso en la línea de acción es la construcción basada en los planos obtenidos del prototipo a ensayar, para que a partir de las respuestas de operación *in situ*, podamos proponer un marco teórico de funcionamiento y establecer sus correspondientes curvas de operación, y en consecuencia, determinar su factibilidad de uso.

Otro línea de investigación del trabajo, consiste en establecer los primeros criterios teóricos sobre el comportamiento de la cámara de aire para poder estimar el correcto dimensionamiento de la misma. Esto se debe a que, no existe una función que permita obtener el óptimo funcionamiento, ya que actualmente se sigue utilizando el criterio propuesto por **Molyneux (1960)**, que sugiere que "**el volumen de la**

cámara es aproximadamente igual al volumen de la línea de entrega". Lo cual es ilógico desde el punto de vista de diseño, al no tener un carácter predictivo y mensurable. Y esto se comprueba en el trabajo presentado por *Palicio (1989)*, en donde reporta el mismo criterio. En cambio, otros trabajos omiten o prefieren no hablar de ello (*Magdaleno,1995;Lopez,1994*).



3 Hipótesis

- 3.1 El hidroariete se comporta como bomba de impulsión
- 3.2 Se utilizan todas las suposiciones que recomienda **Mancebo (1987)** para cámaras de aire durante transitorias hidráulicas en hidroeléctricas y sistemas de bombeo.
- 3.3 Se cumple el fenómeno de golpe de ariete en todas sus fases como lo sugiere **Parmakian (1977)**, durante el transitorio.
- 3.4 El fluido se comporta compresible en la línea de conducción e incompresible dentro de la cámara de aire.
- 3.5 La energía potencial y cinética se transforma en energía elástica durante el transitorio lo que contribuye a que dicha masa de agua pueda ser transferida de un nivel inferior a otro mayor nivel. (**Karney, 1991**)
- 3.6 El fenómeno se presenta en dos fases dentro de la cámara a régimen de recipiente a presión, siguiendo la ley de los gases ideales.

- 3.7 Se cumple la Ecuación de **Jowkosky**, para simular la ley de cierre instantáneo cuando la media caña llamada "Lengua" obture por completo las ventanas del cuerpo.
- 3.8 La tubería de PVC-RD-26, cumple las normas de ASME para soportar las sobrepresiones originadas por el sistema simulado.
- 3.9 Del punto anterior y con los resultados de **Lennart y Jönsson (1992)**, la tubería de PVC es capaz de soportar los esfuerzos y deformaciones esperadas durante el transitorio.
- 3.10 Como primera aproximación en el comportamiento de la cámara de aire, se propone un función lineal para explicar que el volumen del agua y la presión dentro de la misma no son constantes.
- 3.11 Debido a la longitud del cuerpo, existe un diferencial de tiempo(dt) significativo que se presenta al termino de cada fase inversa del golpe de ariete, ocasionando que el periodo sea más pronunciado, sólo a través de las pruebas de campo y del modelado del problema, justificar un cuasiperiodo.
- 3.12 Ladinámica de entregase manifiesta endos procesos, un transitorio, cuando la cámara está vacía; y un estacionario, cuando la cámara opera con diferentes niveles de agua contenidos en ella.

4 Objetivos

Analizar el comportamiento hidrodinámico del hidroariete DTU-P4 basado en la respuesta de trabajo, para:

- 4.1 Conocer en primera instancia, como opera **in situ** todo el sistema.
- 4.2 Obtener de pruebas de campo, el nivel dentro de la cámara durante cada ejercicio de operación; es decir, al inicio de la prueba y los consecutivos, para proponer una ecuación que explique su comportamiento.
- 4.3 Simular diferentes cargas, para obtener las curvas de operación con sus respectivas eficiencias.
- 4.4 Registrar las diferentes lecturas de presión y de gasto para proponer el comportamiento del transitorio.
- 4.5 Que a través de lecturas de los manómetros, validar la ecuación de **Jowkosky** como función que calcula la sobrepresión en el diseño del hidroariete DTU-P4.

- 4.6 Que con los datos obtenidos, proponer la ecuación diferencial de cámara de aire para hidroeléctricas y estaciones de bombeo, con sus respectivos cambios, una alternativa análoga modificada, para que en nuestro caso, sea una primera aproximación en el diseño de cámaras de aire en los hidroarrietes metálicos y/o plásticos.



5 Antecedentes

5.1 Reseña Histórica

La hidráulica es una parte de las ciencias físicas que como técnica es tan antigua como el mismo hombre, ya que éste para su seguridad y sustento siempre estuvo atento a dar solución a problemas tales como: la protección contra el efecto de inundaciones, irrigación de terrenos de cultivo, dotación de agua a poblaciones, sistemas drenaje, etc. pero como ciencia aún a fines del siglo pasado se encontraba en sus inicios y existía una gran cantidad de empirismo en torno a su aplicación a problemas de ingeniería hidráulica.

Este empirismo se mostró a través de muchos inventores que fincaron su ingenio en diseñar dispositivos mecánicos llamados **máquinas hidráulicas**, capaces de elevar el agua sin ocupar a la postre el esfuerzo humano. En **1775**, en Inglaterra, **Whitehurst**, reporta el principio del funcionamiento de un hidroariete. **Montgolfier**, (1796), operó el primer ariete automático, al que llamo "**le belier hydraulique**",

Al año siguiente acredita su patente. **Eytelwin (1798)**, modifica los trabajos de **Montgolfier**, mejorando la eficiencia de operación. En **1820**, se inicia la fabricación de arietes a nivel comercial al asignarse la patente de **Montgolfier a Joseph Easton**.

Entre los primeros investigadores y científicos que se interesaron en interpretar al fenómeno con un carácter más formal y disciplinado, podemos mencionar a **Jokowsky, (1897)**, quién llevó a cabo estudios sobre el conocimiento del golpe de ariete. Demostró que cuando en una tubería se presenta un incremento de presión a causa de un cierre brusco de una válvula situada en el extremo aguas abajo, la celeridad de la onda de presión generada por tal maniobra, al igual que el sonido, también es una función de la elasticidad de las paredes.

Allievi, (1902), profundizó los estudios sobre el golpe de ariete, presentándolo en su obra "**Teoría generale del moto perturbato del l'acqua nei tubi in presioni**".

Además, surgieron diferentes investigadores que contribuyeron en entender el principio y ofrecieron posibilidades de modificación de la bomba de ariete [**Calvert, (1957); Molyneux, (1960); Kindel, (1975); Watt, (1978); citados por Aragón (1986)**].

En México, desde hace 80 años, los arietes se introdujeron a través de la compañía británica "**Blake Hidran**", donde en Soledad de Doblado, Ver., instaló 3 arietes para el servicio de los ferrocarriles de vapor que transitaban por aquella ruta. En la actualidad sigue operando parcialmente en las épocas de secas o bombeando a colonias conurbadas de aquellas zonas. Se sabe que en los Atlixcos, Ver., se instalaron 2 arietes para bombear agua al pueblo a una distancia vertical de 130 m y una distancia horizontal de 8 Km.

Recientemente, **Riestra (1998)**, presentó al Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, un trabajo que resume a través de una Antología, los aspectos más relevantes sobre hidroarrietes,

Actualmente, sólo instituciones de investigación mantienen vigente el interés de proseguir con la idea de difundir esta bomba, buscando nuevas alternativas o mejorando las eficiencias que puedan lograrse con prototipos endémicos o nacionales. Entre otras instituciones, como el **CRECIDATH** (ahora Campus Veracruz del Colegio de Postgraduados) y el **Campo Experimental Cotaxtla**, mantienen el liderazgo en el estado de Veracruz.

5.2 Generalidades sobre la bomba de ariete

5.2.1. El principio de operación de los hidroarrietes convencionales.

La citada máquina trabaja por medio del fenómeno que sucede cuando al conducir líquidos en tuberías y al detenerlos súbitamente u obstruirlos, la energía cinética se va transformando en un trabajo de compresión del fluido que llena la tubería y en trabajo que dilata ésta última, esto en virtud del principio de conservación de la energía y el momento. Al citado fenómeno se le llama "golpe o impacto de ariete". Cuantas veces se permita fluir libremente el líquido y se obstruya o intercepte a continuación, réplicas aparecerán inexorablemente.

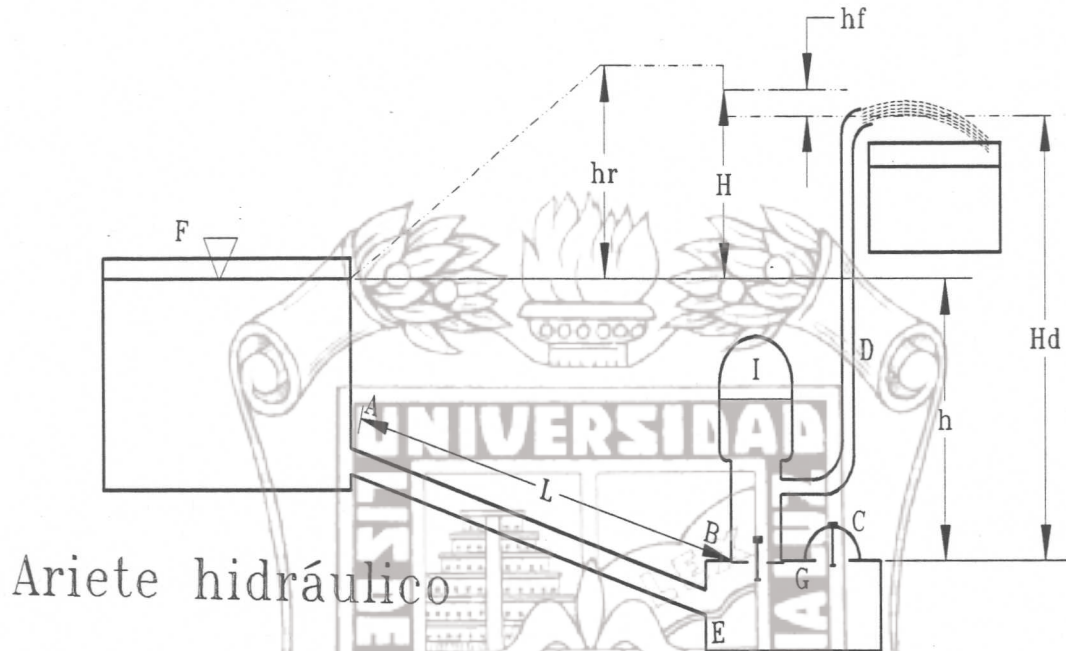
El líquido que se agolpa, de forma semejante a los vagones de un ferrocarril al freno brusco, produce una onda de sobrepresión que se propaga con velocidad igual a la del sonido en el agua (modificada por la relativa resiliencia de la tubería), y "rebota" hacia la represa o fuente de escurrimiento para luego fluir nuevamente. El ciclo en teoría continuará indefinidamente. *(Streeter y Wylie, 1936)*.

La Figura 5.2.1 muestra esquemáticamente el arreglo y las partes de una típica instalación de la bomba de ariete. Las curvas de la Figura 5.2.2 representan los cambios que suceden durante el ciclo normal de operación, atendiendo a los siguientes tres factores

1. La variabilidad de la presión en el punto extremo del tubo de alimentación junto al cuerpo del ariete.

2. La variación de la velocidad del agua en el tubo de alimentación

3. La posición de la válvula de desgaste



Ariete hidráulico

Figura 5.2.1 Diagrama de una típica instalación de la bomba de ariete (De Parres, 1966).

Haciendo referencia a las Figuras (5.2.1) y (5.2.2) se describe enseguida el ciclo de operación de la bomba de ariete.

- I. Al final de un ciclo previo, el agua empieza a fluir por el tubo de alimentación bajo el efecto de la columna alimentadora (h), y sale a través de la válvula de desgaste (G) que se haya totalmente abierta debido a una fuerza en ese sentido.

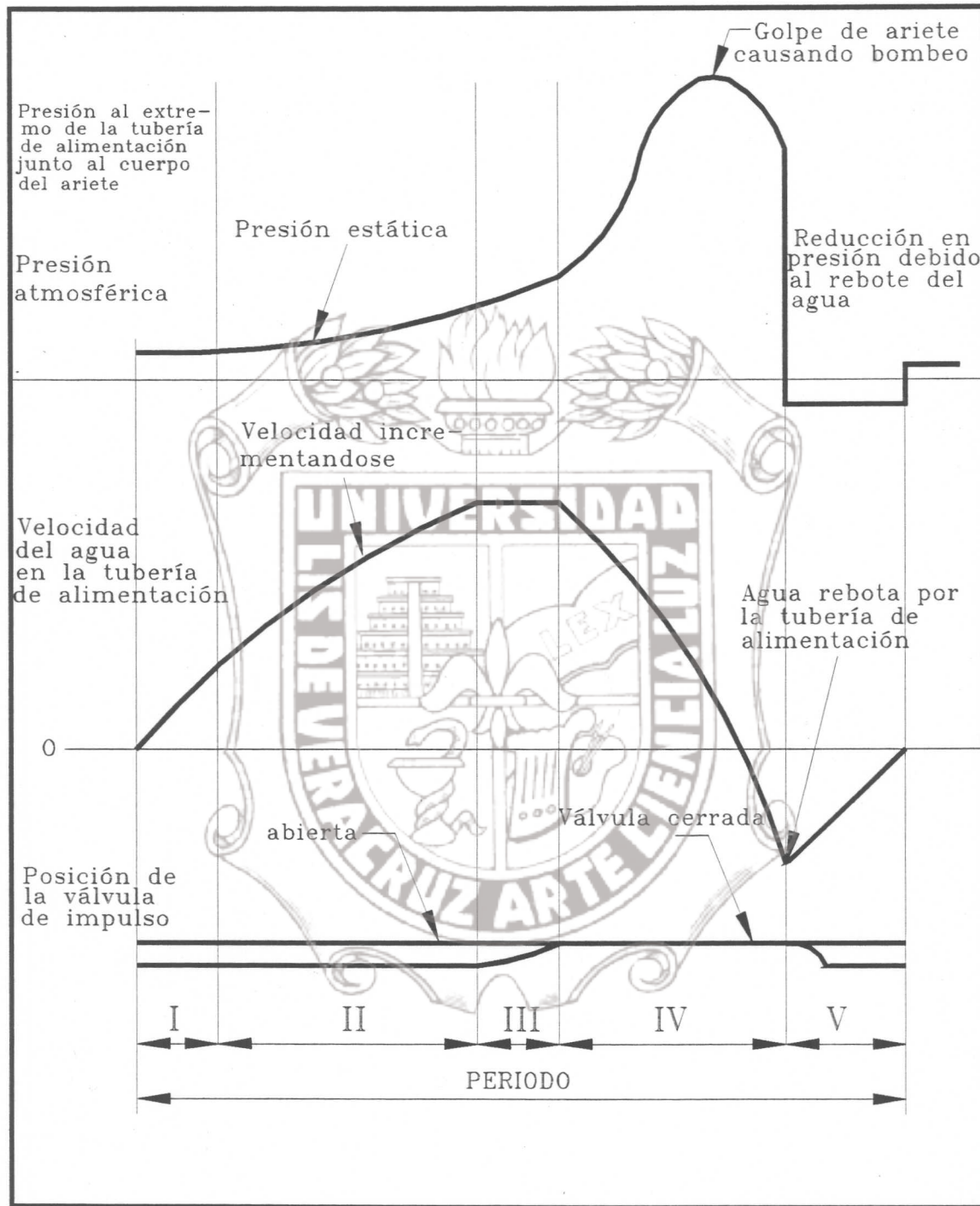


Figura 5.2.2 Curvas que muestran los cambios que suceden durante un ciclo normal de operación de la bomba de ariete.

- II. El flujo de agua se continua acelerando y alcanza su máxima velocidad (en función de la resistencia de la válvula [G]).
- III. Momentáneamente la válvula de desgaste empieza a cerrar a consecuencia de la carga hidráulica y la sobrepresión dinámica por debajo de ésta.
- IV. La sobrepresión rápidamente vence la resistencia de la válvula de desgaste y provoca el cierre repentino. La columna de agua que se mueve hacia abajo por el tubo de alimentación es detenida bruscamente y provoca el máximo incremento de sobrepresión en la caja de válvulas, normalmente suficiente para abrir la válvula de entrega (B) y llegar una porción de ésta misma agua a un nivel superior, por ejemplo: la columna (Hd).
- V. Debido al efecto combinado de la columna de entrega; la resiliencia del agua y la del material de la tubería de alimentación, la onda de presión rebota hacia la represa, originando una depresión que inmediatamente cierra la válvula (B) y abre la (G). Luego sucesivamente el ciclo se repite.

La porción de agua es entregada hacia (Hd) por medio de una cámara de aire que funciona como un amortiguador de los choques violentos y cíclicos del golpe de ariete, que acabarían por destruir la máquina. Y como acumulador que regula el flujo del agua en la entrega, que de otra forma sería palpitante. El aire en la citada cámara se restituye por medio de una válvula u orificio, durante el período (V) del ciclo.

5.3 Análisis del golpe de Ariete.

Sea, como caso más sencillo, (Figura 5.3.1) el de una tubería a presión que arranca en A de un gran embalse (es decir, en el que la velocidad puede considerarse nula) y termina en B, donde descarga, a la presión exterior, en régimen , un caudal Q, que es obturado por una válvula de paso. Para cualquier tipo de maniobra de cierre en el órgano de control ,se experimenta un cambio en la velocidad permanente, seguida por la aparición de un frente de onda ΔH (H, considerada como energía potencial) que viaja aguas arriba, que según teoría elástica, la energía cinética se ve transformada y alterada.

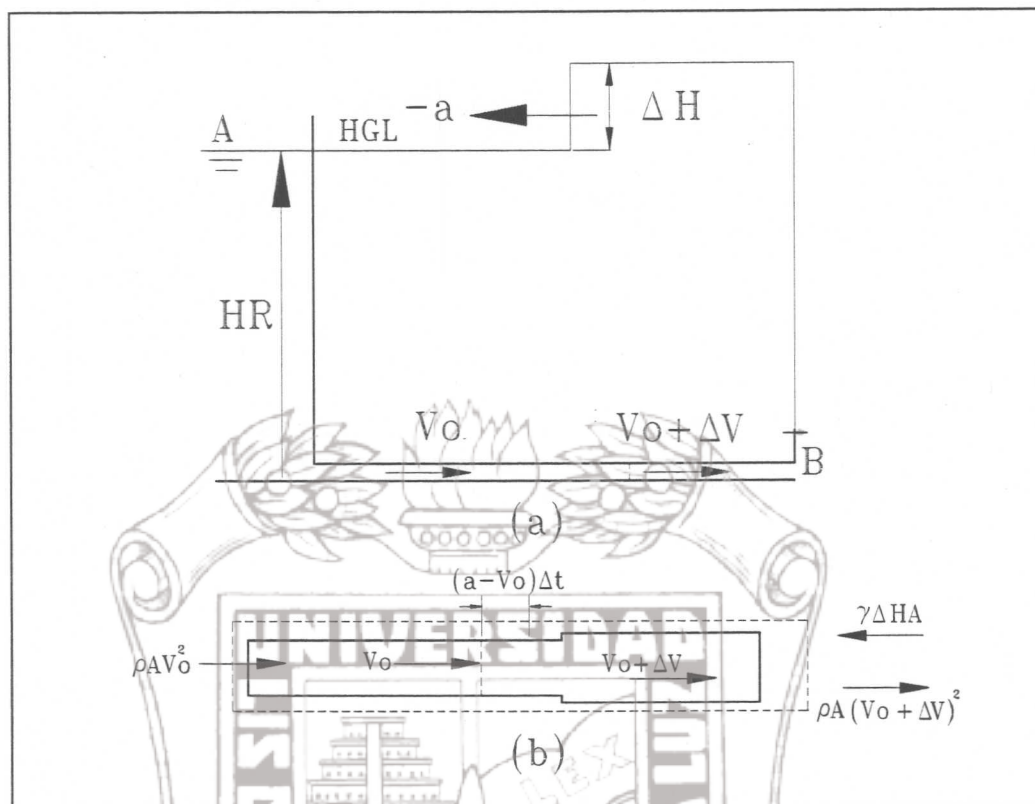


Figura 5.3.1. Volumen de control para un cierre de válvula.

Una ecuación que predice el incremento de sobrepresión ΔH causado por un cierre repentino de una válvula aguas abajo, provoca un cambio en la velocidad $\Delta V = V_2 - V_1$ que puede ser derivada al aplicar la ecuación de momentum a un volumen de control de una sección de un tubo donde el cambio de flujo ocurre. En la Figura 5.3.1 muestra el caso en donde se aplica el volumen de control en una sección de un tubo donde una onda presión se presenta. La expansión del tubo y el incremento de la densidad del fluido es menor comparada con otros cambios que ocurren.

La fuerza neta actuando sobre el volumen de control será positiva en la dirección del flujo cuyo valor es $-\gamma \Delta H A$. El flujo neto del momentum

momentum a través del volumen de control es $\rho A (V_0 + \Delta V)^2 - \rho A V_0^2$, la cual se reduce a $2 \rho A V_0 \Delta V$, donde se ignora el término ΔV^2 .

En un tiempo Δt , la onda presión viaja con una velocidad absoluta de $a - V_0$ moviéndose a una distancia $(a - V_0)\Delta t$. La masa de fluido afectada es $\rho A (a - V_0) \Delta t$. La razón de tiempo para el cambio de momentum dentro el volumen de control es el producto de ΔV y la masa de fluido para aquellos cambios en que la velocidad también cambia en Δt segundos, quedando entonces como:

$$-\gamma \Delta H A = 2 \rho A V_0 \Delta V + \rho A (a - V_0) \Delta V$$

$$\Delta H = -\frac{a \Delta V}{g} \left(1 + \frac{V_0}{a} \right) \quad (5.3.1)$$

Dado que $a \gg V_0$, el cual se puede despreciar, y se obtiene la ecuación de **Jokowsky**, que interpreta el golpe de ariete en un cierre instantáneo.

$$\Delta H = -\frac{a \Delta V}{g} \quad (5.3.2)$$

donde

ΔH = sobrepresión generada en el momento del golpe, en m

a = celeridad de la onda de presión, en ms^{-1}

V_0 = velocidad del fluido en estado permanente, ms^{-1}

ΔV = diferencial de velocidad, en ms^{-1}

5.3.1 Velocidad de Onda

La sobrepresión originada por el transitorio mencionado anteriormente es directamente proporcional a la velocidad de onda, "a", cuyo parámetro depende de la magnitud de la densidad y del módulo de elasticidad del líquido, elasticidad, diámetro y espesor de la tubería y la presencia o no de gas ó aire. En la Figura 5.3.2 se muestra el significado natural físico de su dependencia durante la transitoria de la propagación de la onda de presión, al manifestarse el fenómeno del golpe de Ariete (*Parmakian, 1963*). Para poder encontrar la magnitud del parámetro "a", considérese la Figura 5.3.2, donde $\Delta t = L/a$, después de un instante del cierre de la válvula, la velocidad en la tubería es cero, la tubería se expande en diámetro y en longitud, y el fluido se ha comprimido.

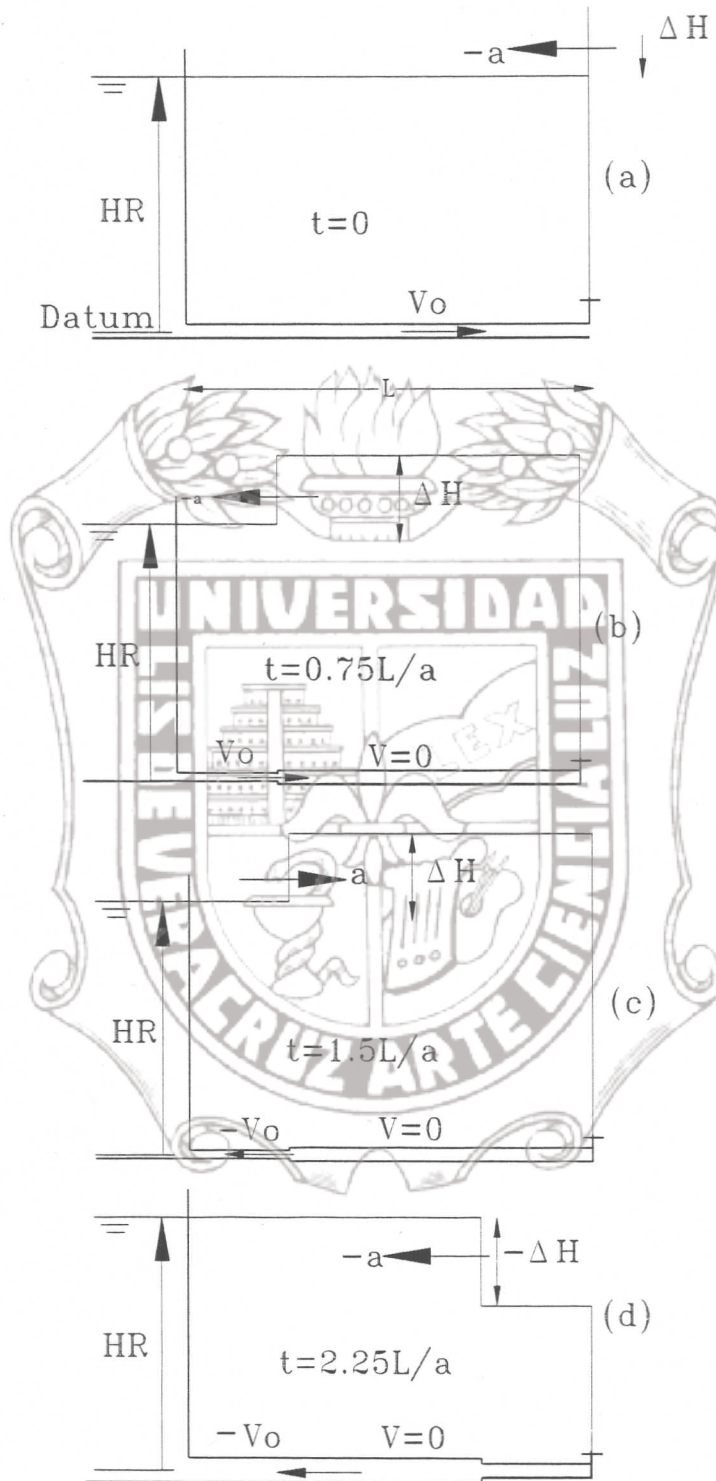


Figura 5.3.2. Propagación de la onda de presión

La masa total entrando a la tubería es $\rho AV_0L/a$. La masa almacenada se debe a la elongación de la pared del tubo. La cantidad almacenada debido al incremento del diámetro de tubo es $\rho L\Delta A$ y la masa almacenada debido al incremento de la densidad es $LA\Delta\rho$.

Sustituyendo las anteriores ecuaciones dentro de la ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{\rho AV_0L}{a} = \rho L\Delta A + LA\Delta\rho \quad (5.3.3)$$

Dividiendo entre ρAL y reemplazando V_0 (la cual es igual a $-\Delta V$ para cierre instantáneo) con $g \Delta H/a$, de la ecuación (5.3.3)

$$\frac{g \Delta H}{a^2} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta\rho}{\rho}$$

resolviendo para a^2

$$a^2 = \frac{g \Delta H}{\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta\rho}{\rho}} \quad (5.3.4)$$

Es deseable expresar la onda de velocidad como una función del fluido y de las propiedades de la tubería. Usando el módulo volumétrico

$$K = \frac{\Delta P}{\Delta\rho} \quad y \quad \Delta P = \rho g \Delta H$$

sustituyendo $g \Delta H = \Delta P / \rho$, multiplicando numerador y denominador de la ecuación (5.3.4) por $K/\Delta\rho$ y arreglando la ecuación

$$a^2 = \frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{K\Delta\rho}{A\Delta P}} \quad (5.3.5)$$

Es necesario relacionar $\frac{\Delta A}{A\Delta P}$ con las propiedades esfuerzo-deformación del tubo. Recordando que $E =$ modulo de Young, se tiene:

$$\text{deformación} = \text{esfuerzo} / E \quad (5.3.6)$$

y si

$$\text{esfuerzo} = \frac{d\Delta P}{2e} \quad (5.3.7)$$

La deformación radial es (combinando la ecuación 5.3.6. y 5.3.7)

$$\text{deformación} = \frac{d\Delta P}{2eE}$$

ΔA es igual a la circunferencia del tubo incrementada en radio en el tiempo dado

$$\Delta A = \pi d \frac{d\Delta P}{2eE} \frac{d}{2} = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\Delta P d}{eE} = \frac{A\Delta P d}{eE} \quad (5.3.8)$$

sustituyendo la ecuación (5.3.8) en la (5.3.5) y sacando la raíz, tenemos

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{Kd}{Ee}}} \quad (5.3.9)$$

Mancebo (1987) menciona valores de densidad para el agua dulce, $\rho = 101.94 \text{ Kg}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-4}$ y para el caso del módulo de elasticidad del PVC, reporta valores de $E = 1.124 \text{ E } 8 \text{ Kgm}^2$; sin embargo, la sociedad mexicana de industrias plásticas, reporta valores, con mayor uso, de $E = 2.08 \text{ E } 8 \text{ Kgm}^2$.

Una vez obtenida la celeridad de onda, ésta nos servirá para poder encontrar la máxima presión en el momento del golpe ariete dentro del cuerpo de la bomba de acuerdo al material que se utilice.

5.3.2. Cámara de Aire

5.3.2.1. Ecuación dinámica

Con el objeto de conocer el comportamiento ideal durante la operación de trabajo del hidroariete DTU-P4, es necesario establecer el marco teórico y la solución analítica de las ecuaciones dinámica y de continuidad para el sistema mostrado en la Figura 5.3.3

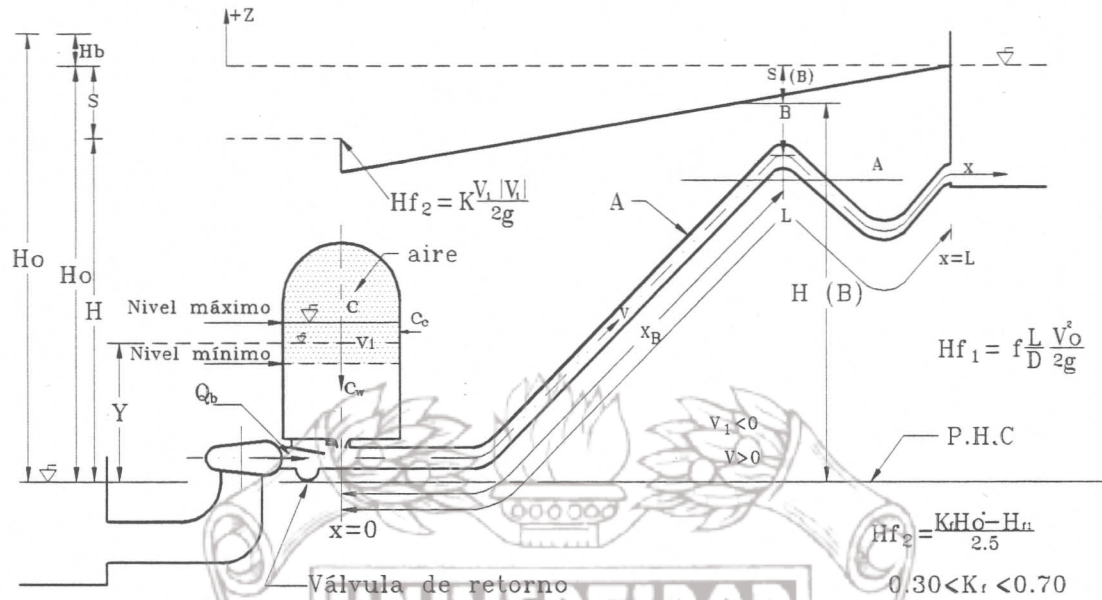


Figura. 5.3.3 Representación de un sistema hidroeléctrico con cámara de aire

Para poder obtener las ecuaciones y simplificar las operaciones, el análisis se basa bajo las suposiciones recomendadas por **Mancebo (1987)**. Supóngase que un gasto fluye a través del conducto hasta el hidroariete con un desnivel S_r , a una velocidad constante, y en un instante dado, el flujo es interrumpido, lo que provoca un desbalance entre las fuerzas que componen el sistema dinámico. Un efecto de desaceleración se presenta inmediatamente en el frente de masa detenida, y por otro lado, debido a la inercia de la masa que sigue cursando de aguas arriba, provoca que ésta última choque, incorporándose por diferencial de presión a la cámara de aire. Estos efectos se pueden valorar mediante la segunda ley de **Newton**, aplicada en una dirección coincidente con el eje de la línea de conducción. A saber:

$$\sum F = ma \quad (5.3.10)$$

y dado que

$$m = \rho \nabla = \rho A_T L \quad (5.3.11)$$

donde:

ρ = densidad específica del agua, en Kgcm^{-3}

∇ = volumen de agua en la cámara, en m^3

A_T = área transversal de la cámara, en m^2

L = longitud de la tubería, en m

La desaceleración es la variación temporal de la velocidad

$$a = \frac{dV}{dt} \quad (5.3.12)$$

donde se ha utilizado la velocidad media en la tubería de alimentación, V (ms^{-1}),. Por tanto, el segundo miembro de la ecuación (5.3.10) queda

$$ma = \rho A_T L \frac{dV}{dt} \quad (5.3.13)$$

y debido a que el área de la tubería, A_T ,

$$ma = \rho L \frac{dQ}{dt} \quad (5.3.14)$$

donde

$$Q = A_T V \text{ gasto en la línea de conducción, } \text{m}^3\text{s}^{-1}$$

La desaceleración de la masa contenida en la línea de conducción se equilibra con las fuerzas de presión, de la componente de peso y de resistencia al flujo por fricción, que actúan sobre dicha masa. Las fuerzas de presión son:

$$F_1 - F_2 = p_1 A_T - p_2 A_T = \rho g H_i A_T - \rho g (H_a - z) A_T$$

$$F_1 - F_2 = \rho g A_T (H_i - H_a - z) \quad (5.3.15)$$

donde:

p = presión, en Nm^2

g = aceleración de la gravedad, en ms^{-2}

z = nivel de la oscilación (positiva hacia arriba) en m

El nivel del agua en la cámara tomará valores conforme la masa se desacelera, la componente del peso en la dirección del movimiento será

$$W_x = \rho g A_T L \text{ sen } \alpha$$

donde α es el ángulo que forma el eje de la tubería con la horizontal.

como $\text{sen } \alpha = (H_A - H_i)/L$,

$$W_x = \rho g A_T (H_A - H_i) \quad (5.3.16)$$

Por el momento, se omiten en el análisis las pérdidas locales y la carga de velocidad; únicamente se considerarán en el análisis las pérdidas por fricción que, y como se demostrará más adelante, las pérdidas de fricción son despreciables debido al tipo de material a utilizar. Otra pérdida de interés es la generada por el dispositivo o accesorio mecánico (válvula check ó de contraflujo, y placa con orificios). **Sotelo (1976)**, demostró que el esfuerzo cortante ,tiene solución con la ecuación de **Darcy-Weisbach**

$$F_R = \frac{\rho g A_T L f}{D_T 2g} V |V| \quad (5.3.17)$$

donde

F_R = pérdida por fricción, en m

f = coeficiente de fricción del material a utilizar, adimensional

D_T = diámetro interior del tubo, en m

y para la pérdida por accesorio, H_{f_A} , en m.

$$H_{f_A} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i V_1 |V_1|}{2g} \quad (5.3.18)$$

donde K_1 depende del tipo de válvula de flujo unidireccional, K_2 de la geometría de los orificios, K_3 de la forma geometría de la cámara; y V_1

obedece a los diferentes cambios que pueda sufrir la velocidad de un accesorio a otro.

Al agrupar las fuerzas de presión (5.3.15), la de peso (5.3.16), la de fricción (5.3.17) y la de pérdida por accesorio (5.3.18) se tiene

$$\sum F = \rho g A_T (H_i - H_A - z) + \rho g A_T (H_A - H_j) - \frac{\rho g A_T L f}{D_T 2g} V|V| - H_{f_A}$$

Igualando con la ecuación (5.3.10) y dividiendo entre $\rho g A_T$

$$(H_i - H_A - z) + (H_A - H_j) - \frac{L f}{D_T 2g} V|V| - \frac{H_{f_A}}{\rho A_T} = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt}$$

Al simplificar y reordenar, resulta

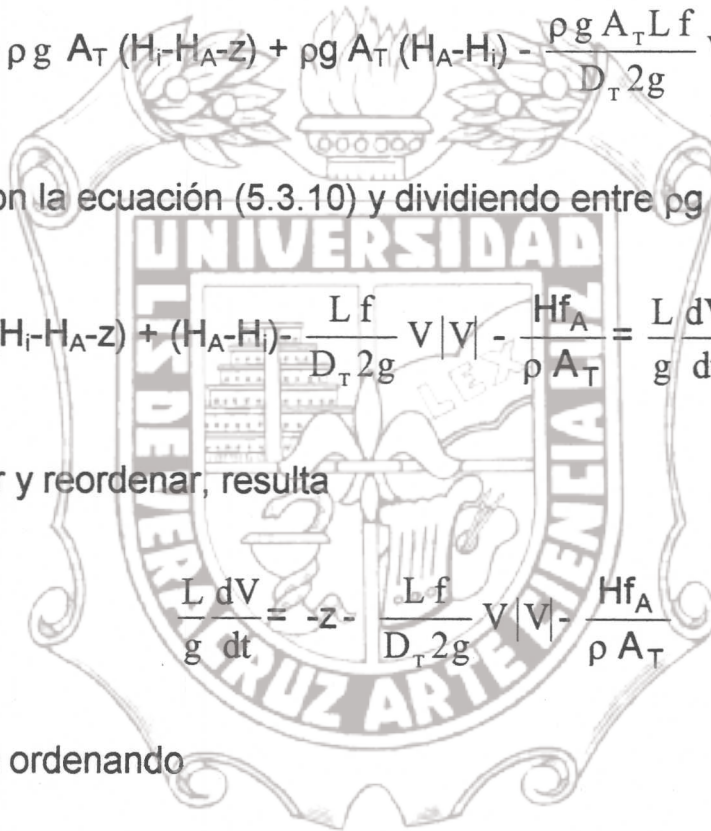
$$\frac{L}{g} \frac{dV}{dt} = -z - \frac{L f}{D_T 2g} V|V| - \frac{H_{f_A}}{\rho A_T}$$

nuevamente ordenando

$$\frac{L}{g} \frac{dV}{dt} + z + \frac{L f}{D_T 2g} V|V| + \frac{H_{f_A}}{\rho A_T} = 0$$

y dado que se trabajará con el material plástico (PVC, **cloruro de Polivinilo**), la fricción ($f = 0.009$) es despreciable. por lo que

$$\frac{L}{g} \frac{dV}{dt} + z + \frac{H_{f_A}}{\rho A_T} = 0 \quad (5.3.19)$$



5.3.2.2 Ecuación de Continuidad

Para obtener la ecuación de continuidad, se hace un balance de gastos en el nodo donde se unen la cámara de aire y la tubería de presión.

$$Q + Q_C = Q_H \quad (5.3.20)$$

donde

Q = gasto en la línea de conducción, en $m^3 s^{-1}$

Q_C = gasto en la cámara, en $m^3 s^{-1}$

Q_H = gasto por la tubería a través del
hidroariete, $m^3 s^{-1}$

Se sabe

$$VA + \frac{dC_w}{dt} = Q_H \quad (5.3.21)$$

donde C_w es el volumen de agua contenido por la cámara.

El proceso de compresión y expansión del aire de la cámara se puede considerar como intermedio entre un proceso adiabático y otro isotérmico de tal manera que la relación entre la carga de presión absoluta H_A^* en la cámara y el volumen C del aire dentro de la misma, se puede expresar como:

$$H_A^* C^{1.2} = cte \quad (5.3.22)$$

Atendiendo a las hipótesis de (**Mancebo,1987**), se propone considerar que $\frac{dH_A}{dt} = \frac{dz}{dt}$, sea la solución análoga del tirante dentro de la cámara, como una primera aproximación para poder determinar el período de onda durante la primera pulsación

Recordando que

$$C + C_w = C_C \quad (5.3.23)$$

donde

C = volumen de aire en la cámara, m^3

C_w = volumen de agua en la cámara, m^3

C_C = volumen de agua total

Derivando (5.3.22) y (5.3.23), y en vez de considerar a $\left(\frac{C}{1.2 H_A^*}\right)$ constante como lo considera **Mancebo (1987)**, proponemos que la presión y el volumen en la cámara siga un comportamiento lineal como primera aproximación (**Muñoz, 1998; comunicación personal**) y sustituyendo en (5.3.21), obtenemos

$$\left(\frac{C}{1.2 H_A^*}\right) = (C_0 + C_1 t), \text{ primera aproximación}$$

$$AV + (C_o + C_1t) \frac{dz}{dt} = Q_H \quad (5.3.24)$$

derivando (5.3.24) con respecto al tiempo y ordenando en función de $\frac{dV}{dt}$ para sustituirlo en (5.3.20), tenemos:

$$A \frac{dV}{dt} + (C_o + C_1t) \frac{d^2z}{dt^2} + (C_1) \frac{dz}{dt} = 0$$

dividiendo entre $C_o + C_1t$, resulta

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{A} \left(C_1 \frac{dz}{dt} + (C_o + C_1t) \frac{d^2z}{dt^2} \right)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \left(\frac{C_1}{C_o + C_1t} \right) \frac{dz}{dt} = -\frac{A}{(C_o + C_1t)} \frac{dV}{dt}$$

Utilizando ahora la ecuación dinámica,

$$\frac{dV}{dt} = \left(\frac{Hf_a}{\rho A_T g} - z \right) \frac{g}{L}, \text{ queda ahora}$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{C_1}{C_o + C_1t} \frac{dz}{dt} = \frac{Ag}{L(C_o + C_1t)} \left(\frac{Hf_a}{\rho A_T g} + z \right)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{C_1}{C_o + C_1t} \frac{dz}{dt} - \frac{Ag}{L(C_o + C_1t)} z = \left(\frac{Hf_a}{\rho L(C_o + C_1t)} \right) \quad (5.3.25)$$

Ecuación diferencial que interpreta el funcionamiento de la cámara.

5.3.2.3 Gasto elevado

Para poder obtener el gasto entregado utilizamos la ecuación de descarga a través de un orificio:

$$Q = CdA\sqrt{2gz}, \quad \text{para gastos que depende del tirante} \quad (5.3.26)$$

y

$$Q = CdA\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}, \quad \text{para gastos que depende de la presión} \quad (5.3.27)$$

donde:

Q = gasto volumétrico, m^3s^{-1}

Cd = coeficiente de descarga, adimensional

A = área de la válvula, m^2

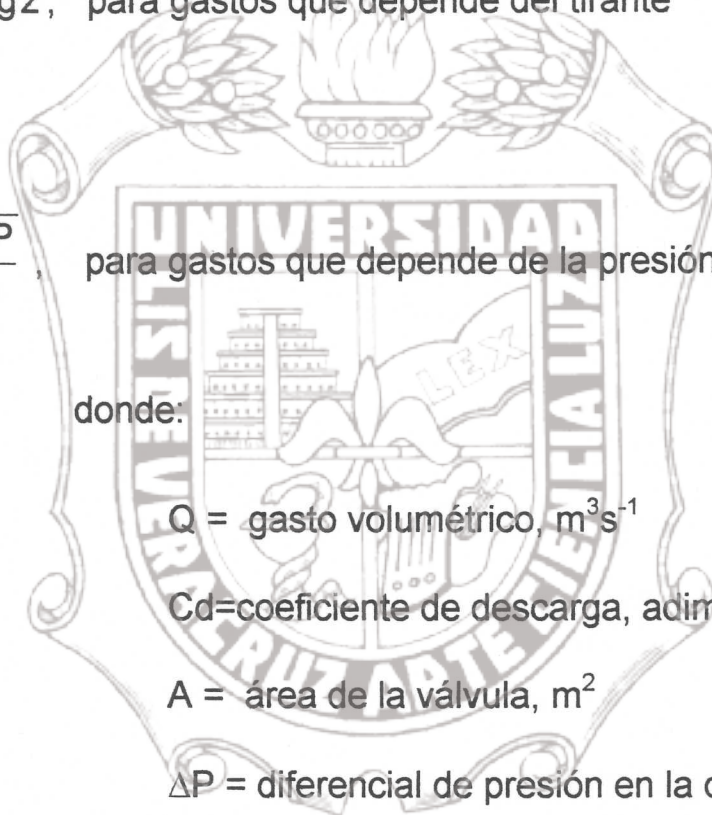
ΔP = diferencial de presión en la cámara, en Pa.

z = tirante dentro de la cámara, en m.

ρ = densidad específica del agua, en $Kgcm^{-3}$

g = gravedad, ms^{-2}

La ecuación diferencial que proporciona la dinámica del gasto a través del orificio de la cámara de aire, es:



$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (5.3.28)$$

Derivando la ecuación (5.3.26) ,y (5.3.27) con respecto al tiempo, y sustituyéndola en la ecuación (5.3.28), tenemos

$$\frac{\partial Q}{\partial z} = \frac{CdA\sqrt{2g}}{2\sqrt{z}} = \frac{k_1}{\sqrt{z}} \quad (5.3.29)$$

donde:

$$k_1 = CdA \sqrt{2g}/2$$

$$\frac{\partial Q}{\partial P} = \frac{CdA\sqrt{\frac{2}{\rho}}}{2\sqrt{P}} = \frac{k_2}{\sqrt{P}} \quad (5.3.30)$$

donde

$$k_2 = CdA \sqrt{\frac{2}{\rho}}/2$$

Agrupando las ecuaciones (5.3.29) y (5.3.30), tenemos:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{k_1}{\sqrt{z}} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{k_2}{\sqrt{P}} \frac{\partial P}{\partial t} \quad (5.3.31)$$

Ecuación diferencial que modela el gasto en la cámara durante las dos fases del golpe de ariete dentro de la cámara.

5.4 Parámetros de Diseño

Aún cuando la naturaleza de la geometría del diseño contempla diferencias significativas; es importante ,señalar y destacar los aspectos más pragmáticos de los parámetros que se distinguen en la operación del hidrosariete metálico convencional; para que en su momento, al hacer una referencia análoga, nos permita comparar y emitir juicios críticos. Si bien es cierto, el trabajo no persigue un análisis comparativo; pretende que en algunos de sus parámetros, se profundice su aspecto teórico.

5.4.1 Tubería de Alimentación.

Ésta mantiene una estrecha relación empírica entre la longitud (L) y el diámetro (D) óptimo de la tubería. (Ver Figura 5.2.1; L, h, Hd). **[Calvert (1958); citado por Aragón (1989)]** Sugiere que la longitud del tubo alimentador debe ser igual a:

$$L = (h + 0.6096) (H_d - h) / h \quad (5.4.1)$$

donde:

L= Longitud de la tubería de alimentación, m

h= Altura de alimentación, en m

Hd = Altura de entrega, en m

Esta longitud permitirá un funcionamiento óptimo del ariete y L nunca debe ser menor que 5 h. El diámetro del tubo de entrega [*Boegehold (1941); citado por Aragón (1989)*] se basa en la siguiente ecuación:

$$D = 53.5 (Q_s) \quad (5.4.2)$$

donde:

D = diámetro del tubo de entrega, en cm

Q_s = gasto de alimentación (l s⁻¹)

[*Stevens-Guille y Watt (1978); citado por Aragón (1989)*] subrayaron la importancia de construir los hidroarrietes de fierro y de preferencia el grosor de la pared debe ser grande. Si el tubo de alimentación es de material plástico se deformará al momento de cerrar la válvula de impulso y se perderá la energía de golpe resultando en una eficiencia muy baja, además, puntualiza , que los tubos de alimentación hechos **de plásticos**, cemento o plomo no **sirven** debido a su elasticidad.

5.4.2 Válvula de impulso.

Varios autores sugieren que las características deseables que deben presentar son:

- I. Que sea capaz de cerrarse rápidamente.
- II. Que presente la posibilidad de ajustar tanto la resistencia como su desplazamiento vertical.

El parámetro V (velocidad de cierre de la válvula) es variado por cambios en la resistencia al cierre de la válvula y con ello se introduce variaciones en la geometría de la instalación. La frecuencia de operación de la válvula de impulso puede ajustarse con cambios en el peso sobre ella o en su carrera. La frecuencia no puede ser más que el tiempo necesario para que la onda de presión creada por el golpe de ariete recorra el tubo de alimentación y se disipe en su extremo abierto. El tiempo (t) para que llegue la onda es :

$$t = L/a \quad (5.4.3)$$

donde

L = longitud del tubo de alimentación (m)

a = La velocidad de onda de presión,
 mseg^{-1}

[*Molineux (1960); citado por Aragón (1989)*], menciona que la eficiencia varia inversamente con la longitud de la carrera y el peso de la válvula y la longitud de la carrera. Pero en términos generales se puede decir que un peso grande y una carrera larga permiten flujos mayores por la válvula, produciendo un golpe más fuerte que permite el bombeo del agua a distancias mayores, mientras que un peso pequeño y una carrera corta permiten mayor entrega de agua a alturas menores. En las Figuras (5.4.1) (5.4.2) y (5.4.3), se presentan algunos ejemplos típicos de válvulas de impulso.

5.4.3 Cámara de aire.

La cámara de aire contiene a éste como medio elástico el cual es necesario para mantener un flujo constante en la entrega.

En la práctica el volumen de ésta cámara es aproximadamente igual al volumen de la tubería de entrega; esto tiene como inconveniente el exagerado tamaño que requiere, pero debe acercarse lo más posible a este volumen. [*De Parres, (1966) y de Calvert (1963), citado por Aragón 1987; Molyneux, (1960); Palicio, (1989)*],

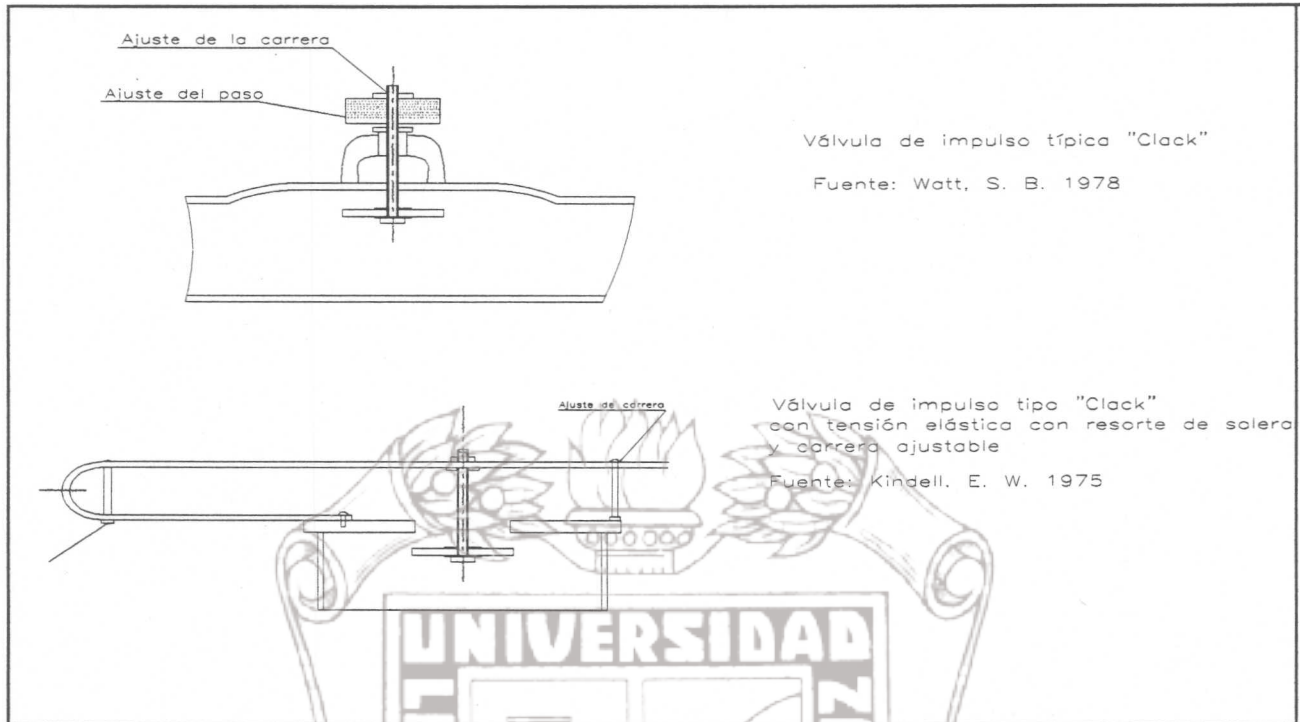


Figura 5.4.1. Válvulas de impulso tipo Clack

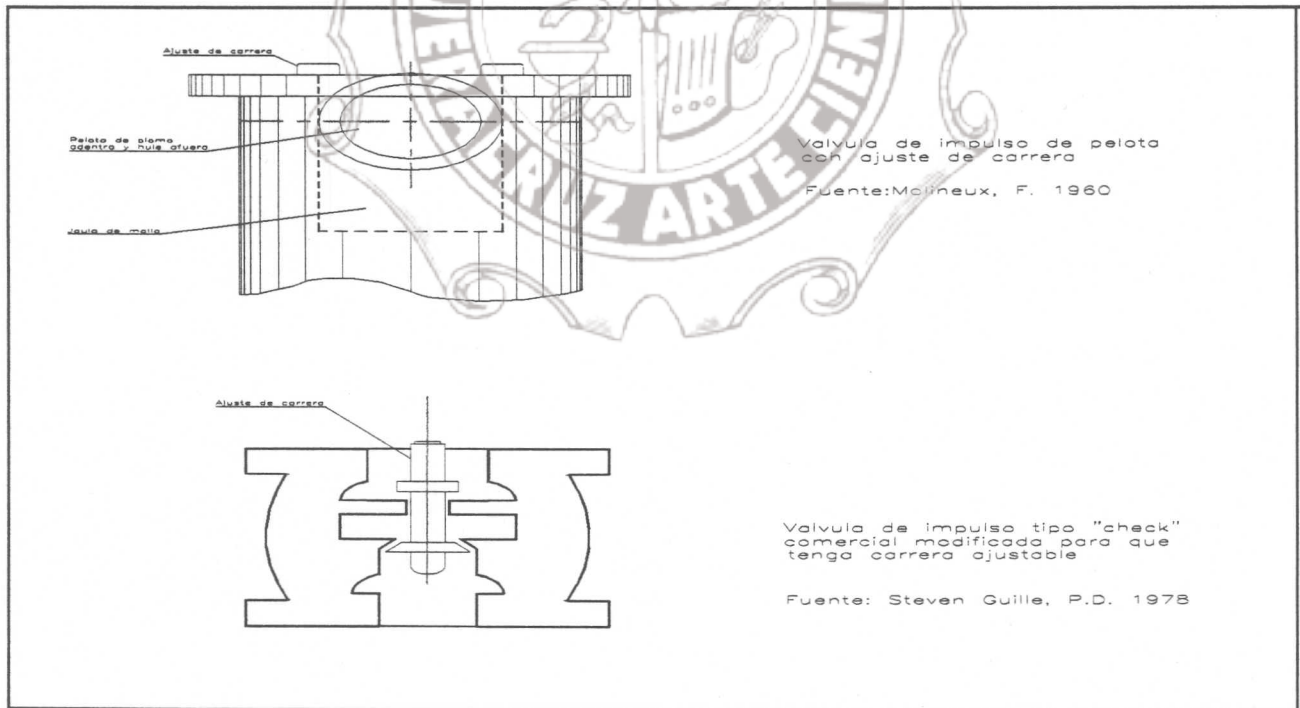


Figura 5.4.2. Válvulas de impulso tipo Pelota y Check

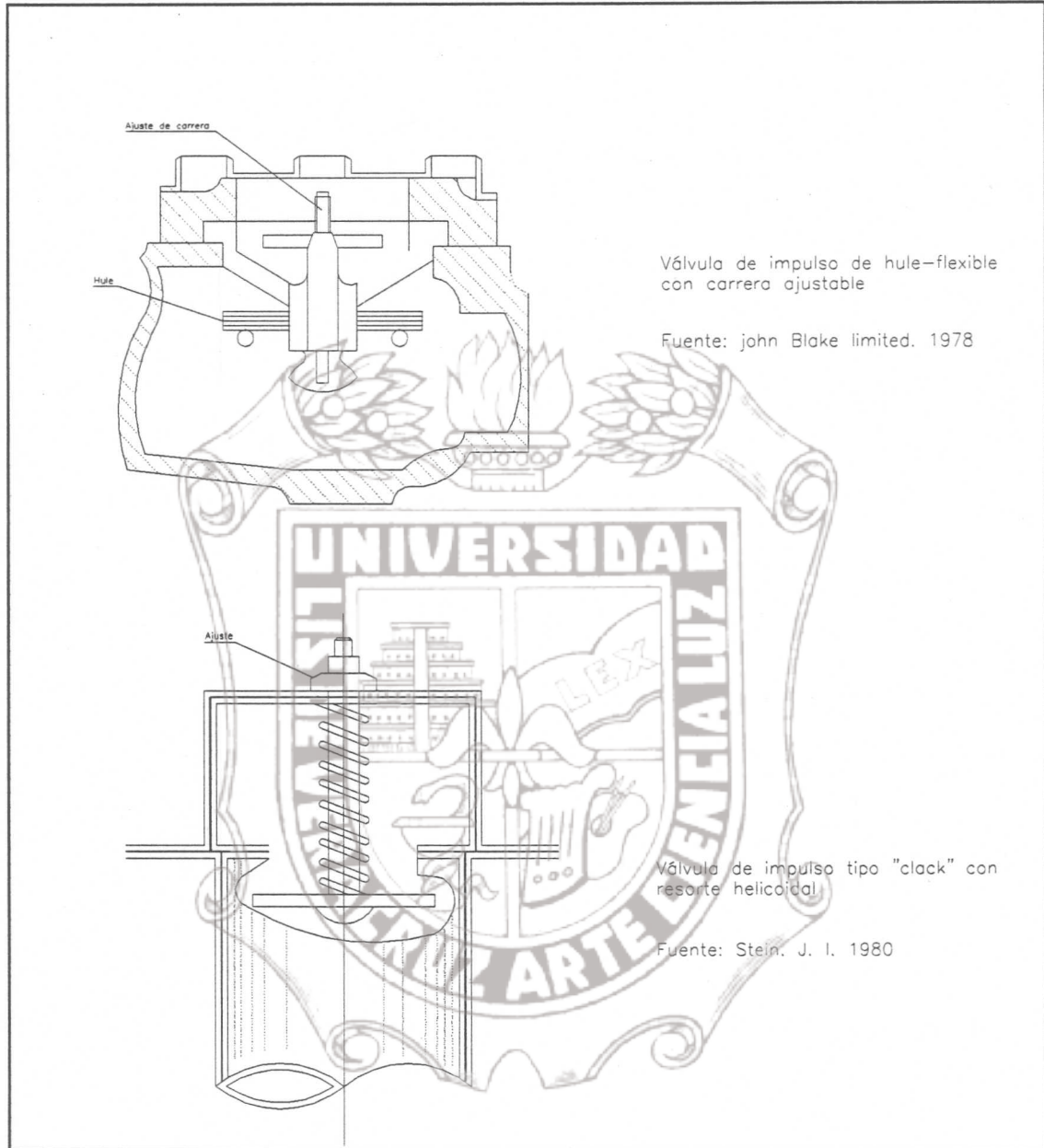


Figura 5.4.3. Válvulas de impulso tipo "Clack" y de Carrera ajustable

5.4.4 Gasto elevado. Ariete Hidráulico Goulds.

Algunas firmas comerciales han puesto interés en el gasto de entrega, entre ellas, la empresa, **Goulds**, ha establecido una formula empírica para poder determinar el gasto entregado; claro esta, ésta establece una aproximación bastante modesta sobre la cantidad real de entrega. Esta se aplica para relaciones (Hd/h) de 9:1.

$$Q_d = \frac{1800 Q_s h}{H_d} \quad (5.4.4)$$

donde

Q_d = Gasto de entrega, en $l h^{-1}$

Q_s = gasto de alimentación, en $l s^{-1}$.

h = altura de alimentación, en m

H_d = altura de entrega, en m.

En virtud de que en cada ciclo de ariete se pierde una pequeña cantidad de aire con el agua bombeada, por ello se requiere una pequeña entrada, debajo de la válvula de entrega a través de un orificio. El aire entra en el período V (cinco) y III (tres) del ciclo de operación (Ver sección 5.2.1, Figura. 5.2.2); cuando el ariete está bombeando agua, descarga una pequeña cantidad de agua a presión.

Cada vez que la válvula de aire (orificio) renueva éste en la cámara, se asegura que ésta no se llene de agua creando condiciones que rompan el ariete puro; es decir, la máxima sobrepresión es amortiguada durante la compresión; ya que el agua en este caso es prácticamente incompresible.

No existe información del tamaño del orificio, la experiencia ha mostrado que un orificio cuyo diámetro sea 1.5875 E-3 m (1/16") aproximadamente, reúne las condiciones para admitir un gasto másico que mantenga en operación sucesiva al ariete; a diámetros mayores, se ha observado que la máquina deja de operar.

5.4.5 Tubería de Descarga.

El agua que entrega la bomba de ariete generalmente es llevada a gran distancia (tanto vertical como horizontalmente), y el incremento de pérdidas por fricción demandan más trabajo del ariete. Para compensar las pérdidas se recomienda utilizar polímeros ya sea de baja o alta densidad, se distinguen los plásticos por su bajo factor de fricción, de fácil manejo y adaptabilidad al contorno del terreno.

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

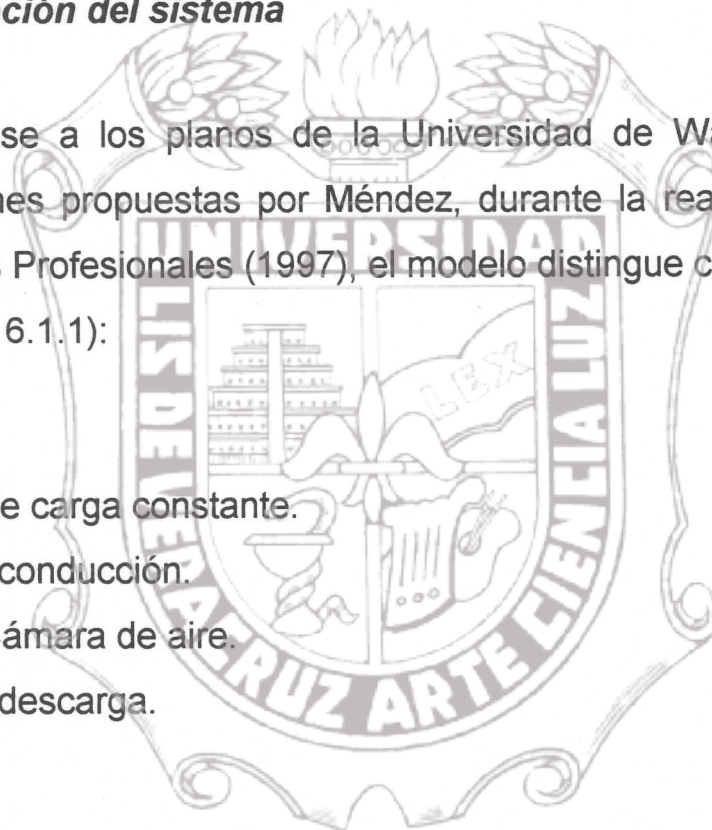
6 Evaluación del hidroariete

DTU-P4

6.1 Descripción del sistema

En base a los planos de la Universidad de Warwick, y a las modificaciones propuestas por Méndez, durante la realización de sus Residencias Profesionales (1997), el modelo distingue cuatro partes (Ver Figura 6.1.1):

- a) Tanque de carga constante.
- b) Línea de conducción.
- c) Cuerpo-Cámara de aire.
- d) Línea de descarga.



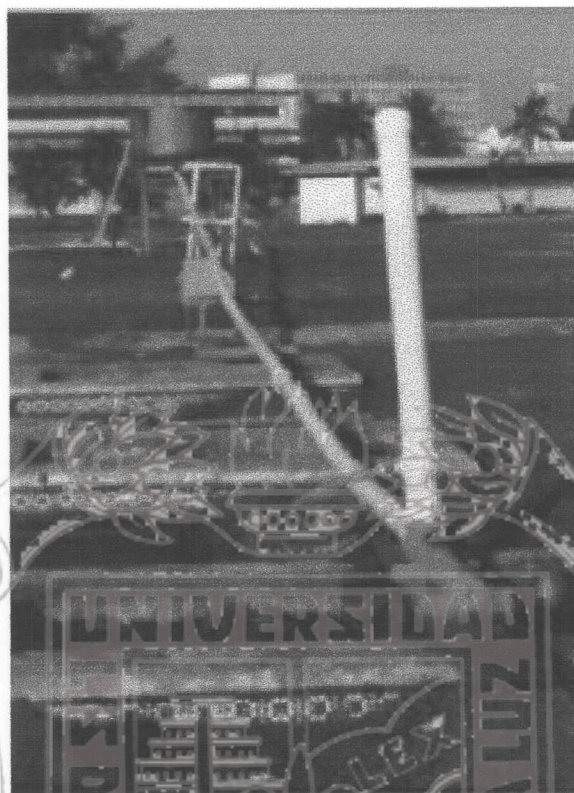


Figura 6.1.1 Descripción del sistema

Tanque de carga constante.

El proyecto consistió de un tanque metálico de 1.3 m^3 apoyado sobre una estructura metálica armada con una cota $+2.70 \text{ m}$ Para mantener la carga constante se utilizaron dos bombas de 4 HP de potencia las cuales trabajan en serie para mantener un gasto constante de 319 lmin^{-1} .

Línea de conducción.

La línea comprendió 30 m de tubería de PVC RD-26 de 0.10 m (4") de diámetro, con una inclinación de trabajo 0.3/30. Se utilizaron 4 coples y un codo de 90° del mismo diámetro.

Cuerpo-Cámara de aire.

Por razones de seguridad y como primer ensayo para el cuerpo se utilizó tubo de fierro galvanizado de 0.10 m (4") cédula 40, con una longitud de 0.760 m y ciego al final de éste. Se hicieron 6 ventanas de 0.07 X 0.04 m, distribuidos longitudinalmente. Uno de los extremos contó con una "T" del mismo material, cuya característica que en uno de sus extremos se adicionó un niple de 0.10 X 0.10 m de cuerda corrida, en cuyo interior se soldó una placa metálica del mismo diámetro con 76 orificios de 0.0047 m (3/16"). Es importante destacar un orificio de 0.00158 m (1/16", Ver sección 5.2.1.) en la pared del niple y por debajo de la placa. (Ver dibujos (9.1) y (9.2) del Apéndice A).

Para asegurar lecturas de la compresión del agua, se adaptó un manómetro en la pared de la "T", inicializado por un acordeón de tubería de cobre de 0.3124 m de diámetro (5/32 ") llamado comúnmente "cola de cochino" , con el fin de amortiguar a lo más el golpe de ariete y poder leer las lecturas del manómetro; aguas arriba, está conectado a la línea de conducción.

Con respecto a la cámara de aire, ésta fue hecha de tubo de PVC RD-26 de 0.1 m (4") de diámetro y 1.30 m de longitud, erigido verticalmente, en uno de los extremos se acopló un tapón ciego del mismo diámetro y material, en cuyo centro se colocó otro manómetro analógico. El extremo opuesto se le unió un adaptador hembra del mismo diámetro, próximo a él a una distancia de 0.2 m se le incorporó una hidrotoma de 0.10 m de diámetro con una salida de 0.0254 m (1").

A la misma altura de la hidrotoma y en extremo opuesto se horadó un orificio para acoplar por un lado una mirilla de manguera que recorre longitudinalmente una distancia de 1.2 m para finalizar en el extremo opuesto de la cámara. Con el fin de establecer visualmente las lecturas de oscilación del tirante (nivel) de agua dentro de la cámara. Finalmente la cámara se asienta a través del niple en uno de los extremos de la "T". (Ver dibujo 9.3 del Apéndice A)

Cabe destacar que el prototipo a evaluar se distingue de los tradicionales porque los primeros trabajan a base de dos válvulas de retención de flujo encontrados en el cuerpo en posiciones inversas (Ver Figura 5.2.1; G y C).

El modelo DTU-P4 innova el utilizar una media caña de PVC cortada longitudinalmente cuya longitud puede variar ,al menos 0.5 m, y empotrada en cantilever. Para asegurar su funcionamiento a la par del fenómeno es necesario contar con un contrapeso en uno de los

extremos de la media caña. Literalmente a la media caña se le conoce por traducción como "lengua".(Ver dibujo 9.4 del Apéndice A).

Línea de descarga.

La línea de descarga puede utilizarse entre diferentes materiales que pueden ser desde manguera de plástico hasta tubería metálicas. El proyecto contempló una línea de 50 m de manguera de plástico para riego de jardinería, interconectados con coples de conexión rápida. La línea opera a través de una válvula de compuerta de 0.0254 m (1") roscable a la hidrotoma. (Ver Apéndice C)

6.2 Metodología

6.2.1 Funcionamiento del sistema.

Para el arranque del sistema, se garantizó un gasto de 319 lmin^{-1} . que se consiguió a través del tanque de carga constante con las dos bombas operando simultáneamente. El flujo obedeció inicialmente a las leyes de flujo permanente. El frente de masa al ingresar al cuerpo de la bomba, en primera instancia se bifurca en el frente de la lengua, una parte continua por debajo de ella hasta alcanzar el frente ciego del cuerpo.

La segunda parte se proyecta por arriba de la lengua desembocando a través de las 6 ventanas. En el instante que el flujo regresa debido a su choque inicial, el nivel por debajo de la lengua se incrementa hasta que alcanza a rasar la punta de la lengua, que debido

a la carga cinética que lleva el flujo en su ascenso, levanta inmediatamente la lengua (en ese instante el área de descarga comienza a disminuir y el golpe de ariete se presenta), obturando las 6 ventanas. Ver Figuras 6.2.1 y 6.2.2

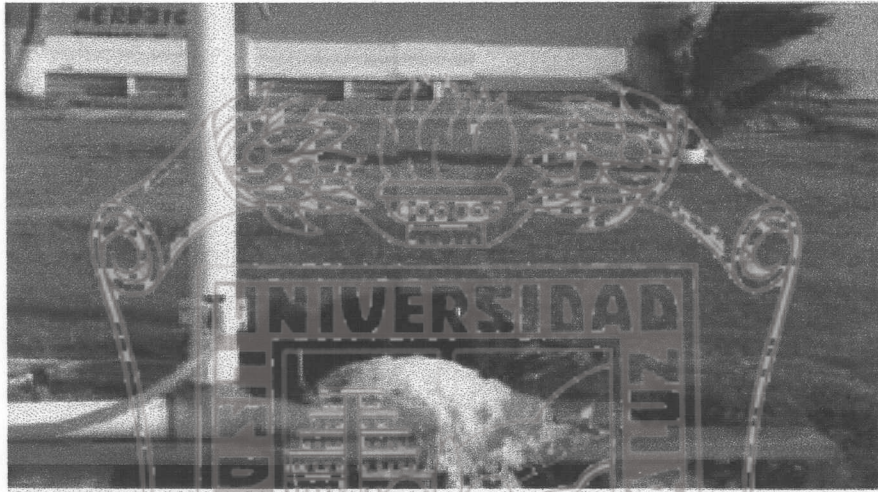


Figura 6.2.1 Vista del flujo a través de las 6 ventanas



Figura 6.2.2 Vista del momento del golpe de ariete cuando las 6 ventanas son obturadas

Un frente de onda de presión comienza a aparecer viajando aguas arriba; sin embargo, ésta choca con la inercia de la que viene descendiendo de aguas arriba; un incremento de presión se presenta en ese instante, el agua, por diferencia de presión, se introduce a la cámara de aire, con una duración igual a la que utilice el frente para viajar y regresar de aguas arriba. Una vez que el flujo atraviesa la placa metálica con orificios, esto permite generar una serie de chorros o "jets" que impulsan al flujo a una velocidad tal, que logre vencer a la válvula de retención de flujo unidireccional (check). Durante este lapso se le conoce como fase directa de golpe de ariete.

Mientras que el agua se introduce a la cámara, un gasto másico de aire debe garantizar su presencia para que, tanto el agua como el aire formen una doble fase, el primero se comprime bajo las leyes de gases ideales, el segundo, es incompresible; en consecuencia, al comportamiento de ambos, se cumple el fenómeno de recipiente a presión. Una parte de flujo comienza a entregarse una vez que alcance una altura de 0.20 m donde se encuentra localizada la hidrotoma con su válvula de compuerta.

Al término de la fase directa del golpe de ariete, el fenómeno contempla una fase inversa, cuya característica es el vacío, su duración es igual al de su antecesor. Este segundo período la masa de agua se comprime y viaja en sentido opuesto al flujo original. Al no existir suficiente presión en la lengua, y para garantizar que ésta caiga inmediatamente, un peso de masa conocido (0.890 Kg), es adicionado

en la punta de la lengua. *En su viaje de regreso de la fase inversa, el fenómeno de golpe de ariete desaparece en el momento que el frente de onda no vuelve encontrar el área obturada (el período, conocido por sus anteriores modelos de arietes metálicos, no se cumple, ya existe un diferencial de tiempo que ocupa el agua en volver a recorrer toda su longitud, convirtiéndose en un cuasiperíodo);* en ese instante, se logra conseguir la máxima descarga por parte de la cámara de aire ya que en ese momento la válvula check se encuentra en su posición inicial (cerrada por la acción del vacío). Recordemos que el peso obliga a caer la lengua al no haber una fuerza igual en dirección contraria. Ver Figura (6.2.3)

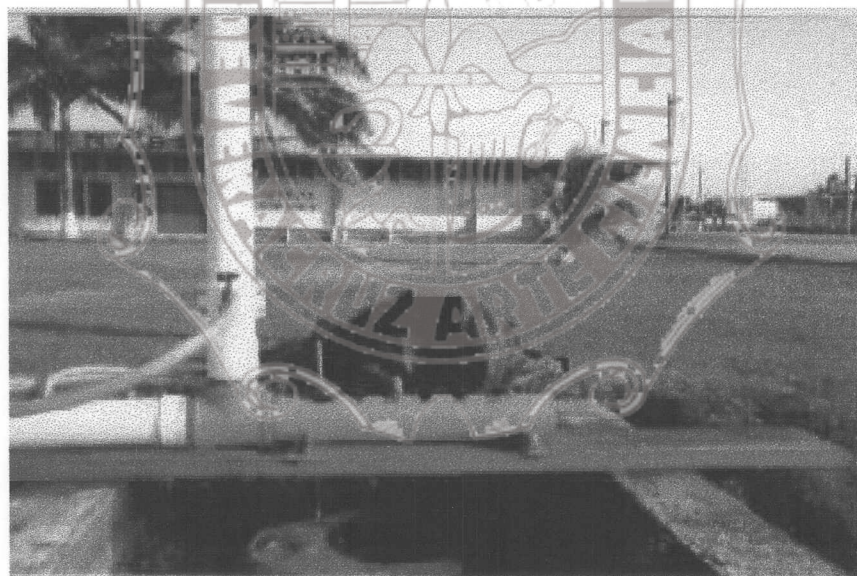


Figura 6.2.3 Momento que muestra el peso en su fase de nueva compresión

Entonces toda la energía elástica desaparece y sólo la energía potencial y cinética contribuyen a la dinámica del sistema. Y nuevamente el ciclo comienza a aparecer.

El período por registrar, aparecerá en función de la respuesta de impulso de la lengua; es decir, dependiendo del peso y de la distancia a la que se encuentre, con respecto al diámetro del tubo (cuerpo), de la velocidad a flujo permanente que se presente, la longitud de la línea de alimentación, y del diámetro de la descarga.

6.3 *Análisis Dimensional*

Con el fin de establecer las unidades que correspondan a cada parámetro, es necesario confirmar la homogeneidad de las dimensiones. Para tal efecto se comprueba utilizando el Teorema de *Buckingham*..

De la ecuación (5.3.26)

$$Cd, Q, h, A, g = A^{X_1}, g^{Y_1}, h^{Z_1}, Q$$

$$(L^2)^{X_1} (LT^{-2})^{Y_1} (L)^{Z_1} (L^3 T^{-1}) = M^0 L^0 T^0$$

$$L : 2X_1 + Y_1 + Z_1 + 3 = 0$$

$$M : 0 + 0 + 0 + 0 = 0$$

$$T : 0 - 2Y_1 + 0 - 1 = 0$$

$$X_1 = -1, Y_1 = -0.5, Z_1 = -0.5$$

$$\frac{Q}{A\sqrt{g}\sqrt{h}} \Rightarrow Q = A\sqrt{gh} \Rightarrow Q = CdA\sqrt{gh}$$

$$Q = \frac{L^2}{1} \frac{L^{0.5}}{T} \frac{L^{0.5}}{1} = \frac{L^3}{T}$$

Así mismo para la ecuación (5.3.27), desarrollamos

$$Cd, Q, \Delta P, \rho, A, = \Delta P^{X_1}, A^{Y_1}, \rho^{Z_1}, Q$$

$$(ML^{-1}T^{-2})^{X_1} (L^2)^{Y_1} (ML^{-3})^{Z_1} L^3 T^{-1} = M^0 L^0 T^0$$

$$L : -X_1 + 2Y_1 - 3Z_1 + 3 = 0$$

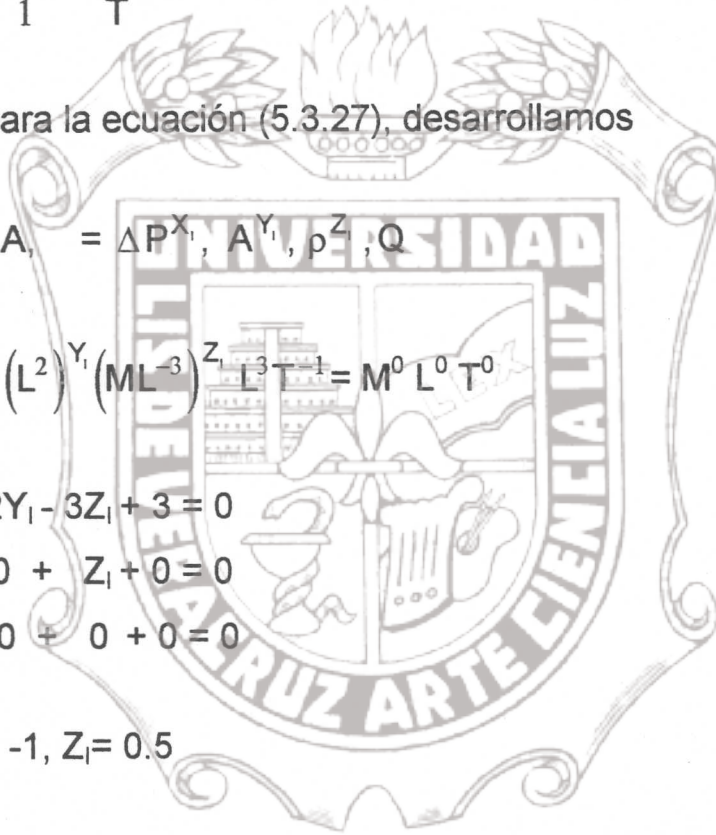
$$M : X_1 + 0 + Z_1 + 0 = 0$$

$$T : -2X_1 + 0 + 0 + 0 = 0$$

$$X_1 = -0.5, Y_1 = -1, Z_1 = 0.5$$

$$\frac{Q\sqrt{\rho}}{\sqrt{\Delta P}A} \Rightarrow Q = \frac{\sqrt{\Delta P}A}{\sqrt{\rho}} \Rightarrow Q = CdA\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

$$Q = \frac{L^2 M^{0.5} L^{1.5}}{M^{0.5} L^{0.5} T} = \frac{L^3}{T}$$



7 Resultados y Discusión

7.1 Cálculo de carga, gasto y presión analíticamente

Para desarrollar los cálculos de carga con la que el equipo puede trabajar, fue necesario conocer la cantidad de agua de alimentación que se estuvo consumiendo (energía suministrada) en el sistema; sin embargo, éste se verá modificado por la posición que guarde el peso en el cuerpo. (Ver sección 5.4.2).

El equipo operando en carrera máxima consumió 319 lmin^{-1} , aplicando la ecuación (7.1.1), podemos conocer la velocidad a flujo permanente con la que el agua viajó a través de la tubería

$$Q = V A \quad (7.1.1)$$

donde:

Q = gasto volumétrico, en m^3s^{-1}

V = velocidad del flujo, en ms^{-1}

A = área, en m^2

por lo tanto

$$Q = 5.317 \text{ E } -03 \text{ m}^3\text{s}^{-1} \text{ (319 lmin}^{-1}\text{)}$$

$$A = (\pi d) / 4 = (3.14149 * 0.10325) = 8.11 \text{ E } -3 \text{ m}^2$$

$$V = 0.656 \text{ ms}^{-1}$$

Con la velocidad con que viaja el agua, debemos calcular la sobrepresión creada por el fenómeno de golpe de ariete, mediante la ecuación (5.3.2) de Jowkosky ; pero primero, es necesario conocer la celeridad de onda, con la ecuación (5.3.9)

$$a = \frac{1482}{\sqrt{1 + \frac{2.06 \text{ E } 8 * 10.5}{2.81 \text{ E } 8 * .44}}} = 331 \text{ ms}^{-1}, \text{ de donde } \sqrt{\frac{2.24 \text{ E } 8}{101.94}} = 1482$$

ahora sustituyendo en la ecuación (5.3.2)

$$\Delta H = (331)(0.656)/(9.81)$$

$$\Delta H = 22.13 \text{ m}$$

7.2 Evidencias observadas durante el ciclo de operación.

Una vez conocido el valor máximo generado por el golpe de ariete, el equipo se ajustó a carrera máxima (0.05 m), mediana (0.04m) y mínima (0.03 m), respectivamente; para cada medición, se utilizó un cronómetro digital y un tanque volumétrico de 200 litros. Para cada prueba se registraron 3 réplicas para disminuir el error muestral. Los resultados mostraron los siguientes hechos:

1. Durante todo el ciclo se cumple:
 - a) La fase directa del golpe de ariete, caracterizado por el llenado de la cámara
 - b) La fase inversa del golpe de ariete, caracterizado por el vaciado de la cámara
2. Al arranque de la operación, presentó dos características:
 - c) Una fase inicial ó transitoria ,cuando la cámara está vacía, y posteriormente,
 - d) Una fase periódica, con la cámara ya cargada.
3. Durante la operación, el hidroariete presentó dos procesos de descarga:
 - e) Durante la compresión o fase directa del golpe de ariete
 - f) Durante la expansión o fase inversa del mismo

4. El período, en consecuencia, presentó también dos tiempos diferentes:
 - g) Un recorrido de 0.96 s, para el inciso a).
 - h) Un recorrido de 2.13 s, para el inciso b)

5. La frecuencia guardó una relación muy estrecha con respecto a la posición del peso para cada una de las pruebas; es decir, a carrera máxima, pasando por la mediana hasta la mínima, cuyos valores osciló entre los 19 y 26 pulsaciones por minuto.

6. Además, la frecuencia y el gasto se vio afectado por la aparición de la inercia en la segunda pulsación, Esto se debió a que durante la fase inversa de golpe de ariete, en términos de tiempo, la onda logra a realizar todo su ciclo, encontrándose con el inciso (a) del punto 1, aún trabajando, provocando que se detenga e inicie el inciso (b) del mismo punto, y una diferencia quede almacenada; ésta diferencia, disminuye la carga de la siguiente pulsación, y como consecuencia, el gasto también.

La explicación de los anteriores hechos, ponen de manifiesto que la cámara de aire trabaja como un dispositivo amortiguador; éste accesorio es el responsable que el período reportado en la ecuación (5.4.3), quede inoperante, ya que se prolonga al transitar por ésta, además del choque con la inercia de la masa contenida. Una revalorización es necesaria para poder determinar el periodo, y en

consecuencia, su frecuencia. Importante es, que al saber la frecuencia, se pueda determinar el número de golpes esperados por minuto.

Para obtener los datos referentes a la presión, tirante y gastos cuando la bomba opera, resolviendo la ecuación (5.3.31) utilizando el método de discretización, para todas las etapas. Los primeros resultados están mostrados en la tabla (7.1.1). En la gráfica 9.1 del Apéndice B, se representa la relación tirante-presión-gasto, durante la fase inicial del proceso (la cámara se encuentra vacía), la máxima sobrepresión alcanzada en la base de la cámara fue de 1.28 Kgcm^{-2} (equivalente a $128\,718.22 \text{ Pa}$) y fue amortiguado hasta alcanzar los 1.22 Kgcm^{-2} (equivalente a $123\,629 \text{ Pa}$., con referente al tirante, éste transitó libremente hasta alcanzar los 0.63 m . En los primeros 0.20 m no hubo descarga sino hasta que fuera superada la hidrotoma, cuyo valor fue 0.808 litros en 19.6 pulsaciones. Tanto la presión como el gasto se manifestaron durante 0.96 segundos, que duro la pulsación, como se muestra en punto 4 inciso (g) y en las graficas 9.2 y 9.3. del Apéndice B

Para la descarga, de acuerdo con lo expuesto en el punto 1 inciso (b), 2 inciso (d), 3 inciso (f) y 4 del inciso (h); y con los datos de la solución de la ecuación (5.3.31), la descarga verificó cambios en el tirante, éste descendió hasta los 0.48 m , la presión se desplomo desde 1.22 Kgcm^{-2} (equivalente a $123,650 \text{ Pa}$) hasta 0.6 Kgcm^{-2} (equivalente a $60,811 \text{ Pa}$), ambos contribuyeron en entregar alrededor de 1.29 litros

en una pulsación en un tiempo de 2.16 s, como puede verse en la tabla 7.1.2 y gráficas (9.4),(9.5) y (9.6).del Apéndice B.

Tabla 7.1.1. Datos obtenidos de la solución de la ecuación 5.3.31 que muestran la relación entre presión, tirante, gasto y tiempo, durante la fase inicial del proceso.

PRESIÓN (Pa)	TIRANTE (m)	GASTO (lmin ⁻¹)	TIEMPO (s)
*0	*0.002	*0.013	*0
128718	0.033	0.137	0.04
128464	0.065	0.225	0.09
128211	0.096	0.306	0.14
127957	0.128	0.381	0.19
127703	0.159	0.453	0.24
127449	0.191	0.524	0.28
127195	0.222	0.050	0.33
126942	0.254	0.116	0.38
126688	0.285	0.182	0.43
126434	0.317	0.248	0.48
126180	0.348	0.313	0.52
125926	0.380	0.377	0.57
125673	0.411	0.441	0.62
125419	0.443	0.505	0.67
125165	0.474	0.566	0.72
124911	0.506	0.630	0.76
124657	0.537	0.692	0.81
124404	0.569	0.754	0.86
124150	0.600	0.816	0.91
*123629	*0.632	*0.881	*0.96

* Los números en negro fueron los registrados en campo.

Tabla 7.1.2. Datos obtenidos de la solución de la ecuación 5.3.31 que muestran la relación entre presión, tirante, gasto y tiempo, durante la descarga de una pulsación.

PRESIÓN (Pa)	TIRANTE (m)	GASTO (lmin ⁻¹)	TIEMPO (s)
*123651	*0.632	*0.003	*0.96
118938	0.619	0.087	1.11
114225	0.607	0.172	1.27
109512	0.596	0.260	1.43
104799	0.585	0.349	1.59
100086	0.574	0.440	1.75
95373	0.562	0.533	1.91
90660	0.551	0.628	2.07
85947	0.540	0.726	2.23
81234	0.529	0.826	2.39
76521	0.517	0.929	2.53
71809	0.506	1.036	2.71
67096	0.495	1.145	2.87
62383	0.484	1.258	3.03
*60812	*0.480	*1.2971	*3.09

* Los números en negro fueron los registrados en campo

En la etapa de recarga, finaliza el punto 2 inciso (c) , se conserva la existencia de los punto 3 y 4, respectivamente. La frecuencia durante la carga complementa las 19.6 pulsaciones estimadas en un minuto. En esta etapa aparece lo explicado en el punto 6 acerca de la presencia de la inercia. Debido a esto, el tirante, recuperó una altura de 0.15 m para alcanzar nuevamente los 0.63 m.

Durante la pulsación; la presión en su punto más álgido 0.6 Kgcm^{-2} ($60,811 \text{ Pa}$) se mantuvo constante durante los primeros 0.19 s donde la masa fue retenida; una vez superada la inercia, la presión sólo alcanzó a llegar a los 1.22 Kgcm^{-2} ($125,681 \text{ Pa}$).

Durante el ciclo periódico, se mantuvo un gasto constante de 0.760 litros en 19.6 pulsaciones con un tiempo de 0.96 como lo marca el punto 4 inciso (g) y todo ello se manifiesta en la tabla 7.1.3 a través de las gráficas (9.7),(9.8) y (9.9) del Apéndice B

Observando la ecuación (5.3.31), pone de manifiesto como una primera solución, proyecta diferencias lineales, tanto para la presión y el tirante. Agrupando los resultados de las tres fases (fase inicial, descarga y carga, Ver gráficas desde la 9.1 hasta 9.9 del Apéndice B) y armándolas en función del tiempo; en consecuencia, la gráfica (9.10) del Apéndice B, evidencia la existencia de las fases transitoria y periódica, con respecto al tirante, durante todo el ciclo de operación; además ,distingue el período (descarga) y el semiperíodo (carga).

De igual manera que el análisis anterior, la presión fue interpretada bajo el mismo criterio, y en la gráfica (9.11) del Apéndice B, resume el ciclo de operación paralelo con el trabajo de la presión en función del tiempo a carrera máxima y 19 pulsaciones por minuto.

Tabla 7.1.3. Datos obtenidos de la solución de la ecuación 5.3.31 que muestran la relación entre presión, tirante, gasto y tiempo, durante la carga de una pulsación

PRESIÓN (Pa)	TIRANTE (m)	GASTO (lmin ⁻¹)	TIEMPO (s)
*62843	*0.480	*0.005	*3.09
65895	0.488	0.096	3.13
69127	0.495	0.185	3.18
72268	0.503	0.272	3.23
75410	0.510	0.351	3.28
78552	0.518	0.363	3.33
81694	0.525	0.375	3.37
84836	0.533	0.387	3.42
87978	0.540	0.398	3.47
91120	0.548	0.410	3.52
94262	0.555	0.421	3.57
97404	0.563	0.433	3.61
100546	0.570	0.444	3.66
103688	0.578	0.456	3.71
106830	0.585	0.467	3.76
109972	0.593	0.478	3.81
113114	0.600	0.489	3.85
116256	0.608	0.500	3.90
119398	0.615	0.511	3.95
122539	0.623	0.522	4.00
*125681	*0.630	*0.533	*4.05

* Los datos en negro fueron registrados en campo.

7.3 Evaluación de campo del Gasto-Carga Presión del Hidroariete DTU-P4.

Se presentan los datos obtenidos durante la realización de las pruebas en campo; se propuso que en el inicio de la tubería de descarga se le adaptara una válvula de compuerta y a diferentes porcentajes de abertura, simular cargas diferentes. Con los manómetros instalados se lograron obtener las lecturas para cada gasto correspondiente.

Cada una de las pruebas se hicieron para cada longitud de la carrera del vástago de la válvula de impulso. (carrera mínima, mediana y máxima). como puede verse en la tablas (7.3.1), (7.3.2) y (7.3.3), respectivamente.

De acuerdo con los datos de la tabla (7.3.1), vaciados en la gráfica (9.12) del Apéndice B, a carrera mínima, se establece la relación gasto-presión-porcentaje de abertura de la válvula; con dichas aberturas, se alcanzó a simular carga de 2.80 Kgcm^{-2} (equivalente a 28 m de columna de agua) para un gasto de 9.54 lmin^{-1} . En abertura máxima, la presión alcanzó lecturas de 1.30 Kgcm^{-2} (correspondiente a 13 m de agua). con un gasto de 31.80 lmin^{-1} .

Tabla 7.3.1. Datos obtenidos de la solución de la solución en campo de la bomba de ariete hidráulico DTU-P4 a carrera mínima.

% de abertura de la válvula.	Gasto ($l\text{min}^{-1}$)	Presión (kgcm^{-2})
9	9.54	2.80
18	20.67	1.60
27	27.83	1.45
32	29.02	1.40
36	30.21	1.35
46	31.03	1.35
55	31.03	1.30
64	31.21	1.30
73	31.80	1.30
82	31.80	1.25
91	31.80	1.25
100	31.80	1.30

Tabla 7.3.2 Datos obtenidos de la evaluación en campo de la bomba de ariete hidráulico DTU-P4 a carrera mediana.

% de abertura de la válvula.	Gasto ($l\text{min}^{-1}$)	Presión (kgcm^{-2})
9	8.74	3.10
11	12.72	3.10
14	15.90	2.15
18	22.26	2.10
27	31.80	2.00
36	33.39	1.95
46	35.78	1.90
55	35.78	1.80
64	35.78	1.50
73	36.58	1.50
82	36.58	1.40
91	36.58	1.40
100	36.58	1.40

Para el caso de la tabla (7.3.2), abarca valores típicos a carrera mediana. como lo demuestra la gráfica (9.13) del Apéndice B, donde el gasto se ve incrementado con respecto al anterior; éste alcanzo a entregar como mínimo 8.74 lmin^{-1} para una abertura equivalente a 28 m de columna de agua. El mejor gasto obtenido fue 36.73 lmin^{-1} con carga disponible de 14 m de agua.

Tabla 7.3.3 Datos obtenidos de la evaluación en campo de la bomba de ariete hidráulico DTU-P4 a carrera máxima.

% de abertura de la válvula.	Gasto (lmin^{-1})	Presión(kgcm^{-2})
9	7.95	3.50
11	15.90	3.20
14	19.08	2.50
18	27.03	1.80
23	31.00	1.65
27	31.64	1.40
36	36.58	1.30
46	36.73	1.28
55	37.37	1.25
64	38.00	1.25
73	38.17	1.22
82	38.17	1.22
91	38.17	1.22
100	38.17	1.22

Para finalizar, en la tabla (7.3.3), registró las lecturas para carrera máxima. Sin duda, fue la mejor opción de trabajo; con válvula completamente abierta, superó los 38 lmin^{-1} , para carga de 1.22 Kgcm^{-2}

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

(equivalente a 12.2 m de columna de agua). El hidroariete es capaz de levantar gasto másico de 7.95 lmin^{-1} hasta una altura de 35 m como lo evidencia la gráfica (9.14).del Apéndice B.

7.4 Pérdidas en el sistema.

Es importante recordar que en todo los sistemas e instalaciones hidráulicas siempre existen pérdidas de carga, y éstas son consecuencia de el tipo, forma, diámetro y longitud del material con que se está trabajando la velocidad del fluido que transportan, así como también por la cantidad de accesorios con los que cuenta el sistema. Para nuestro caso en particular, se mencionó que el sistema está compuesto en su mayoría de **cloruro de Polivinilo** (PVC), y las propiedades con las que cuenta este material.

Las pérdidas de carga en los sistemas hidráulicos generalmente se deben a accesorios o por la longitud y característica del medio por el cual son transportados, y están gobernadas bajo la siguientes fórmulas:

$$h = \frac{KV^2}{2g} \quad (7.4.1)$$

donde

K= valor adimensional que
representa la pérdida del accesorio,

V= velocidad del flujo en el accesorio y,

g= aceleración de la gravedad.

Para calcular las pérdidas de carga por longitud, utilizamos la fórmula propuesta por **Sotelo (1977)**:

$$h = f \frac{L V^2}{d 2g} \quad (7.4.2)$$

donde,

f = factor de fricción de la tubería, adimensional.

L = longitud de la tubería, en m

d = diámetro de la tubería, en m

Para calcular las pérdidas de carga en el sistema analizamos la trayectoria que sigue el flujo, donde encontramos que éste pasa por los siguientes puntos:

- 1) el tanque de alimentación en su descarga tiene una salida abocinada, donde el valor de K es de 0.05 (según **Giles, 1991**); la velocidad del agua a flujo permanente es de 0.656 ms^{-1} , sustituyendo estos valores en la ecuación (7.4.1) tenemos la pérdida local.

$$h_1 = \frac{(0.05)(0.656)^2}{(2)(9.81)} = 0.001 \text{ m}$$

- 2) Consecuentemente, el flujo llega a un codo de 90° de fierro galvanizado, donde K toma un valor de 0.51, por lo tanto:

$$h_2 = \frac{(0.51)(0.656)^2}{(2)(9.81)} = 0.011 \text{ m}$$

- 3) El agua saliendo del punto anterior se conduce a través de 30 metros de tubería de cloruro de Polivinilo PVC, donde su factor de fricción es de 0.009 (según datos técnicos del fabricante, Duralon®, Ver Apéndice C), ahora sustituyendo en la ecuación (7.4.2) tenemos que:

$$h_3 = \frac{(0.009)(30)(0.656)^2}{2(9.81)(0.1)} = 0.058 \text{ m}$$

- 4) El agua llega a una "T" de fierro galvanizado, que une la cámara de aire, al cuerpo de la bomba y a la tubería de alimentación, donde el valor de K toma un valor de 3 (según Sotelo) y sustituyendo en la ecuación (7.4.2) resulta.

$$h_4 = \frac{(3)(0.656)^2}{(2)(9.81)} = 0.065 \text{ m}$$

Sumando las pérdidas calculadas anteriormente se pueden conocer la pérdida total antes de la válvula de retención de flujo (check), h_T .

$$h_T = 0.001 + 0.011 + 0.058 + 0.065$$

$$h_T = 0.135 \text{ m}$$

Recordando que la máxima sobrepresión creada por el fenómeno de golpe de ariete es 22.36 m; agrupando las pérdidas calculadas para obtener la carga disponible

$$\Delta H - h_T = 22.36 - 0.135 = 22.22 \text{ m} \quad (7.4.3)$$

Las pérdidas locales de carga ocasionada por la válvula de retención de flujo y la placa de orificio fueron de 10 m de agua (1 kgcm^{-2}), se dedujeron experimentalmente, mediante caída de presión, a través de 2 manómetros colocados antes de éstos y por encima de ellos, cubriendo ambos la cámara de aire (sección 6.1, Ver dibujo 9.3 del Apéndice A); Ésta decisión se tomó porque los dispositivos hidráulicos utilizados, no son comerciales y no cuentan con certificación ASME.

Luego entonces, el flujo pasa a través de ésta válvula, llega a la cámara de aire para almacenarse dentro de ella y luego salir a través de una hidrotoma de 0.0254 m (1") de diámetro, con una salida abocinada. El flujo descargado fue de $0.00063 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (incluye fase de carga y descarga dentro de la cámara.), y aplicando la ecuación de gasto volumétrico tenemos que la velocidad del flujo en este punto fue de 0.313 ms^{-1} . así que las pérdidas en este punto son:

a) Pérdidas en la hidrotoma, donde $K = 0.05$.

$$h_a = \frac{(0.05)(0.313)^2}{(2)(9.81)} = 0.0002 \text{ m}$$

b) Después de pasar por la hidrotoma, el flujo atraviesa una válvula de compuerta de 0.0254 m (1") de diámetro, que presenta una caída de presión despreciable debido a su geometría interna (según datos técnicos de Urrea®, Ver Apéndice C). Posteriormente, el flujo es conducido a lo largo de 50 m de manguera de plástico para tubería de poliuretano con superficie interna lisa ($f=0.009$), donde las pérdidas correspondientes. fueron:

$$h_b = \frac{(0.009)(50)(0.313)^2}{2(9.81)(0.0254)} = 0.088 \text{ m}$$

c) Los coples de conexión rápida (serie 5600, tamaño -16, *Aeroquip®*) que se encuentran instalados a lo largo de la tubería de descarga no causan pérdida de carga, (según datos de tabla, Ver Apéndice C),

Sumando los datos de pérdidas totales de todo el sistema, tenemos:

$$h_{TT} = 0.0002 + 0.088 = 0.0882 \text{ m}$$

Podemos deducir que las pérdidas que existen en el sistema con respecto a los accesorios no afectan el proceso, por lo que es aceptable decir que son despreciables, a excepción de la placa con orificios (check).

Por lo tanto la carga disponible efectiva, sustraemos de la ecuación (7.4.3):

$$\Delta H = 22.22 - 0.0882 - 10 = 12.13 \text{ m de agua.}$$

7.5 Solución por medio de la interpolación de HERMITE

Para poder encontrar la ecuación que pueda explicar el funcionamiento de la cámara durante los dos procesos de carga y recarga, respectivamente, **Muñoz, comunicación personal**, sugirió que con los datos obtenidos de campo [Ver las tablas (7.1.1), (7.1.2) (7.1.3)] de las diferentes respuestas, transformarlos en una primera alternativa de solución para compararlos con la propuesta de la ecuación (5.3.31), para evidenciar el camino correcto de la dinámica de la cámara.

Como primer paso, se observa el fenómeno, el cual distingue dos fases bien delineadas, un proceso **transitorio**, caracterizado cuando la máquina responde a la fase directa del golpe (al inicio, la cámara se encuentra vacía, no existe inercia y en el llenado alcanza una mayor distancia), y finaliza ésta, cuando se cumple la fase inversa del golpe de ariete.

El segundo proceso, llamado **periódico**, presenta también ambas fases, pero ahora, con el efecto de la inercia; la carga y recarga de la

cámara obedece a pulsaciones periódicas durante el resto de operación de la máquina.

Ante los criterios previamente presentados, el polinomio de *Hermite*, es el método que mejor ajusta a la problemática presentada.

Tabla 7.5.1 Valores obtenidos del tirante a través del método de polinomio de Hermite

t(tiempo)	y(tirante)	1diferencia	2diferencia	3diferencia	4diferencia	5diferencia
0	0					
0.96	0.63	0.65625				
0.96	0.63	0	-0.684			
3.09	0.48	-0.0742	-0.0348	0.21		
3.09	0.48	0	0.0348	0.1873	-0.0574	
4.05	0.63	0.15625	0.1627	0.0414	0.00282	0.015

El polinomio interpolador será:

$$y(t) = 0 + 0.6563t - 0.684t(t - 0.96) + 0.21t(t - 0.96)^2 - 0.0574t(t - 0.96)^2(t - 3.09) + 0.015t(t - 0.96)^2(t - 3.09)^2.$$

Realizando operaciones algebraicas, obtenemos la función buscada:

$$y(t) = 0.015t^5 - 0.179t^4 + 0.835t^3 - 1.847t^2 + 1.8036t \quad (7.5.1)$$

La solución del tirante a través de la ecuación (7.5.1) viene dada en la gráfica (9.19) del Apéndice B acompañada con su respectiva velocidad; analizándola y comparándola con la gráfica (9.10) del Apéndice B, ésta suaviza y evidencia más la realidad del fenómeno ya que la presencia de valores negativos de su respectiva velocidad, expresa una desaceleración, como se observa cuando atraviesa por la línea de origen; nuevamente se vuelve a acelerar cuando la onda comienza su fase directa, la función sufre una distorsión porque expresa el choque de ambas masas, una tratando de salir y la que viene por el nuevo golpe de ariete.

Además, para tirante y velocidad, coinciden las crestas de uno con los valles del otro, manifestando el máximo tirante por el golpe de ariete y la otra la velocidad a flujo permanente.

Para tener un panorama más crítico de la validez del polinomio de *Hermite*, es comparado con los resultados de la ecuación (5.3.31), cuyos números en menor tamaño, corresponden a la ecuación diferencial resuelta con discretizaciones lineales y los de mayor tamaño, corresponden a la solución de gasto a la salida de la cámara utilizando la derivada de la solución de *Hermite*.

Analizando la similitud entre ambos resultados, se realizó posteriormente otra aproximación a través de otro polinomio de *Hermite* para la presión. Sin embargo, ésta tuvo que fraccionarse para cada uno de los eventos analizados en la sección (7.2).

Por lo tanto, para la fase inicial de carga, el dominio $0.048 < t < 0.96$, encontramos

7.5.2 Valores obtenidos de la presión para el dominio $0.048 < t < 0.96$ a través del polinomio de Hermite

t	y(tirante)	1diferencia	2diferencia	3diferencia	4diferencia	5diferencia	6diferencia
0.048	128500						
0.048	128500	0					
0.96	123650	-5318	-5831				
0.96	123650	0	5831	12787			
3.09	60811	-29502	-13851	-6470	-21115		
3.09	60811	0	13851	13005	6402	9046	
4.05	123650	65457	68184	17583	1482	-1229	-2568

El polinomio interpolador será:

$$y(t) = 128500 + 0(t - 0.048) - 5831(t - 0.048)^2 + 12.787(t - 0.048)^2(t - 0.96) - 21115(t - 0.048)^2(t - 0.96)^2 + 9046(t - 0.048)^2(t - 0.96)^2(t - 3.09) - 2568(t - 0.048)^2(t - 0.96)^2(t - 3.09)^2$$

Realizando operaciones algebraicas, obtenemos la función buscada:

$$P(t)_{0.048-0.96} = 128302.05 + 8656.14t - 103199.1t^2 + 188976t^3 - 126652.17t^4 + 30089.23t^5 - 2568t^6$$

En tanto, para la fase de descarga y carga, el dominio se verá modificado ya que, si tomamos la función anterior por completo, existe

el riesgo de valores extremos; por lo tanto, fue imprescindible establecer otro polinomio interpolador en un nuevo dominio, $0.96 < t < 3.27$. Es importante hacer hincapié en el dominio de lado derecho: aún cuando la fase de carga termina en el tiempo 4.05 s. debido a la inercia, se observó que los primeros 0.18 s., el tirante no se incrementa inmediatamente; como es de esperarse; por otra parte la presión, que creció súbitamente en ese lapso de tiempo; después de él permaneció constante y la masa fue desplazada hasta alcanzar la altura de 0.63 m hasta terminar en los 4.05 s. Haciendo operaciones, tenemos:

7.5.2 Valores obtenidos de la presión para el dominio $0.96 < t < 3.26$ a través del polinomio de Hermite

t	y(tirante)	1diferencia	2diferencia	3diferencia	4diferencia	5diferencia
0.96	123650					
0.96	123650	0				
3.09	60811	-29502	13851			
3.09	60811	0	13851	13005		
3.27	123650	349106	1939475	833604	355238	
3.27	123650	0	-1939475	-21549726	-9689753	4348481

El polinomio interpolador será:

$$P(t) = 123650 + 13851(t - 0.96)^2 + 13005(t - 0.96)^2(t - 3.09) + 355238(t - 0.96)^2(t - 3.09)^2 - 4348481(t - 0.96)^2(t - 3.09)^2(t - 3.27)$$

Realizando operaciones algebraicas, para la fase de descarga, el dominio fue $0.96 < t < 3.09$, truncando hasta el término cúbico, obtenemos la función buscada:

$$P(t)_{0.96-3.09} = 1482 t^3 + 1000.8 t^2 - 45912.99 t^2 + 80137.75 t + 86891.53$$

Para finalizar, se establece el mismo criterio que el anterior, sólo que en este caso, el dominio será $3.09 < t < 3.27$. Ver gráfica 9.16 del Apéndice B.

Una vez encontrado los resultados, éstos fueron integrados en la discretización, encontrando que en la fase de descarga existe una diferencia aproximada de un litro en lo encontrado experimentalmente; mientras en la fase de carga, un tanto menor que lo encontrado experimentalmente; es decir, el modelo arroja un valor de 0.230 l, versus con lo real de 0.5 l. Estas discrepancias puedan ser por parámetros todavía no establecidos y la ecuación tal vez tenga que ser ajustada para refinar los resultados. Ante esto, es necesario realizar estudios ulteriores para aproximar a los valores reales.

Dado que el fenómeno presento 3 fases de comportamiento. La discrepancia fue del orden de 1 %, para la fase inicial de carga, un 3 % para la fase de descarga y un 5 % en la fase de carga para la discretización lineal. Obviamente, los valores antes mencionados, fueron propuestos de acuerdo a lo observado; con un carácter más formal, la dicretización no lineal permite circundar la solución del gasto de la cámara; por lo que argüimos que ambos conllevan a la misma solución del gasto. Debido a lo extenso de las comparaciones de la solución de la ecuación (5.3.31), los resultados se presentan a manera de resumen en el Apéndice D y E y en forma total en dos discos de computadora (1.44 Mb) incluido en el Apéndice D.

7.6 Rendimiento por eficiencia.

Para determinar la eficiencia de un ariete hidráulico, se partirá de la definición de eficiencia (η):

$$\eta = \text{Energía aprovechada} / \text{Energía suministrada}$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_B} \quad (7.6.1)$$

La eficiencia de un ariete hidráulico como se mencionó anteriormente varía de acuerdo a las longitudes de carrera con la que el equipo trabaje; dado que a mayor longitud de carrera existe un mayor consumo de agua, tanto que a menor carrera, menor consumo de agua.

Cabe mencionar que conocer las eficiencias con la que el sistema pueda trabajar es de mucha importancia para la adecuada operación del equipo, puesto que no siempre se tienen las condiciones ideales para su perfecto funcionamiento.

A continuación se muestran los datos obtenidos para cada una de las carreras, gastos de alimentación y sus respectivas eficiencias en la tabla (7.6.1). Encontramos que la mejor eficiencia a carrera máxima correspondió al gasto de 38.17 lmin^{-1} con una eficiencia de 11.95%. Para el caso de carrera mediana, el gasto fue de 36.73 para una eficiencia de 11.50 %. El mejor valor correspondió a la carrera mínima con un 13.57 %, pero no así en su gasto , cuyo valor osciló muy cerca de los 31.80 lmin^{-1} .Ver gráfica (9.17) del Aéndice B

Tabla 7.6.1 Eficiencias de la bomba de ariete hidráulica DTU-P4 a diferentes carreras y diferentes gasto de alimentación

MÁXIMA 319.49 lmin ⁻¹ DE ENERGÍA SUMINISTRADA		MEDIANA 319.49 lmin ⁻¹ DE ENERGÍA SUMINISTRADA		MÍNIMA 234.47 lmin ⁻¹ DE ENERGÍA SUMINISTRADA	
GASTO ENTREGADO lmin ⁻¹ (ε _A)	EFICIENCIA (%)	GASTO ENTREGADO lmin ⁻¹ (ε _A)	EFICIENCIA (%)	GASTO ENTREGADO lmin ⁻¹ (ε _A)	EFICIENCIA (%)
7.95	02.49	08.74	2.74	9.54	4.07
15.90	04.98	12.72	3.98	20.67	8.82
19.08	05.97	15.90	4.98	27.83	11.88
27.03	08.46	22.26	6.97	29.02	12.38
31.00	09.70	31.80	9.95	30.21	12.89
31.64	09.90	33.39	10.45	31.03	13.24
36.58	11.45	35.78	11.20	31.03	13.24
36.73	11.50	35.78	11.20	31.80	13.32
37.37	11.70	35.78	11.20	31.80	13.57
38.0	11.89	36.58	11.45	31.80	13.57
38.2	11.95	36.73	11.50	31.80	13.57

7.7 Análisis del comportamiento de la cámara de aire.

De acuerdo con lo planteado en el capítulo 5 en su inciso 5.3.2 (tanto el 5.3.2.1 como el 5.3.2.2) y lo observado en los incisos del capítulo 7, como son: 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 y 7.5 ; la ecuación (5.3.25), adquiere otra óptica de visualización del problema; es decir, la ecuación diferencial que explica el funcionamiento de la cámara de aire en arietes hidráulicos es,

$$\sum F = \rho g A_T H_i - \rho g A_T (H_A + z + \Delta h) + \rho g A_T (H_A - H_i) - \frac{\rho g A_T |V| V}{2 d g} - H_{f_A}$$

↑
presión
en el nudo

↑
inercia

↑
peso
del agua

↑ ↑
fricción placa
y check

resolviendo la anterior ecuación, igualándola con (5.3.10) y (5.3.13), tenemos:

$$-\frac{H_A + z}{g} \frac{dV}{dt} - z - \frac{H_{f_A}}{\rho g A_T} = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad (7.7.1)$$

reduciéndola

$$(L + H_A + z) \frac{dV}{dt} + gz + \frac{Hf_A}{\rho g A_T} = 0 \quad (7.7.2)$$

Ecuación que interpreta la dinámica de la cámara. Reconsiderando la ecuación (5.3.20) y (5.3.22) para la interpretación de la ecuación de continuidad, encontramos los siguientes hechos:

$$Q_H + \frac{dC_{Win}}{dt} - \frac{dC_{Wout}}{dt} = VA \quad (7.7.3)$$

donde

Q_H = Gasto por el hidrorriete, en m^3s^{-1}

$\frac{dC_{Win}}{dt}$ = Diferencial de gasto que entra a la cámara en un instante dado

$\frac{dC_{Wout}}{dt}$ = Diferencial de gasto que sale de la cámara en un instante dado.

VA = Gasto a través de la tubería expresado en función del área y velocidad, en m^3s^{-1} .

y bajo la propuesta de **Mancebo (1989)**

$$\frac{dH_A}{dt} = \frac{dz}{dt} \quad (7.7.4)$$

y retomando la ecuación (5.3.23) y derivándola al igual que la ecuación (7.6.4) con respecto al tiempo y agrupándola en la ecuación (7.6.3), tenemos:

$$Q_H + \frac{C_A}{1.2 H_A} \frac{dz}{dt} = VA \quad (7.7.5)$$

para la fase directa del golpe de ariete, no hay gasto a través del cuerpo, $Q_H = 0$, adquiere la forma:

$$VA - \frac{C_A}{1.2 H_A} \frac{dz}{dt} = 0 \quad (7.7.6)$$

Ecuación que interpreta la continuidad del gasto dentro de la cámara.

Podemos suponer que

$$\frac{C_A}{1.2 H_A} \quad \text{periódica para el estacionario} \quad (7.7.7)$$

polinomial para el transitorio inicial.

Llamemos a este último cociente, ϕ , o simplemente $\phi_{win-wout}(t)$.

Por lo tanto, la ecuación (7.7.6) e incluyendo en ella la ecuación (7.7.7), obtenemos :

$$VA - \phi_{win-wout}(t) \frac{dz}{dt} = 0$$

Tomando la derivada,

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{\phi'(t)}{\phi_{\text{win-wout}}(t)} \frac{dz}{dt} = \frac{A}{\phi_{\text{win-wout}}(t)} \frac{dV}{dt} \quad (7.7.8)$$

Integrando la ecuación (7.7.8) en la ecuación (7.7.2) y expresándola en función del tiempo,

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \left(gz + \frac{Hf_A}{\rho A_T} \right)}{(L + H_A + z)} \quad (7.7.9)$$

de donde

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{\phi'(t)}{\phi_{\text{win-wout}}(t)} \frac{dz}{dt} = - \frac{A \left(gz + \frac{Hf_A}{\rho A_T} \right)}{\phi_{\text{win-wout}}(t) (L + H_A + z)} \quad (7.7.10)$$

Ecuación diferencial de segundo orden, no lineal, que modela el funcionamiento de la cámara de aire para la fase directa del golpe de ariete.

Para el caso de la fase inversa, regresamos al planteamiento de la ecuación (7.6.5), y a la suposición de la ecuación (7.6.7) y además en este caso, $Q_H \neq 0$, en consecuencia,

$$Q_H + \frac{C_A}{1.2 H_A} \frac{dz}{dt} = VA \quad (7.7.11)$$

Sin embargo, aún cuando para el caso de la fase inversa, Q_H , pueda considerarse como constante, en términos generales, éste, para su análisis, depende de varios parámetros, entre los encontrados, son:

$$Q_H = f(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5, \xi_6)$$

donde

ξ_1 = forma geométrica del cuerpo

ξ_2 = número de orificios

ξ_3 = forma geométrica de las ventanas y/o
válvula de descarga

ξ_4 = contrapeso

ξ_5 = longitud del cuerpo

ξ_6 = forma geométrica de la válvula de
impulso

Para establecer un panorama más claro, descompongamos el gasto que atraviesa por el hidroriете, y poder contemplar a los anteriores parámetros como funciones que regulen la frecuencia de los golpes en cada ciclo. Es importante recordar que durante la finalización de la fase inversa del golpe de ariete, no hay gasto de entrada en la cámara; a saber:

$$V_H A_H + \phi_{wout}(t) \frac{dz}{dt} = VA \quad (7.7.12)$$

derivando la ecuación (7.7.12) y agregando un nuevo parámetro

$\xi_{1-6}(t) = V_H A_H$, o simplemente $\xi(t)$

$$\xi(t) + \phi(t) \frac{dz}{dt} = VA$$

Dado que el diámetro de la línea de descarga se mantiene constante en todo el proceso y $A=A_T$ e integrándola con la ecuación (7.7.9), finalmente

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{\phi'(t)}{\phi_{wout}(t)} \frac{dz}{dt} + \frac{\xi(t)}{\phi_{wout}(t)} = \frac{Agz + \frac{Hf_A}{\rho}}{\phi_{wout}(t)(L + Ha + z)} \quad (7.7.13)$$

Ecuación diferencial de segundo orden, no lineal que interpreta el funcionamiento de la cámara de aire durante la finalización de la fase inversa del golpe de ariete y el inicio de la recarga de cuerpo.

Una vez encontrado las ecuaciones que interpretan el funcionamiento de la cámara, tanto para fase inversa como la directa, encontramos que no existe una solución analítica directa, y en mucho casos depende de condiciones iniciales y de frontera para cada dispositivo diferente que se presente; por tal motivo, se sugiere una solución con método numéricos.

Solo basta comentar que lo reportado en el capítulo 5.4, mucho de las fórmulas empíricas o criterios están limitados a casos generales

sin incluir características geométricas ni dispositivos mecánicos adicionales, y más aún, se concretan a materiales metálicos y a la respuesta de la cámara de amortiguación y en consecuencia, el período puede verse modificado para cada caso particular. Es necesario conocer a través de ensayos las pérdidas de los dispositivos mecánicos para encontrar las pérdidas locales y poder así presentar alternativas más eficientes y aproximar el cálculo de carga disponible para cada hidroariete. Por ejemplo, la ecuación 5.4.4, para gasto entregado, solo se limita a reportar el gasto entregado para una altura en especial, tomemos una altura de 20 m, el gasto entregado será:

$$Q_d = \frac{1800 (5.31667)(2.7)}{20} = 1291.95 \text{ lh}^{-1}$$

$$Q_d = 21.53 \text{ lmin}^{-1}$$

Observamos en la gráfica 9.15 del Apéndice B, para esta carga, el mejor gasto fue 39 lmin^{-1} a carrera mediana, lo cual no concuerda con la fórmula empírica, pero, acusa buena proximidad para efectos de diseño.

8 Conclusiones

Ante lo extenso del trabajo, fueron evidentes varios hechos que concluimos en parte, en una tabla a manera de resumen:

Tabla 8.1.1 Cuadro comparativo de los datos proporcionados por la Universidad de Warwick en Inglaterra contra los obtenidos de la evaluación técnica de la bomba de ariete hidráulico DTU-P4.

Nº	Parámetro	U. de Warwick	Ariete DTU-P4
1	Altura alimentación	Más de 3 m	2.70 m
2	Flujo de alimentación	100 a 360 lmin ⁻¹	234.47 a 319.49 lmin ⁻¹
3	Diám.tubería alimen.	0.09 m	0.1 m (4")
4	Altura de entrega	Más de 20 m	12 a 35 m
5	Gasto entrega esperado	3 a 40 l	8 a 38 l
6	Diám. tubería entrega	0.25 m	0.25m (1")
7	Mat tubería alimenta	Cloruro de Polivinilo (PVC)	Cloruro de Polivinilo (PVC)

Es de suma importancia destacar que la bomba de ariete hidráulico DTU-P4 mejora en los resultados esperados por la fórmula empírica de Calvert para bombas clásicas de este tipo. (metálicas)

Con la realización de esta investigación, se presenta el ciclo de operación en *in situ* de la bomba de ariete hidráulico DTU-P4 como lo demuestra la gráfica 9.11 del Apéndice B.

Se lograron lecturas de 2.2 Kgcm^{-2} (222 000 Pa) en la base de la cámara lo que permitió concluir que la fórmula de **Jokowsky** calcula la máxima sobrepresión creada por el fenómeno de golpe de ariete.

La mejor eficiencia la alcanzó la prueba con la mínima carrera, 13.57 %., pero no muy distantes estuvieron la carrera máxima y mediana . El mayor gasto superó los 38 l por pulsación a carrera máxima. La mayor carga registrada osciló entre los 1.2 Kgcm^{-2} (126,000 Pa, equivalente a 12 m de entrega) y 3.4 Kgcm^{-2} (350,000 Pa, equivalente a 34 m de entrega). El número de períodos comprendió 19 a carrera máxima y 25 pulsaciones por minuto, a carrera mínima. Se comprobó que el nivel máximo alcanzado en la cámara fue de 0.63 m y como mínimo no superó los 0.48 m.

Además se logró avanzar presentando un análisis de diseño más formal para determinar el tamaño de la cámara, a través de la propuesta obtenida de las cámaras de aire para hidroeléctricas y estaciones de bombeo, con la siguiente ecuación:

para el caso de la fase directa:

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{\phi'(t)}{\phi_{\text{win-wout}}(t)} \frac{dz}{dt} = - \frac{A}{\phi_{\text{win-wout}}(t)} \frac{\left(gz + \frac{Hf_A}{\rho A_T} \right)}{(L + H_A + z)}$$

y para la fase inversa:

$$\frac{d^2z}{dt^2} + \frac{\phi'(t)}{\phi_{wout}(t)} \frac{dz}{dt} + \frac{\xi'(t)}{\phi_{wout}(t)} = \frac{Agz + \frac{Hf_A}{\rho}}{\phi_{wout}(t)(L + Ha + z)}$$

Y para el gasto de descarga de la cámara se demostró que la ecuación diferencial que modela la dinámica fue:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{k_1}{\sqrt{z}} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{k_2}{\sqrt{P}} \frac{\partial P}{\partial t}$$

En cuyos casos, con una discretización lineal y una interpolación de *Hermite*, a través de un polinomio lineal, éste último, acusó la necesidad de un parámetro adimensional para dar un mayor ajuste, ambos contribuyeron en brindar una buena aproximación del gasto obtenido.

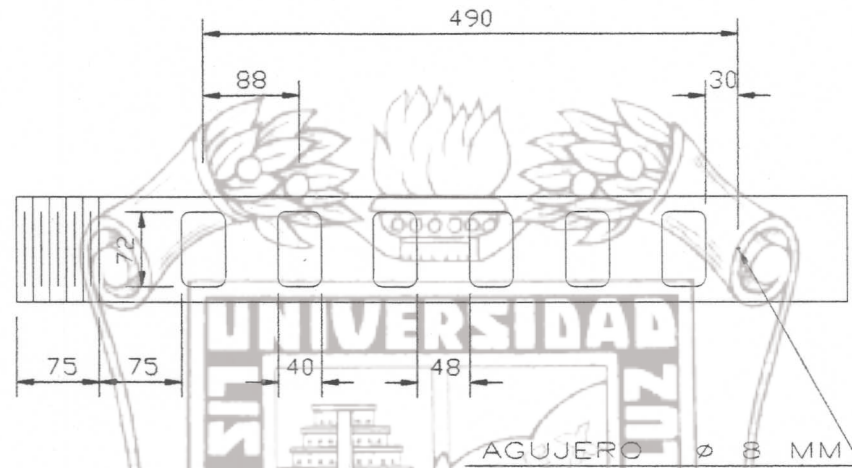
9 Apéndice

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

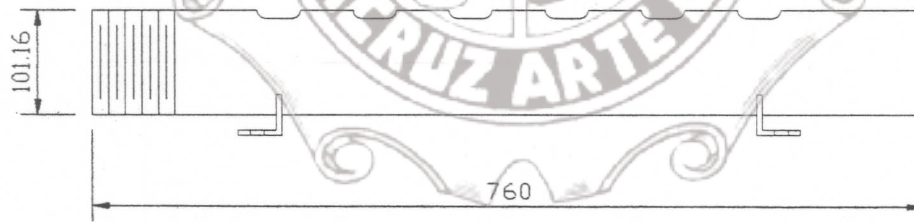


CUERPO DE LA BOMBA

VISTA DE PLANTA



VISTA FRONTAL



TUBO DE ACERO CEDULA 40

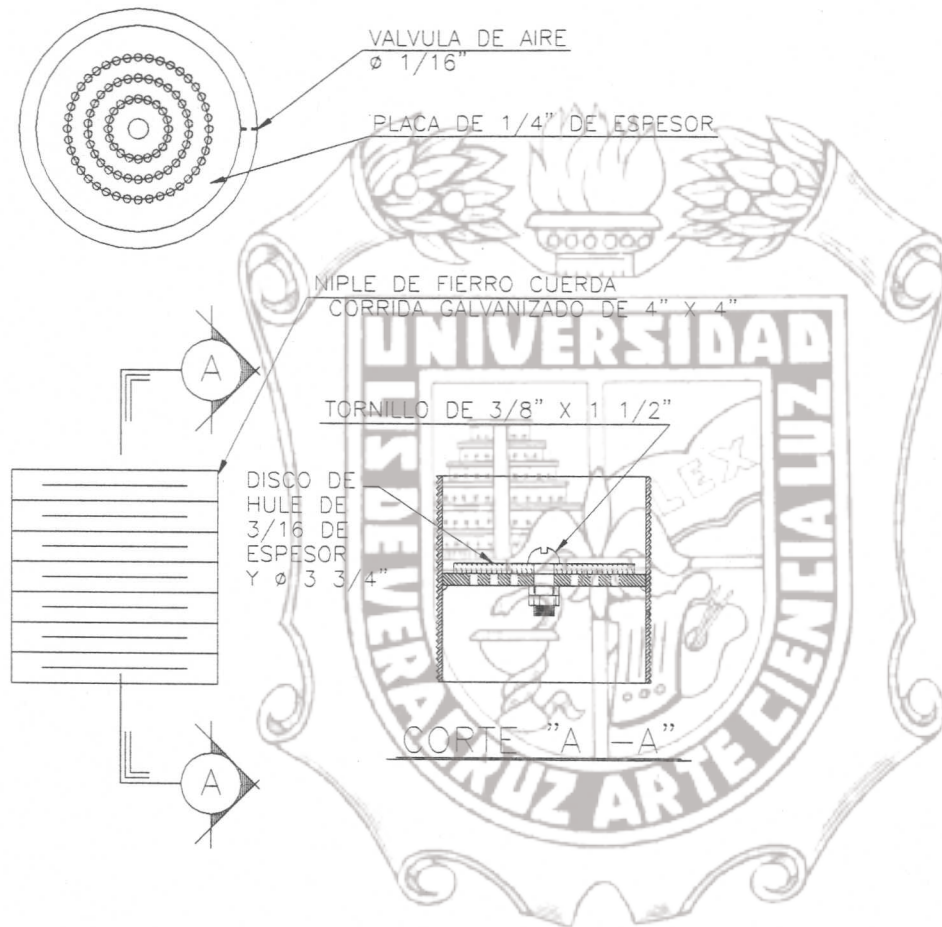
ESC: 1:5

ACOT: MM

Dibujo 9.1 Cuerpo de la bomba de ariete DTU-P4

VALVULA CHECK

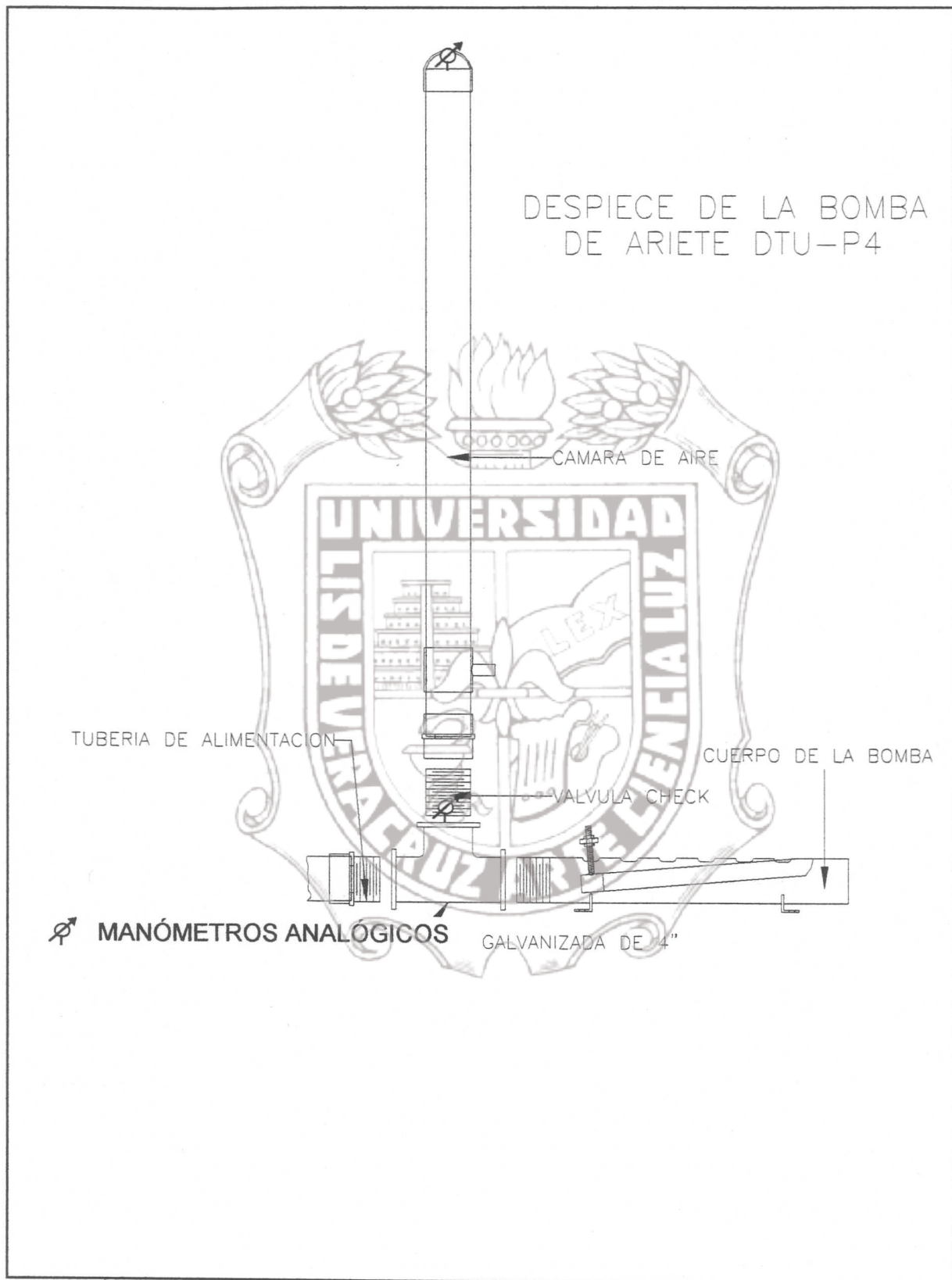
VISTA DE PLANTA



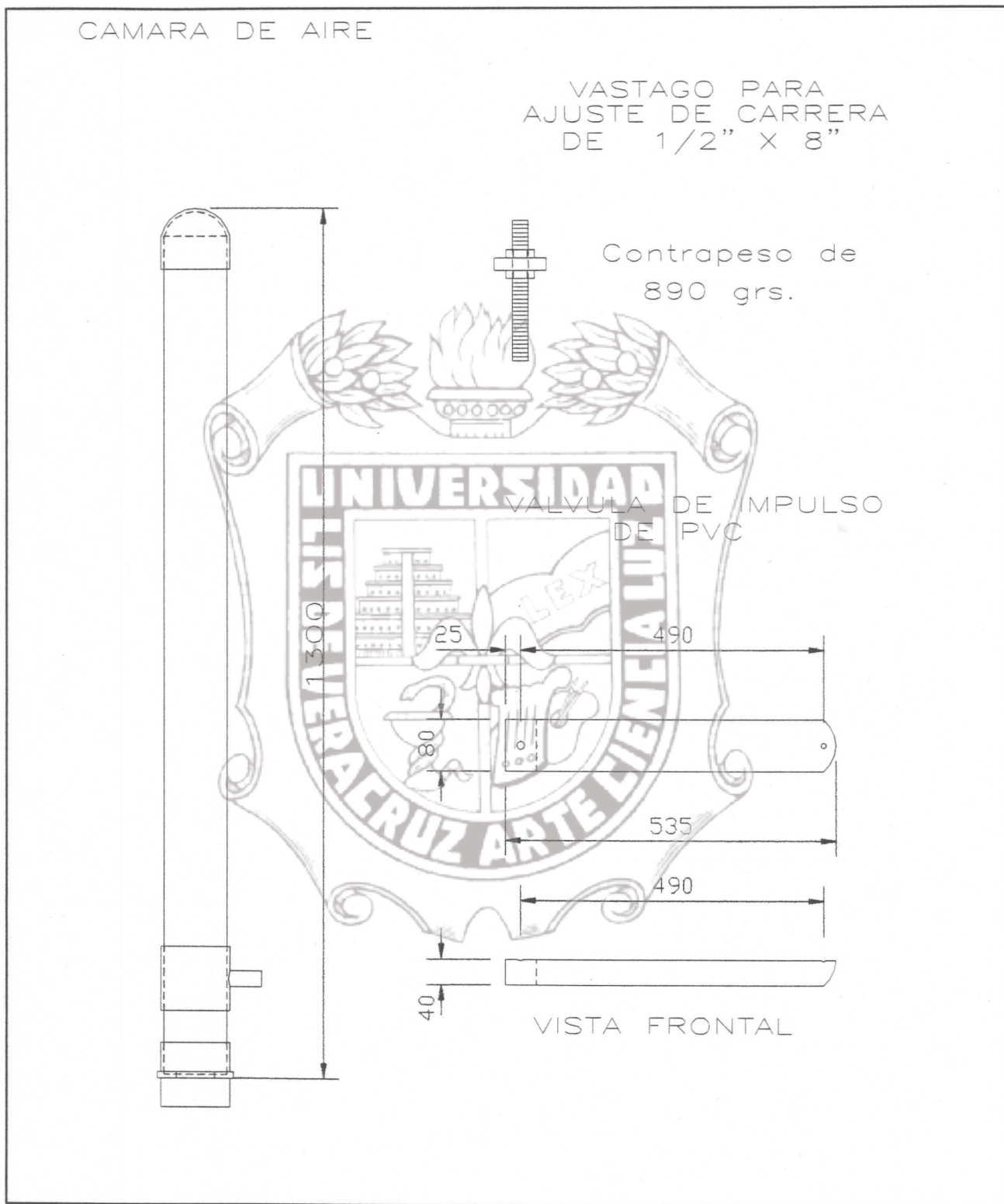
ESC: 1:2.5

ACOT:

Dibujo 9.2 Válvula Check de la bomba de ariete DTU-P4



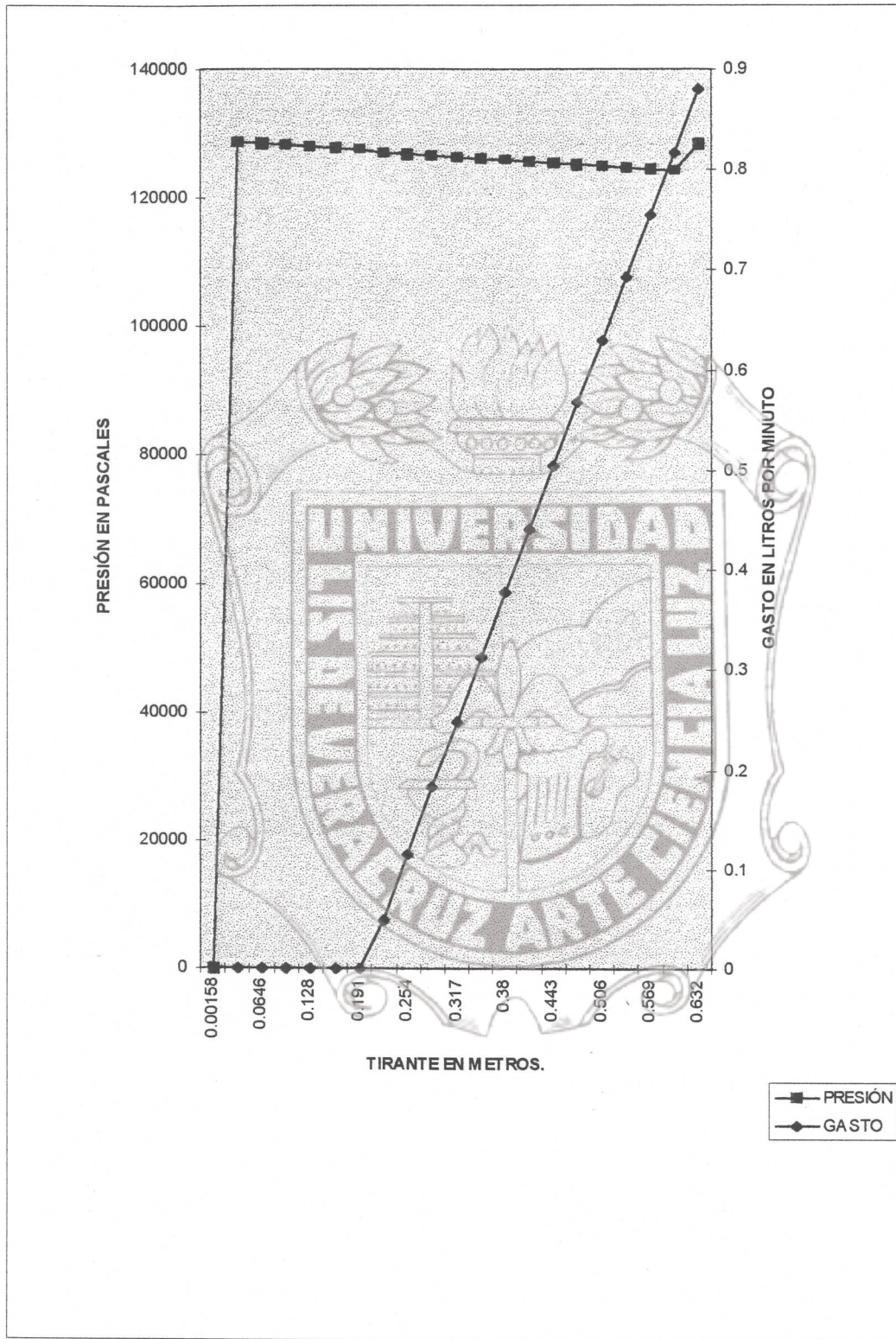
Dibujo 9.3 Despiece de la bomba de ariete DTU-P4



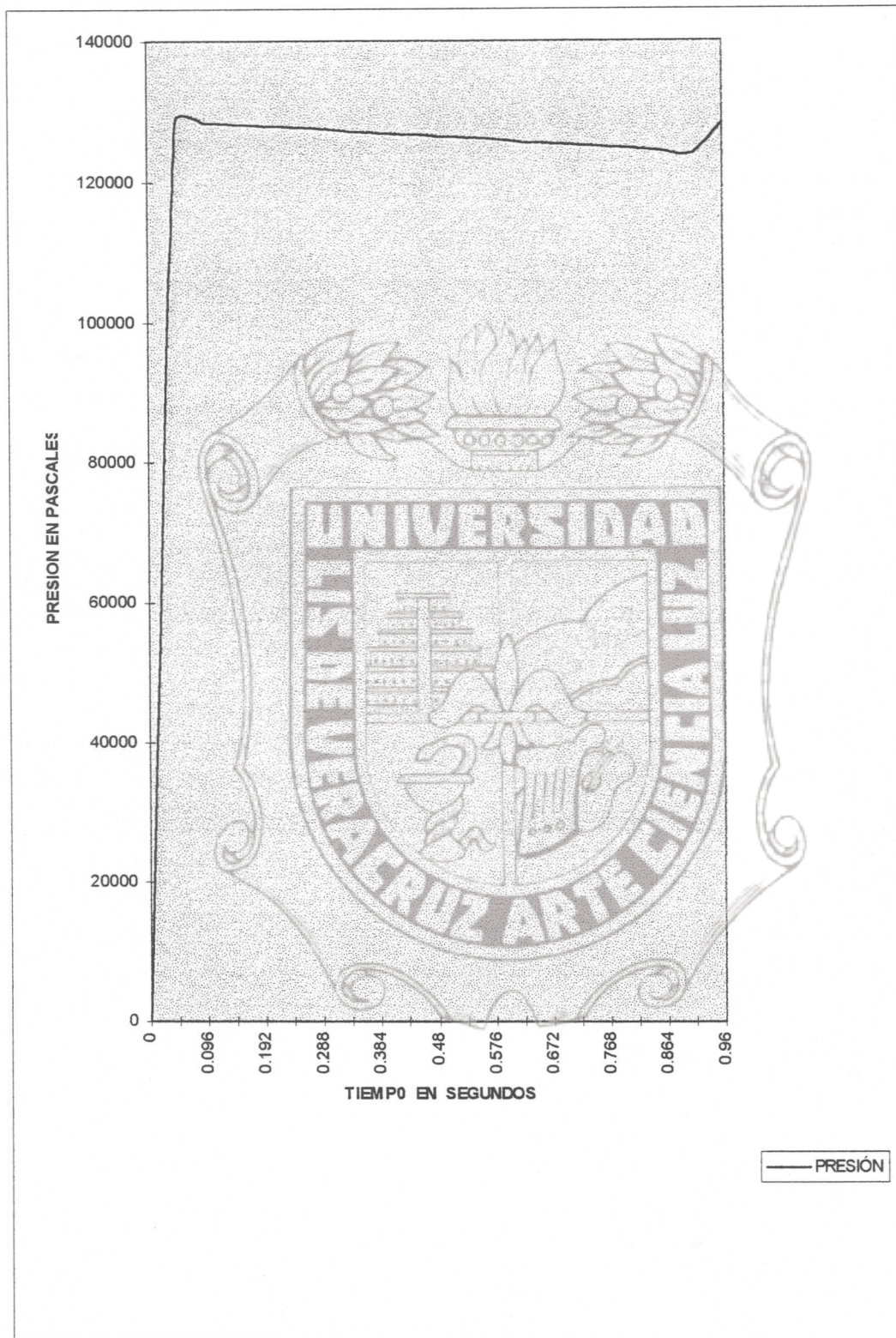
Dibujo 9.4 Cámara de aire de la bomba de ariete DTU-P4

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

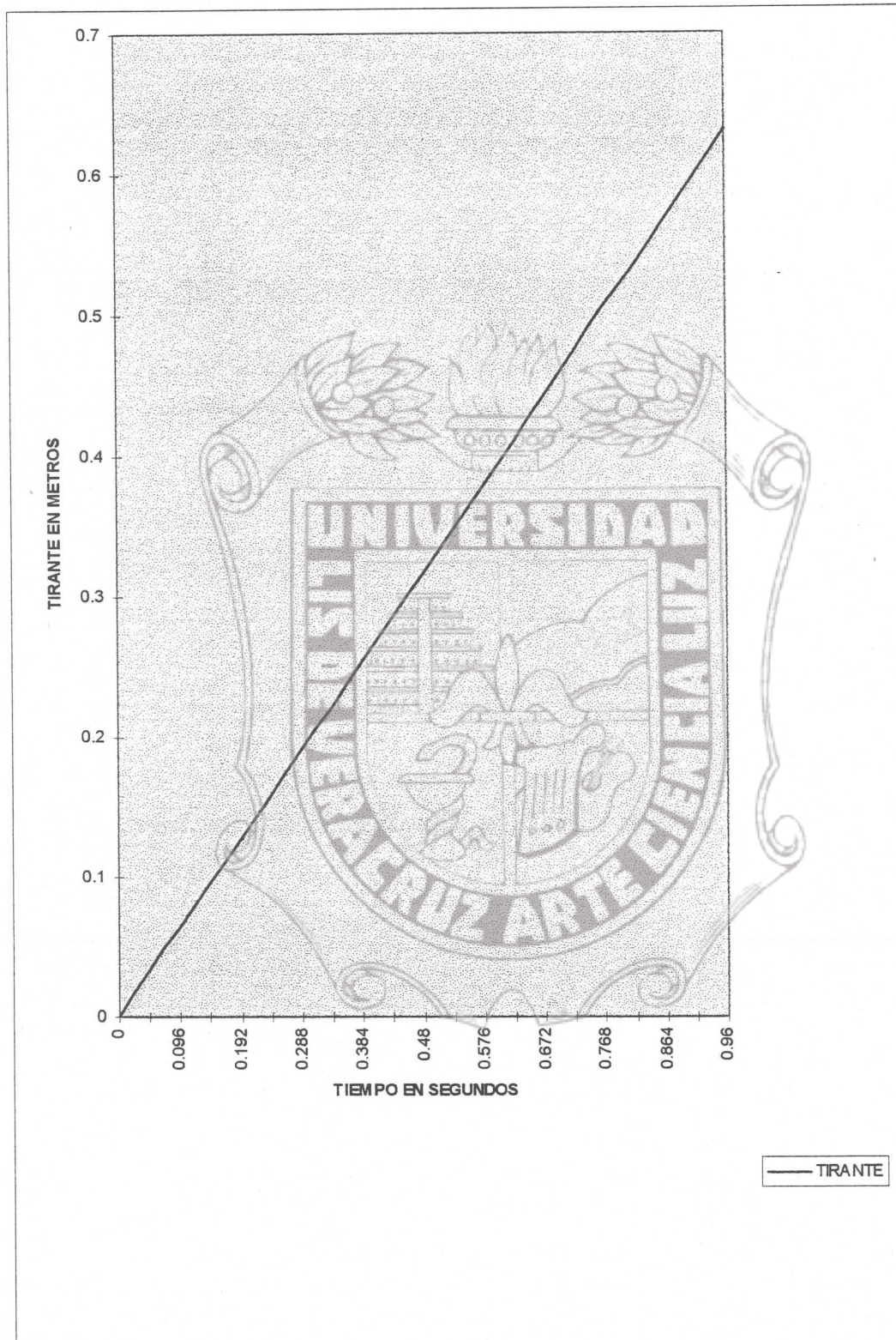




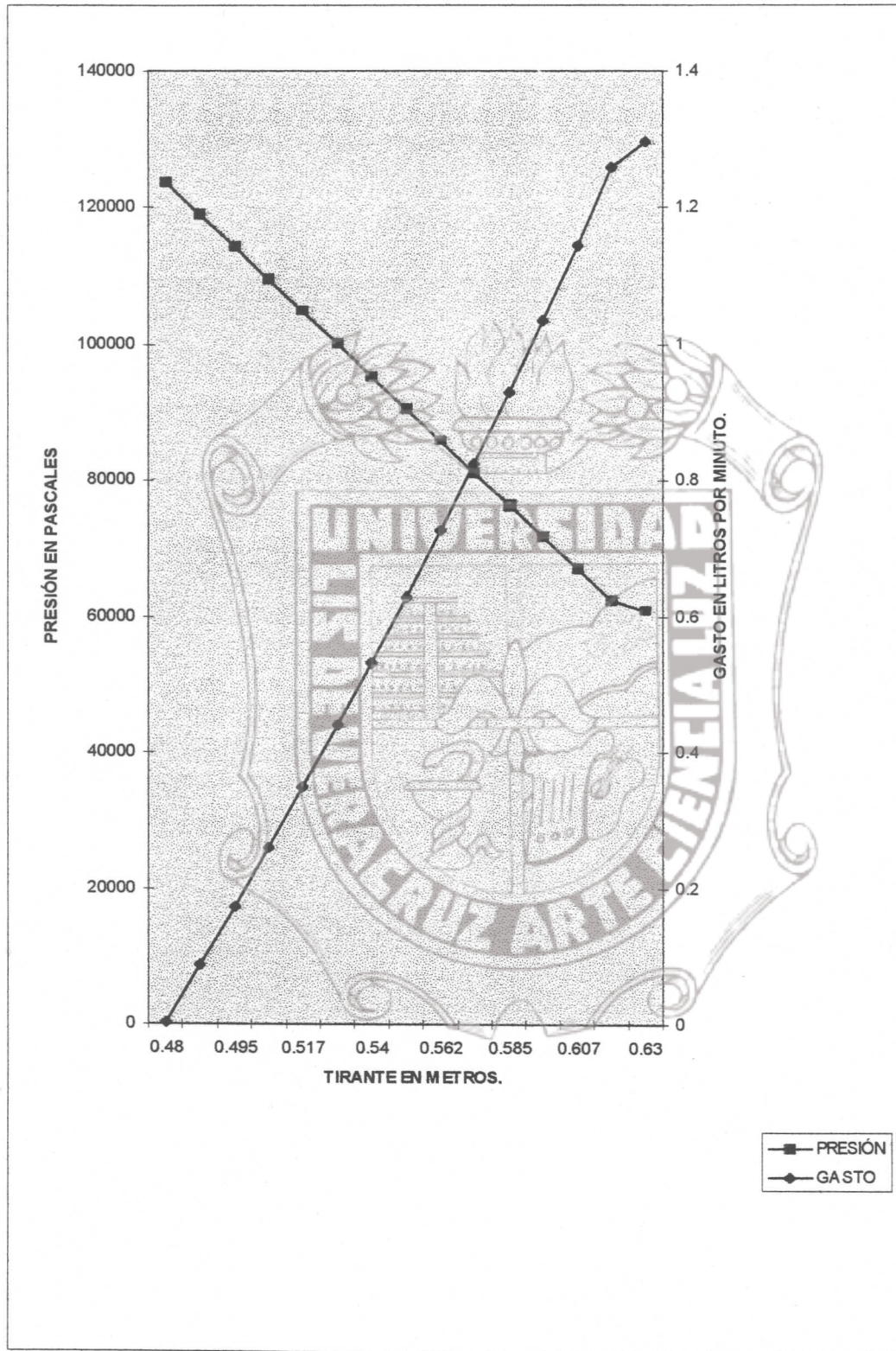
Gráfica 9.1 Relación Tirante-Presión-Gasto durante la fase inicial del proceso



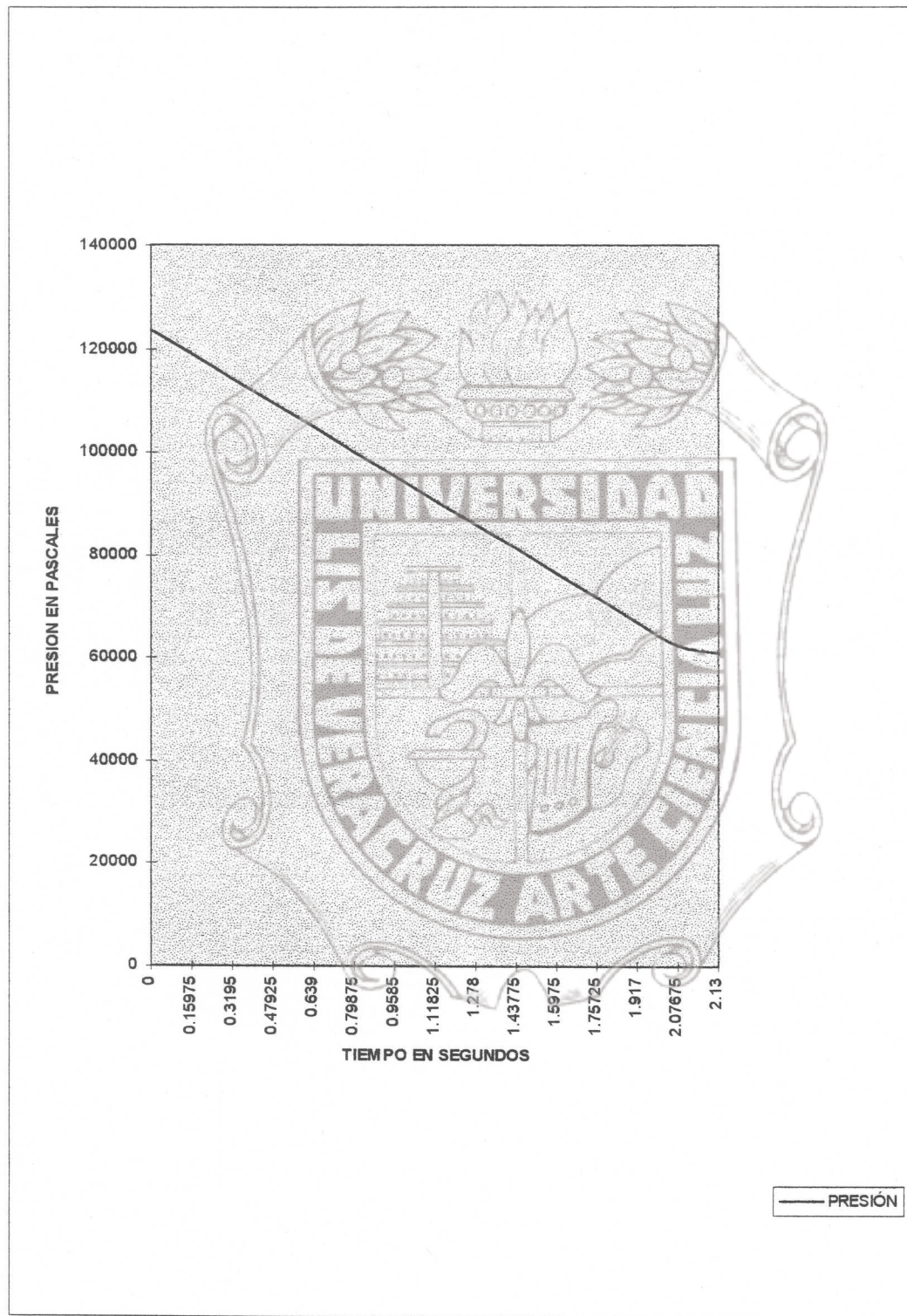
Gráfica 9.2 Relación Presión-Tiempo durante la fase inicial del proceso.



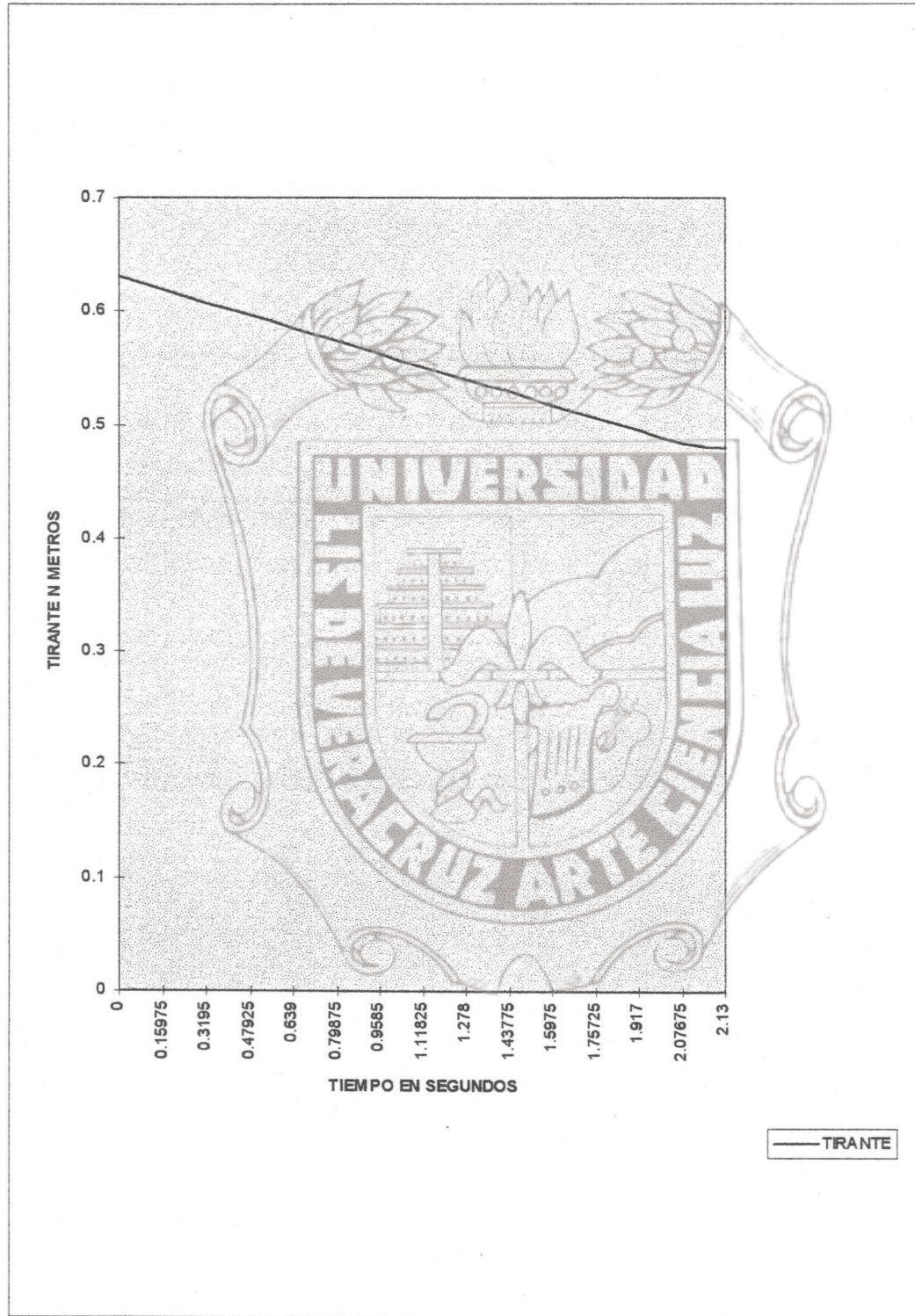
Gráfica 9.3 Relación Tirante-Tiempo durante la fase inicial del proceso.



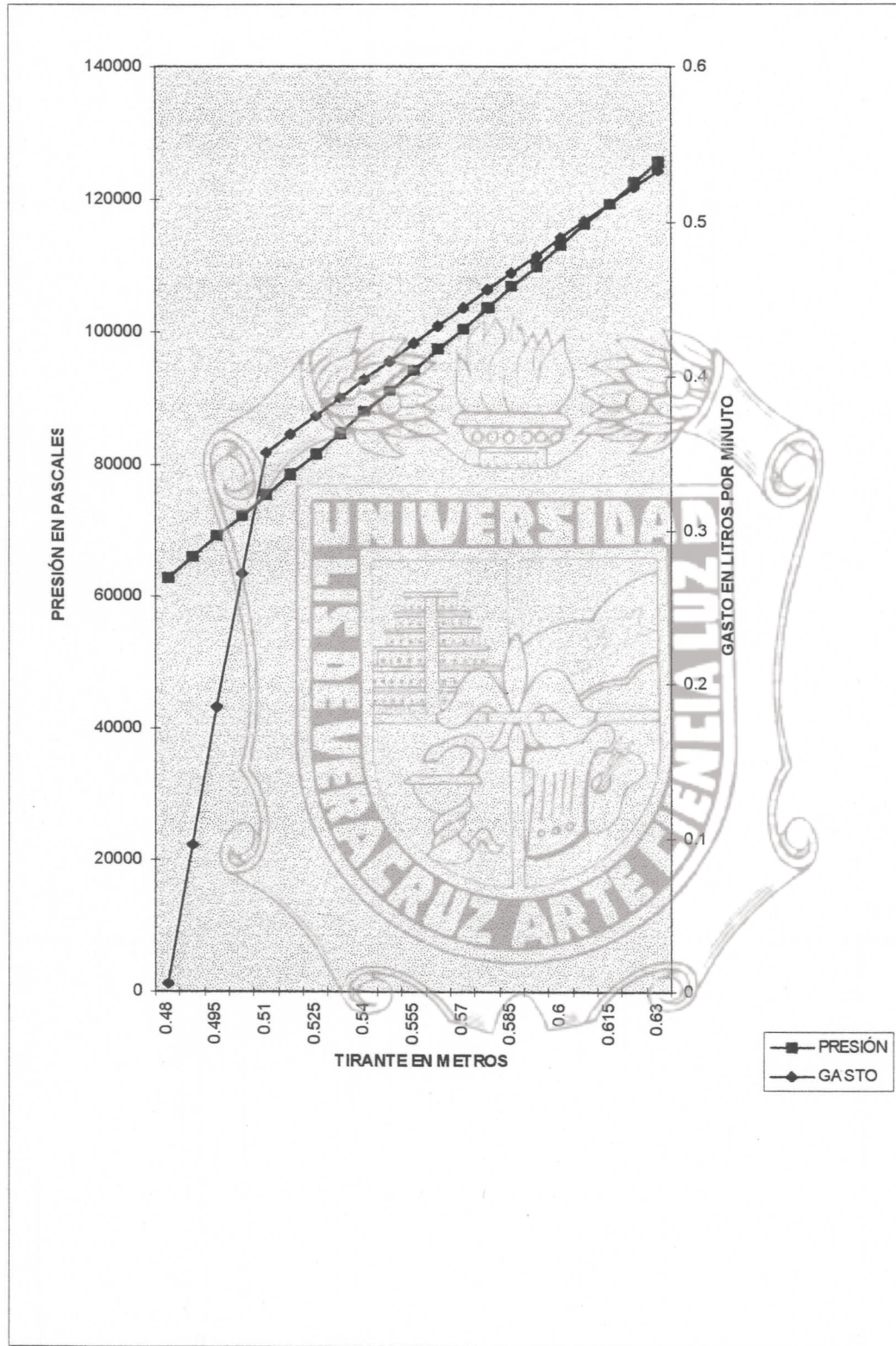
Gráfica 9.4 Relación Tirante-Presión-Gasto durante la descarga de una pulsación.



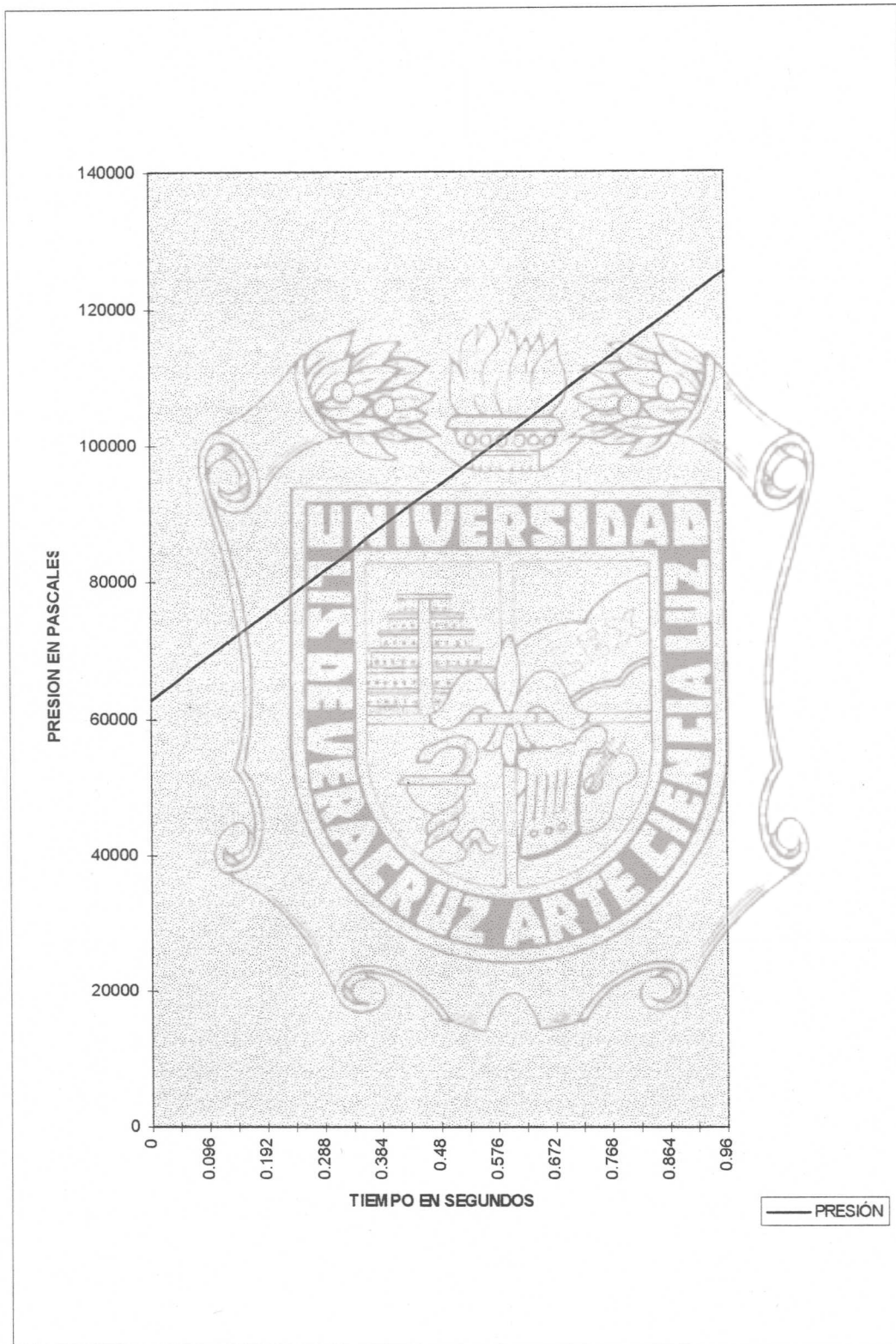
Gráfica 9.5 Relación Tirante-Tiempo durante la descarga de una pulsación.



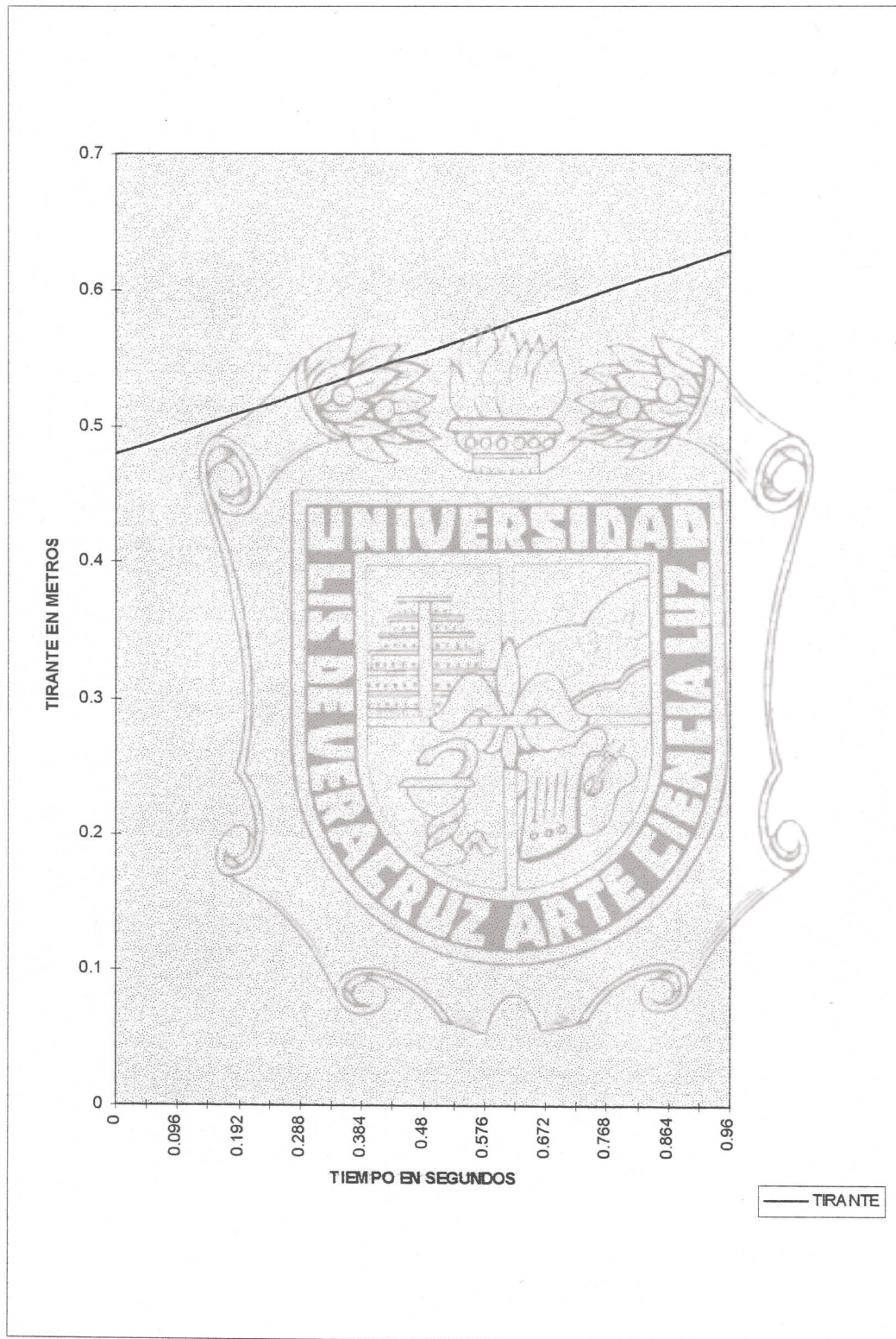
Gráfica 9.6 Relación Tirante-Tiempo durante la descarga de una pulsación.



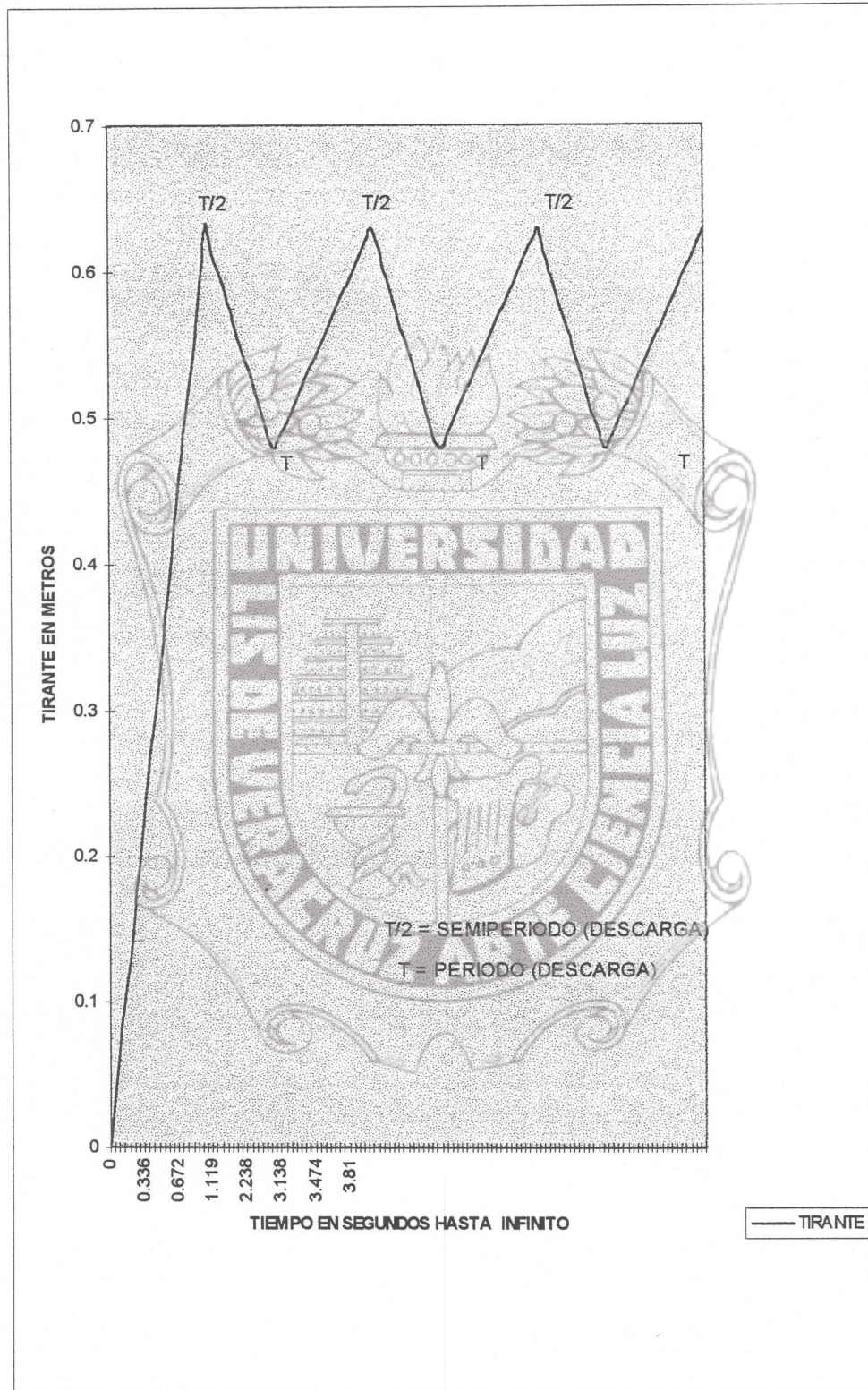
Gráfica 9.7 Relación Tirante-Presión-Gasto durante la carga de una pulsación.



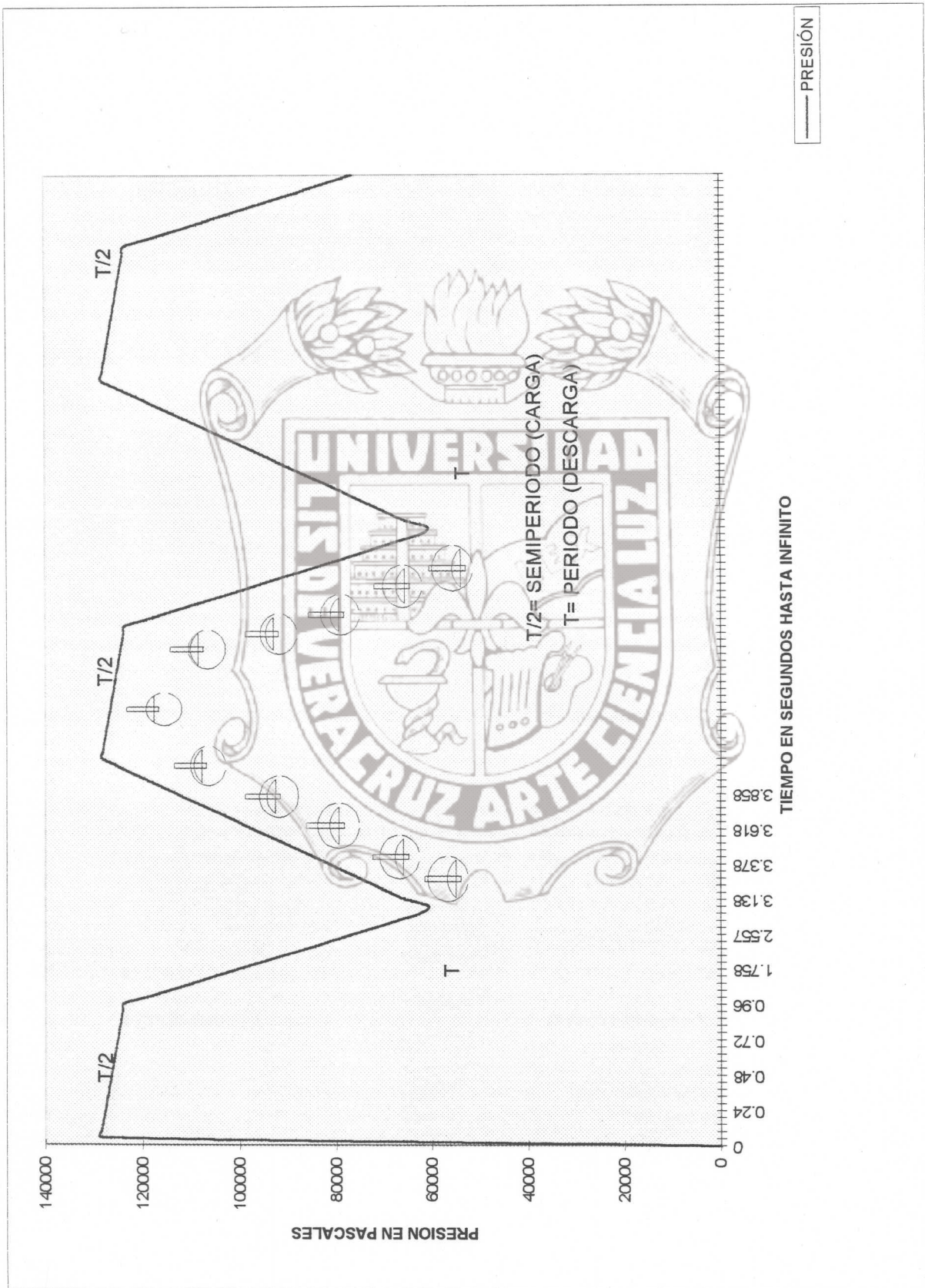
Gráfica 9.8 Relación Presión-Tiempo durante la carga de una pulsación.



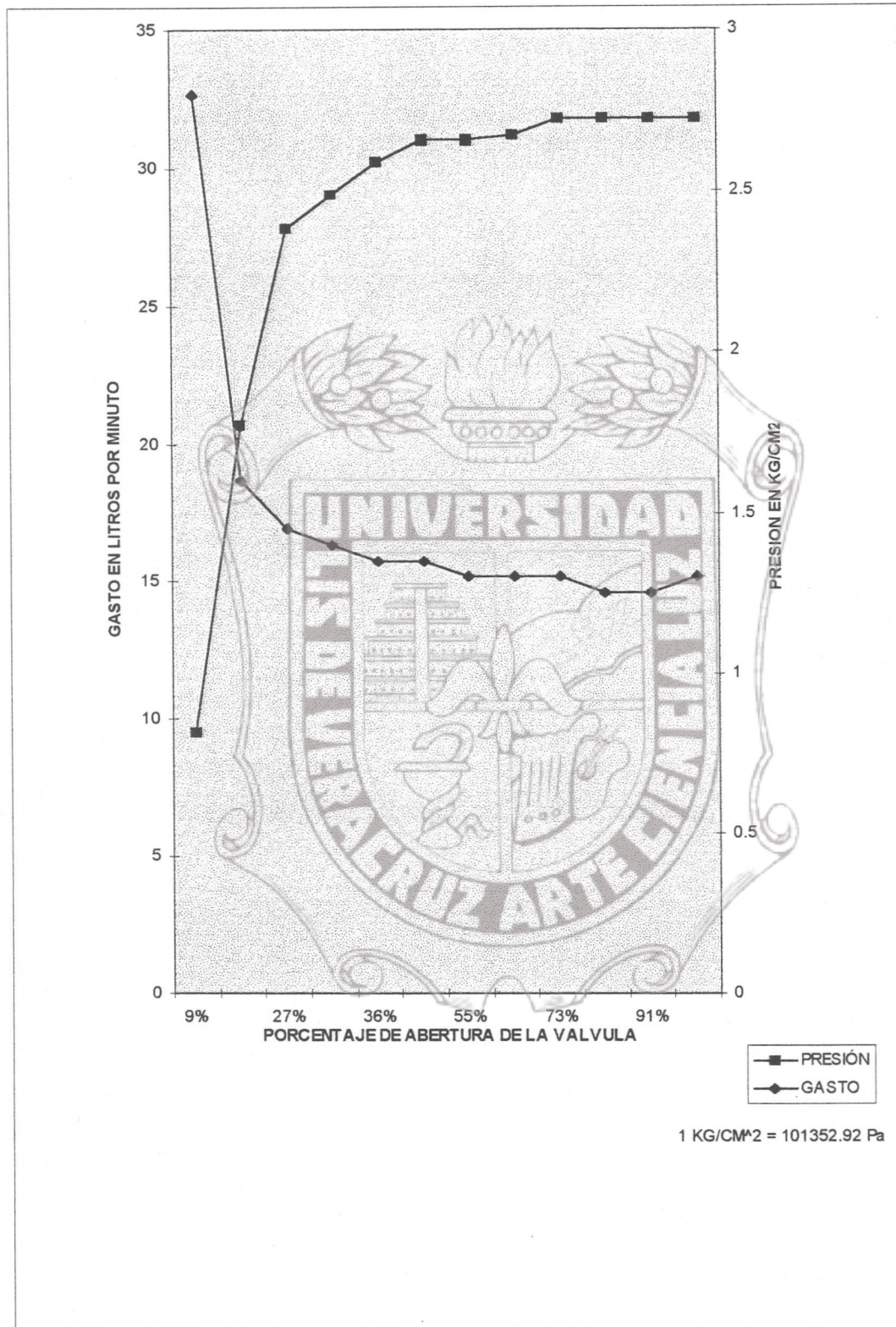
Gráfica 9.9 Relación Tirante-Tiempo durante la carga de una pulsación.



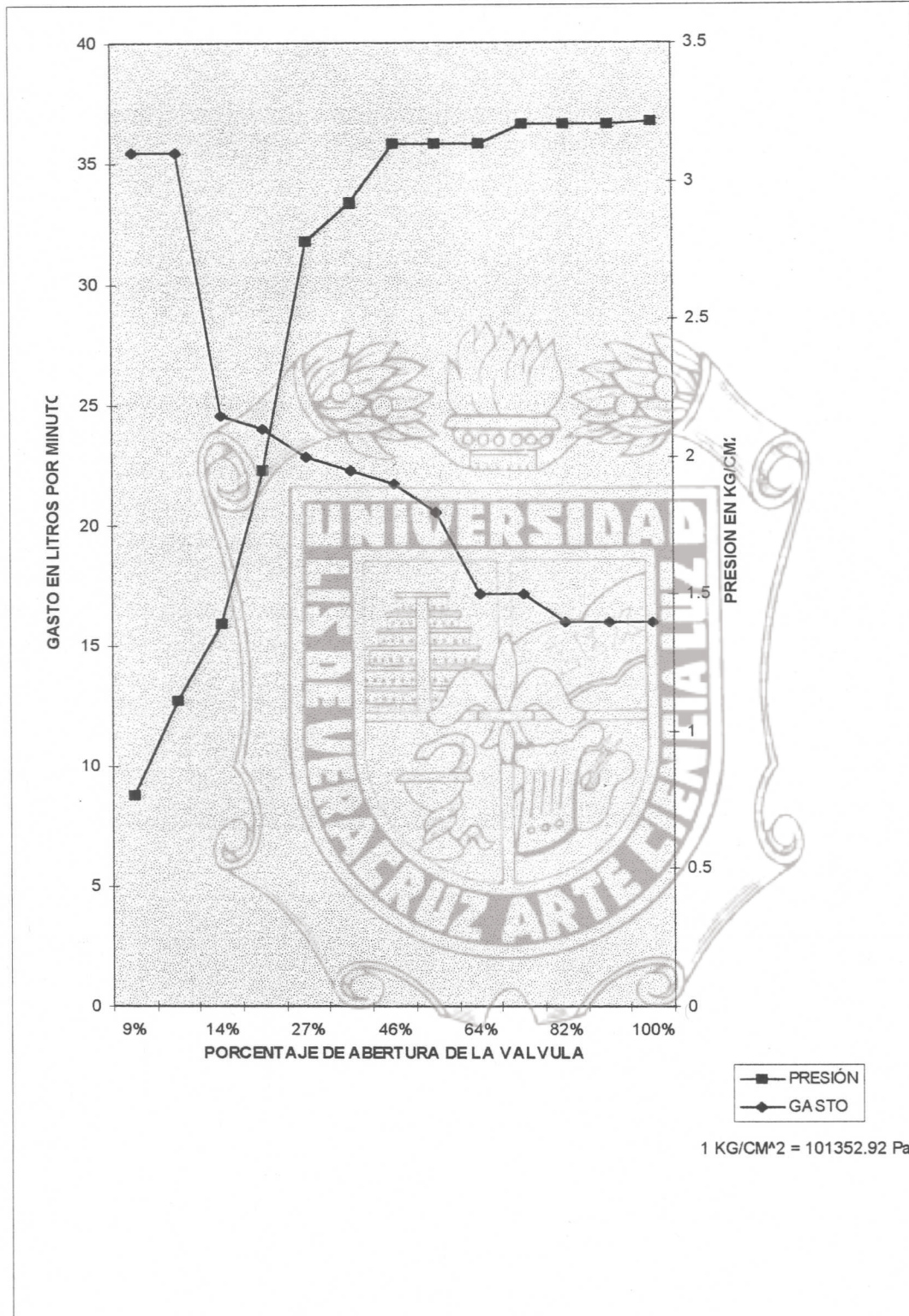
Gráfica 9.10 Relación de Trabajo Tirante-Tiempo durante su ciclo completo de trabajo



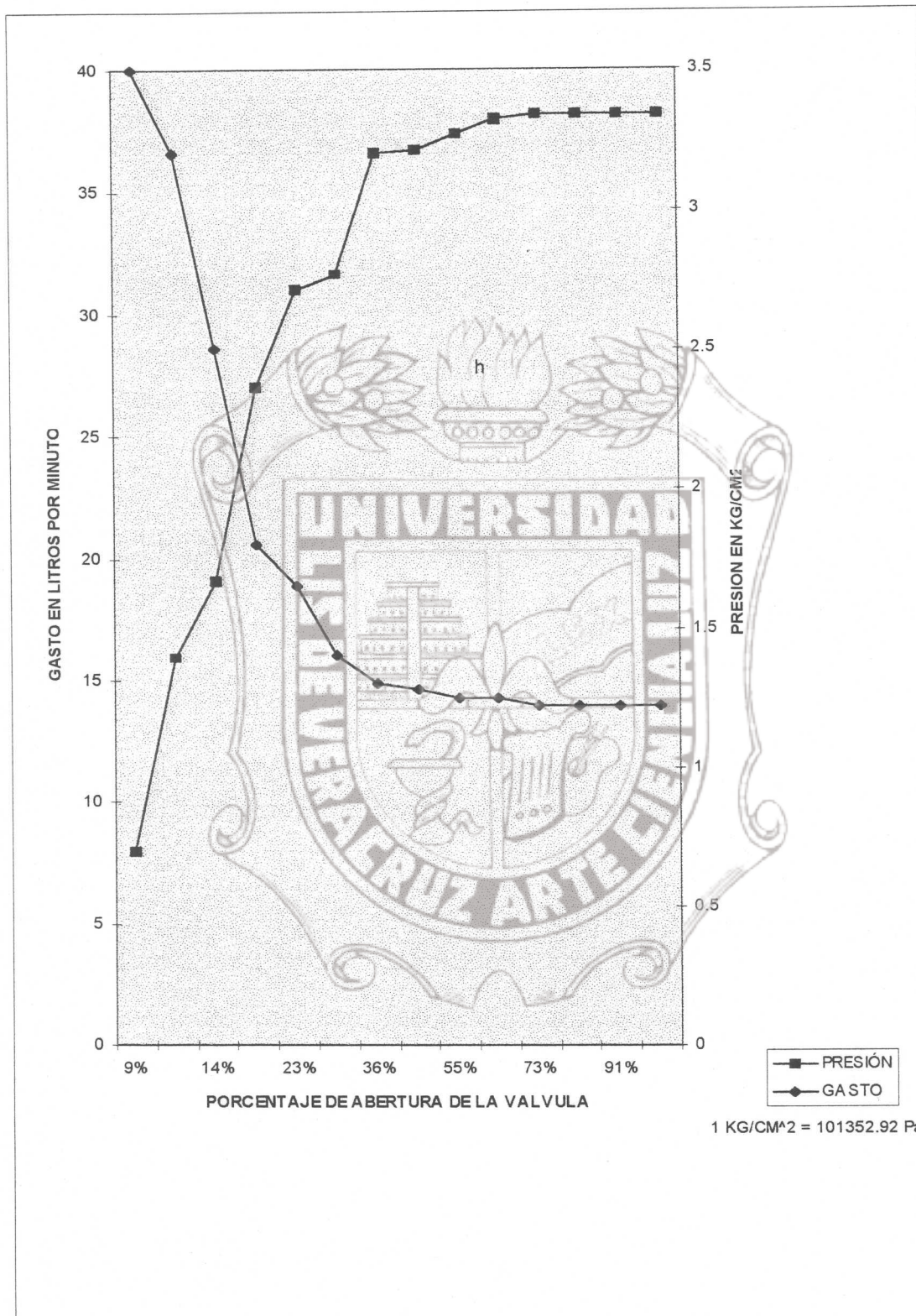
Gráfica 9.11 Relación de Trabajo Presión-Tiempo durante su ciclo completo de trabajo



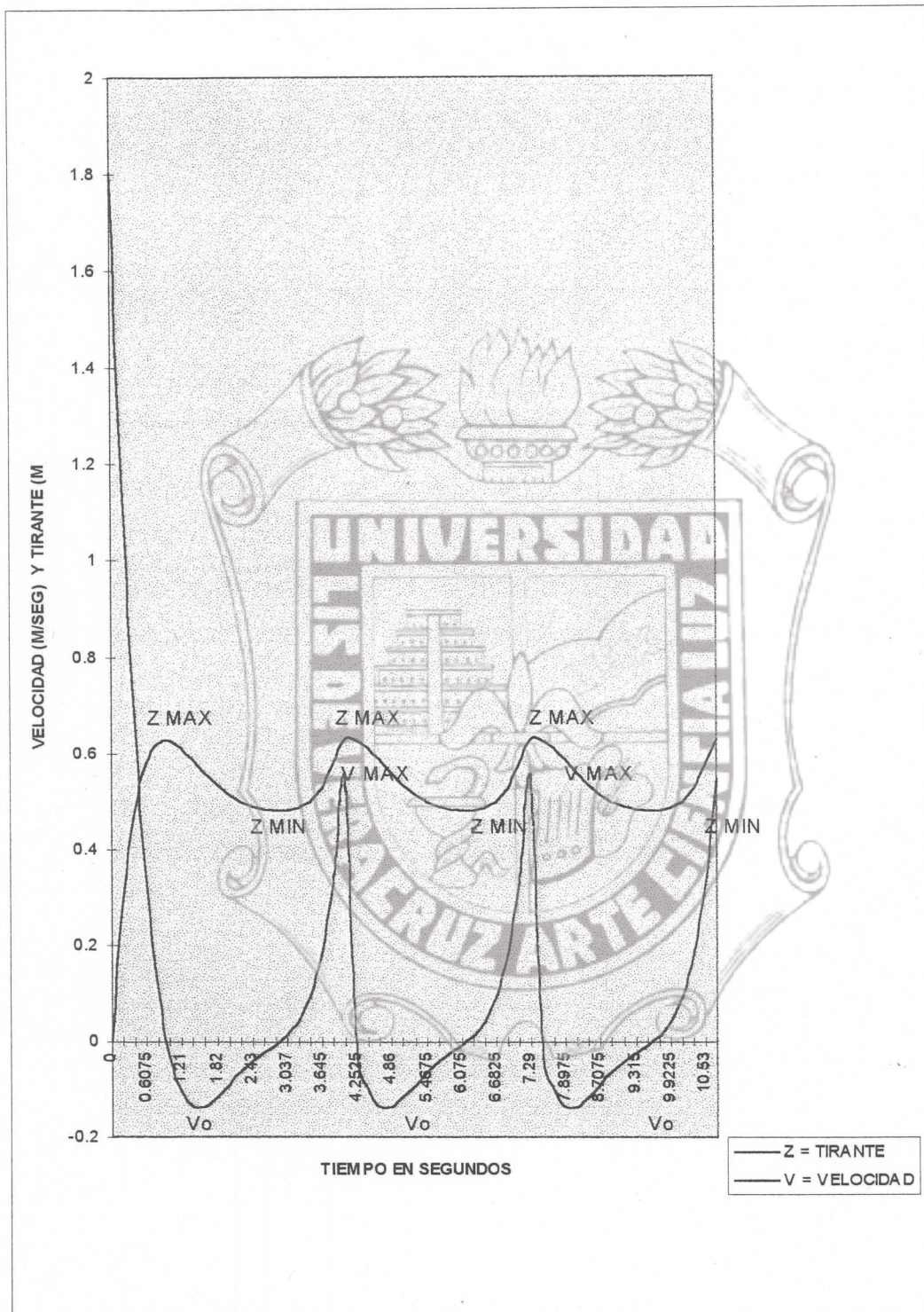
Gráfica 9.12 Operación del Ariete Hidráulico DTU-P4 con carrera mínima y diferentes aberturas.



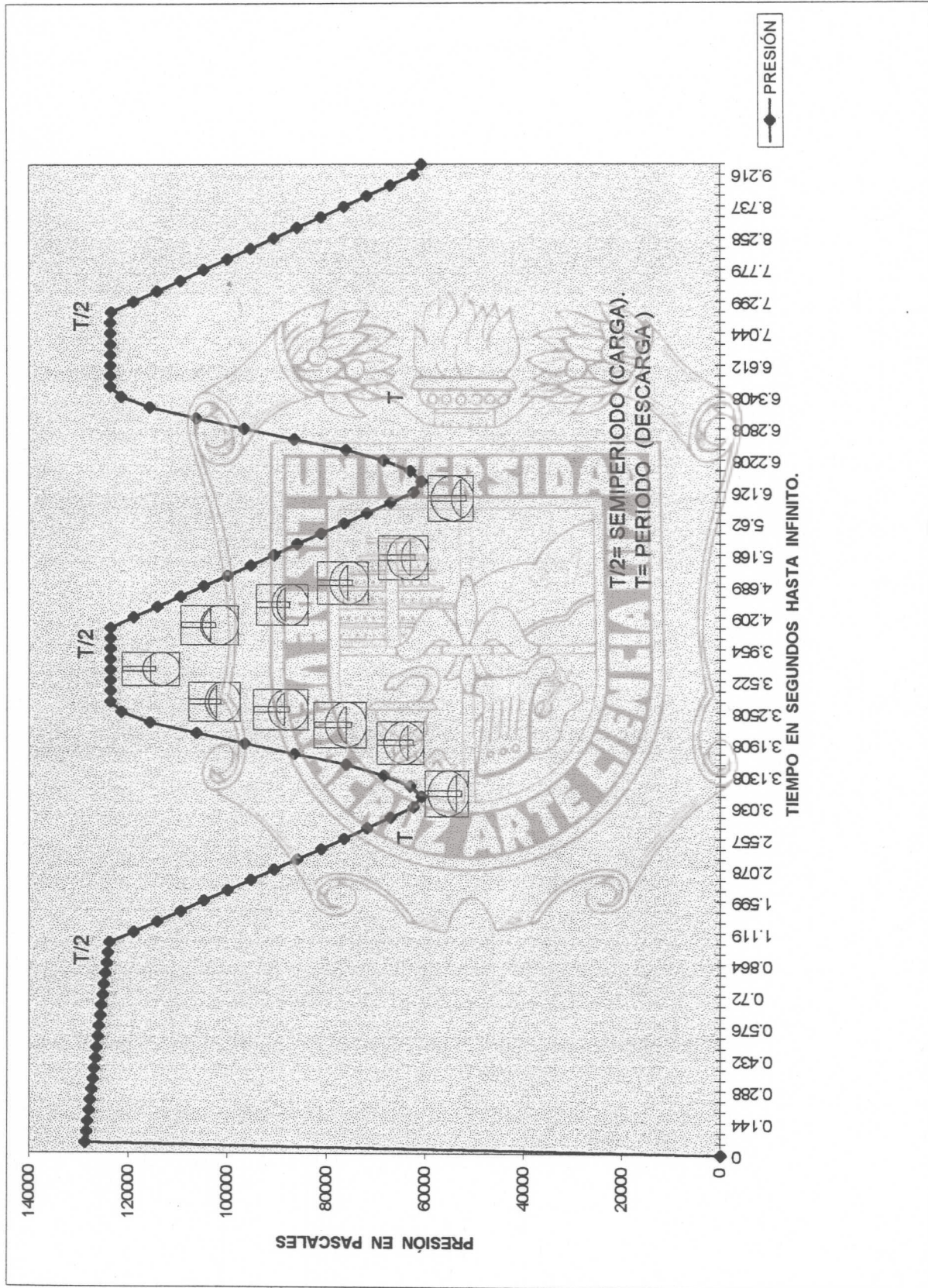
Gráfica 9.13 Operación del Ariete Hidráulico DTU-P4 con carrera mediana y diferentes aberturas.



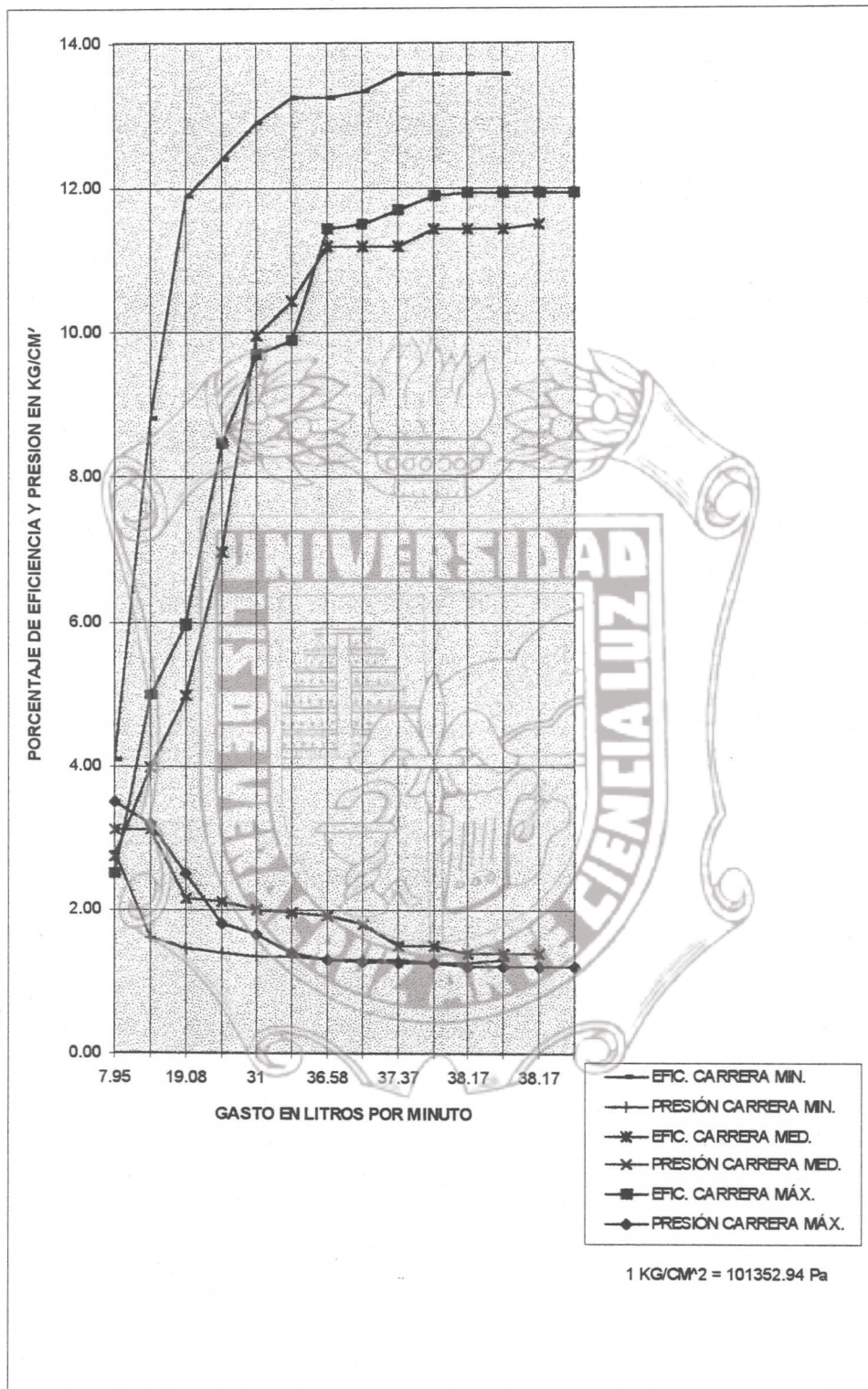
Gráfica 9.14 Operación del Ariete Hidráulico DTU-P4 con carrera máxima y diferentes aberturas



Gráfica 9.15 Relación Velocidad-Tirante-Tiempo durante el ciclo de trabajo del Ariete de acuerdo con el polinomio de Hermite.



Gráfica 9.16 Relación Presión-Tiempo del Resultado de la Interpolación de Hermite para todo el ciclo de operación



Gráfica 9.17 Eficiencias de operación del Ariete Hidráulico DTU-P4 a distintas carreras.

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana



Características de la tubería PVC Duralón® para agua potable

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD	INTERPRETACION
Densidad	1.4	GR/CM ³	Su bajo valor nos representa tener tuberías con menor peso al de los materiales tradicionales.
Resistencia A la Tensión A 23 °C	492	KG/CM ²	Resistencia a la Presión Hidráulica
Resistencia Al impacto Charpy a 23 °C	85	KG ----- CM/CM ²	Resistencia a golpes ocasionados en su manejo o instalación.
Dureza	78-82	SHORE D	Resistencia a la penetración punzo cortante.
Resistencia A la compresión 23 °C	633	KG/CM ²	Comportamiento frente a las cargas vivas o muertas.
Esfuerzo de Diseño Hidrostático	140	KG/CM ²	Garantiza la vida útil de las tuberías.
Coefficiente de Rugosidad Manning	0.009		Bajo coeficiente de fricción ofreciendo mínima resistencia al paso del agua.
Módulo de Elasticidad	28100	KG/CM ²	Respuesta al golpe de ariete.
Hermeticidad	EXCELENTE		Garantiza el flujo de agua conducida al no presentar fugas en sus uniones.

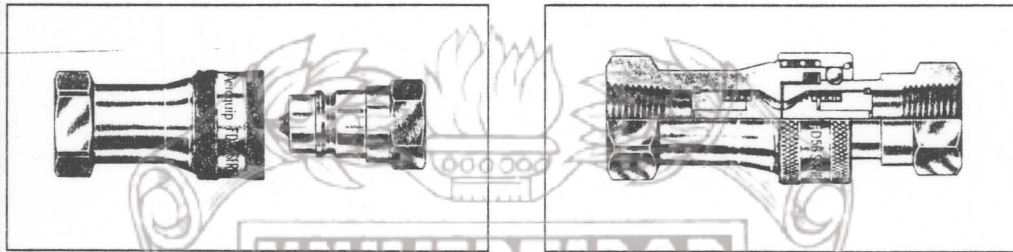
Datos tomados de tubos flexibles S.A. de C.V.

Coples de Conexión Rápida



Transferencia de Fluidos / Hidráulicos

Serie 5600/Industrial Intercambiable (Serie A)

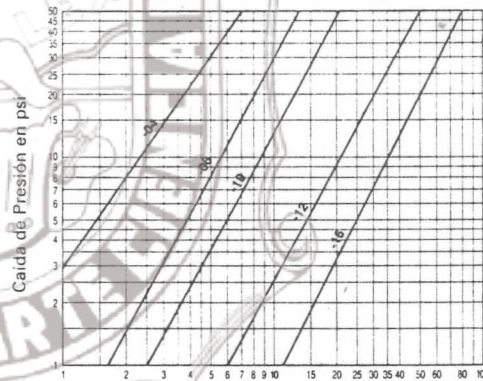


Los coples de la Serie 5600 para todo uso se caracterizan por su seguro PUSH-PULL™ y válvulas de pivote en un diseño compacto. Es muy comercial en los Estados Unidos y el extranjero.

- El seguro de balas PUSH-PULL™ facilita la rápida conexión y desconexión de la línea de fluido.
- Las válvulas de pivote autosellables proporcionan excelente capacidad de sellado para baja y alta presión.
- Cumple con estándares dimensionales de ISO 7241/1 Serie A.
- Las válvulas correntilíneas proporcionan mínima caída de presión.
- Material estándar del sello – Buna-N, EPR y Vitón.
- Material estándar del cuerpo – Acero zincado con guías de pivotes de zinc. (Guía de pivote de latón en tamaño -04.)

Datos de Flujo

Gráfico de Caída de Presión vs. Flujo



Flujo en Galones por Minuto

[Aceite Hidráulico Prueba de Fluido MIL-H-5606 a +38°C (+100°F)]

Características Físicas

Tamaño Cople	Presión para Trabajar (psi)	Presión Min. a Reventar (psi)	Asp. (plg./Hg.)	Flujo Nominal (gpm)	Inclusión Aire (cc. máx.)	Pérdida Fluido (cc. máx.)
-04	5,000	15,000	28	1	.50	.50
-06	4,000	12,000	28	6	1.5	1.3
-10	4,000	12,000	28	12	2.8	2.8
-12	4,000	12,000	28	28	10.0	8.2
-16	4,000	12,000	28	50	14.2	14.2

CARACTERISTICAS DE LAS VAVULAS DE COMPUERTA

ESTE TIPO DE VALVULA ES LA MAS INDICADA PARA USOS GENERALES, ESTA CARACTERISTICA ESTA BASADA EN SU GRAN VENTAJA DE FLUJO RECTO Y COMPLETO Y DEBERA OPERARSE COMPLETAMENTE ABIERTA O CERRADA. NO ES CONVENIENTE MANTENERLA EN POSICION DE REGULACION.

LAS CUÑAS SE FABRICAN DE BRONCE Y CUPRO NIQUEL. EL CUPRO NIQUEL ES UN MATERIAL MAS RESISTENTE AL DESGASTE POR FRICCION, EROSION O ABRASION.

LOS VASTAGOS PODRAN SER ASCENDENTES O NO ASCENDENTES CON ROSCA TIPO ACME DE ACCION RAPIDA.

FLUJO RECTO Y COMPLETO; ESTA VENTAJA TAN SIMPLE, ES TAN SIGNIFICATIVA QUE HACE QUE ESTE TIPO DE VALVULA SEA EL MAS ACEPTADO PARA USOS GENERALES.

LA GRAN AMPLITUD DEL EMPAQUE DE ASBESTO GRAFITADO Y PREMOLDEADO PERMITE UN SELLO PERFECTO ENTRE EL VASTAGO Y LA CABEZA.

LAS COMPUERTAS CON VASTAGO ASCENDENTE ESTAN DISEÑADAS PARA SER REEMPACADAS BAJO PRESION CUANDO LA VALVULA ESTA COMPLETAMENTE ABIERTA.

MINIMA CAIDA DE PRESION (POR SU FLUJO RECTO Y COMPLETO).

PROBADAS INDIVIDUALMENTE CON AGUA A PRESION O CON AIRE BAJO EL AGUA.

TODAS LAS VALVULAS URREA ESTAN FABRICADAS DE ACUERDO A NORMAS INTERNACIONALES Y NACIONALES. NOS HEMOS CONCENTRADO EN UTILIZAR LOS ULTIMOS ADELANTOS TECNICOS DE FUNDICION Y MAQUINADO PARA PRODUCIR UNA VALVULA ALTAMENTE EFICIENTE.

EL DISEÑO NO PERMITE REGULAR FLUJOS, UNA PEQUEÑA ABERTURA PROVOCA UNA ALTA VELOCIDAD DEL FLUJO Y PUEDE CAUSAR UNA EROSION EN LAS SUPERFICIES DE LOS ASIENTOS Y DEL DISCO, PUDIENDO PROVOCAR EL (FENOMENO DEL CORTE DE PELO) LLAMADO ASI PORQUE ES COMO SI UN CABELLO ESTUVIERA INCRUSTADO EN LA SUPERFICIE.

EL MAS USUAL ACTUALMENTE, SE FABRICA CON UNAS GUIAS EFECTIVAS, LAS CUALES SOPORTAN EL VIAJE DEL DISCO CUANDO SE OPERA Y EVITA EL CONTACTO ENTRE LOS ASIENTOS Y EL DISCO HASTA QUE SE REALIZA EL CIERRE, PROLONGANDO LA VIDA UTIL DE LA VALVULA. SE PUEDE INSTALAR EN CUALQUIER POSICION QUE SE REQUIERA SIN PROBLEMA DE QUE LA CUÑA SE SALGA DE SU LUGAR.

LAS VALVULAS CON CIERRE DE BRONCE A BRONCE NO SON LA MEJOR ELECCION PARA UNA OPERACION FRECUENTE. UN MOVIMIENTO REPETITIVO DEL DISCO CERCA DEL PUNTO DE CIERRE BAJO PRESION DEL FLUJO, CAUSARIA ASPEREZAS, MUESCAS EN LA SUPERFICIE DEL ASIEN TO EN LA CARA OPUESTA A LA DIRECCION DEL FLUJO. EN CAMBIO, CON UN CIERRE DE CUPRO NIQUEL A BRONCE, SE OBTIENE UN MEJOR RESULTADO Y AUN MAS SI EL DISCO Y ASIEN TO DE LA VALVULA SON DE SIMILAR DUREZA.

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana



*D Resumen de la solución del
gasto de la cámara a través de la
discretización lineal*

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

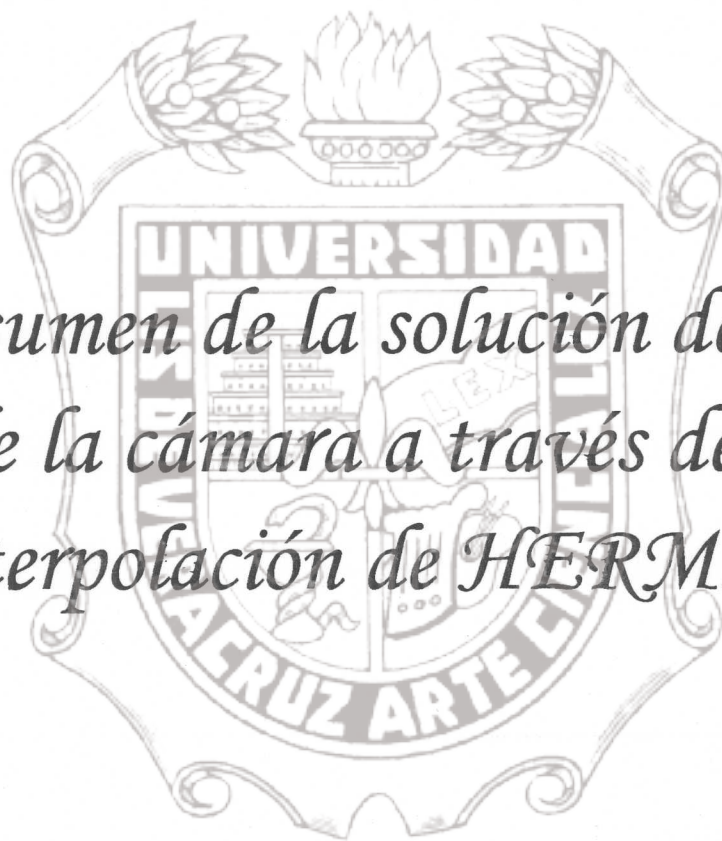
5.45E-01	124340.17	0.0014898	3.91E-04	5.8196E-07	6.307E-08	40	2.523E-06	3.10475E-06	0.00310475	0.7079931	0.828	0.09116072	8.11E-03	0.00073907	0.00177376	5.03265988
5.47E-01	124327.48	0.0014876	3.91E-04	5.8111E-07	6.3073E-08	40	2.523E-06	3.10404E-06	0.00310404	0.71109714	0.8304	0.08913135	8.11E-03	0.00072262	0.00173428	5.03439416
5.48E-01	124314.79	0.0014855	3.91E-04	5.8027E-07	6.3076E-08	40	2.523E-06	3.10333E-06	0.00310333	0.71420047	0.8328	0.08711385	8.11E-03	0.00070626	0.00169502	5.03608918
5.50E-01	124302.41	0.0014834	3.91E-04	5.7944E-07	6.308E-08	40	2.523E-06	3.10263E-06	0.00310263	0.71730331	0.8352	0.0851082	8.11E-03	0.00069	0.001656	5.03774518
5.51E-01	124289.41	0.0014812	3.91E-04	5.7861E-07	6.3083E-08	40	2.523E-06	3.10193E-06	0.00310193	0.72040503	0.8376	0.08311436	8.11E-03	0.00067383	0.0016172	5.03936238
5.53E-01	124276.72	0.0014791	3.91E-04	5.7779E-07	6.3086E-08	40	2.523E-06	3.10123E-06	0.00310123	0.72350626	0.84	0.08113229	8.11E-03	0.00065776	0.00157864	5.04094102
5.54E-01	124264.03	0.001477	3.91E-04	5.7697E-07	6.3089E-08	40	2.524E-06	3.10054E-06	0.00310054	0.7266068	0.8424	0.07916194	8.11E-03	0.00064179	0.0015403	5.04248131
5.56E-01	124251.36	0.0014749	3.91E-04	5.7615E-07	6.3093E-08	40	2.524E-06	3.09985E-06	0.00309985	0.72970665	0.8448	0.07725329	8.11E-03	0.00062511	0.00150219	5.04399635
5.58E-01	124238.66	0.0014729	3.91E-04	5.7533E-07	6.3096E-08	40	2.524E-06	3.09917E-06	0.00309917	0.73280582	0.8472	0.07520629	8.11E-03	0.00060844	0.0014643	5.04544478
5.59E-01	124225.96	0.0014708	3.91E-04	5.7452E-07	6.3099E-08	40	2.524E-06	3.09848E-06	0.00309848	0.73590043	0.8496	0.07332091	8.11E-03	0.00059444	0.00142664	5.04687445
5.61E-01	124213.27	0.0014687	3.91E-04	5.7372E-07	6.3102E-08	40	2.524E-06	3.09781E-06	0.00309781	0.73900021	0.852	0.0713971	8.11E-03	0.00057884	0.00138921	5.04826366
5.62E-01	124200.58	0.0014667	3.91E-04	5.7291E-07	6.3105E-08	40	2.524E-06	3.09713E-06	0.00309713	0.74209923	0.8544	0.06948483	8.11E-03	0.00056334	0.001352	5.04961566
5.64E-01	124187.89	0.0014646	3.91E-04	5.7211E-07	6.3108E-08	40	2.524E-06	3.09646E-06	0.00309646	0.74519569	0.8568	0.06758403	8.11E-03	0.00054792	0.00131502	5.05093068
5.66E-01	124175.2	0.0014626	3.91E-04	5.7131E-07	6.3112E-08	40	2.524E-06	3.09579E-06	0.00309579	0.74829148	0.8592	0.06569475	8.11E-03	0.00053261	0.00127826	5.05220894
5.67E-01	124162.51	0.0014605	3.91E-04	5.7052E-07	6.3115E-08	40	2.525E-06	3.09513E-06	0.00309513	0.75136661	0.8616	0.06381686	8.11E-03	0.00051738	0.00124172	5.05345066
5.69E-01	124149.82	0.0014585	3.91E-04	5.6973E-07	6.3118E-08	40	2.525E-06	3.09446E-06	0.00309446	0.75448107	0.864	0.06195036	8.11E-03	0.00050225	0.0012054	5.05465606
5.70E-01	124137.13	0.0014565	3.91E-04	5.6894E-07	6.3122E-08	40	2.525E-06	3.0938E-06	0.0030938	0.75757488	0.8664	0.06009521	8.11E-03	0.00048721	0.00116931	5.05582537
5.72E-01	124124.44	0.0014545	3.91E-04	5.6816E-07	6.3125E-08	40	2.525E-06	3.09315E-06	0.00309315	0.76066803	0.8688	0.05825136	8.11E-03	0.00047226	0.00113343	5.0569588
5.73E-01	124111.75	0.0014525	3.91E-04	5.6738E-07	6.3128E-08	40	2.525E-06	3.0925E-06	0.0030925	0.76376052	0.8712	0.05641879	8.11E-03	0.0004574	0.00109777	5.05808657
5.75E-01	124099.06	0.0014505	3.91E-04	5.666E-07	6.3131E-08	40	2.525E-06	3.09185E-06	0.00309185	0.76685237	0.8736	0.05459746	8.11E-03	0.00044264	0.00106233	5.0591189
5.76E-01	124086.37	0.0014485	3.91E-04	5.6582E-07	6.3134E-08	40	2.525E-06	3.0912E-06	0.0030912	0.76994358	0.876	0.05278732	8.11E-03	0.00042796	0.00102711	5.06014601
5.78E-01	124073.68	0.0014465	3.91E-04	5.6505E-07	6.3138E-08	40	2.526E-06	3.09056E-06	0.00309056	0.77303414	0.8784	0.05094834	8.11E-03	0.00041338	0.00099211	5.06113812
5.80E-01	124060.99	0.0014446	3.91E-04	5.6428E-07	6.3141E-08	40	2.526E-06	3.08992E-06	0.00308992	0.77612406	0.8808	0.04920045	8.11E-03	0.00039888	0.00095732	5.06209544
5.81E-01	124048.3	0.0014426	3.91E-04	5.6352E-07	6.3144E-08	40	2.526E-06	3.08929E-06	0.00308929	0.77921335	0.8832	0.04742371	8.11E-03	0.00038444	0.00092275	5.06301819
5.83E-01	124035.61	0.0014407	3.91E-04	5.6276E-07	6.3147E-08	40	2.526E-06	3.08866E-06	0.00308866	0.782302	0.8856	0.04565796	8.11E-03	0.00037016	0.00088839	5.06390658
5.84E-01	124022.92	0.0014387	3.91E-04	5.62E-07	6.3151E-08	40	2.526E-06	3.08802E-06	0.00308802	0.78539002	0.888	0.04390326	8.11E-03	0.00035594	0.00085425	5.06476083
5.86E-01	124010.23	0.0014368	3.91E-04	5.6124E-07	6.3154E-08	40	2.526E-06	3.0874E-06	0.0030874	0.78847742	0.8904	0.04215951	8.11E-03	0.00034184	0.00082032	5.06565811
5.87E-01	123997.54	0.0014349	3.91E-04	5.6049E-07	6.3157E-08	40	2.526E-06	3.08677E-06	0.00308677	0.79156542	0.8928	0.0404267	8.11E-03	0.00032775	0.0007866	5.06653676
5.89E-01	123984.85	0.0014329	3.91E-04	5.5974E-07	6.316E-08	40	2.526E-06	3.08616E-06	0.00308616	0.79465036	0.8952	0.03870479	8.11E-03	0.00031379	0.0007531	5.06712086
5.91E-01	123972.16	0.001431	3.91E-04	5.5899E-07	6.3164E-08	40	2.527E-06	3.08554E-06	0.0030854	0.79773568	0.8976	0.03699373	8.11E-03	0.00029992	0.00071981	5.06784066
5.92E-01	123959.47	0.0014291	3.91E-04	5.5825E-07	6.3167E-08	40	2.527E-06	3.08492E-06	0.00308492	0.80082081	0.9	0.03529535	8.11E-03	0.00028614	0.00068672	5.06852739
5.94E-01	123946.78	0.0014272	3.91E-04	5.5751E-07	6.317E-08	40	2.527E-06	3.08431E-06	0.00308431	0.80390512	0.9024	0.03361405	8.11E-03	0.00027244	0.00065385	5.06918124
5.95E-01	123934.09	0.0014253	3.91E-04	5.5677E-07	6.3173E-08	40	2.527E-06	3.0837E-06	0.0030837	0.80698982	0.9048	0.03197536	8.11E-03	0.00025883	0.00062119	5.06980243
5.97E-01	123921.4	0.0014235	3.91E-04	5.5604E-07	6.3176E-08	40	2.527E-06	3.0831E-06	0.0030831	0.81007191	0.9072	0.03032738	8.11E-03	0.00024531	0.00058873	5.07039116
5.98E-01	123908.71	0.0014216	3.91E-04	5.553E-07	6.318E-08	40	2.527E-06	3.08249E-06	0.00308249	0.81315444	0.9096	0.02866007	8.11E-03	0.00023187	0.00055649	5.07094765
6.00E-01	123896.02	0.0014197	3.91E-04	5.5457E-07	6.3183E-08	40	2.527E-06	3.08189E-06	0.00308189	0.8162363	0.912	0.02699534	8.11E-03	0.00021852	0.00052445	5.07147211
6.02E-01	123883.33	0.0014179	3.91E-04	5.5386E-07	6.3186E-08	40	2.527E-06	3.0813E-06	0.0030813	0.81931759	0.9144	0.02531733	8.11E-03	0.00020526	0.00049261	5.07196471
6.04E-01	123870.64	0.0014161	3.91E-04	5.5312E-07	6.3189E-08	40	2.528E-06	3.0807E-06	0.0030807	0.82239829	0.9168	0.02369193	8.11E-03	0.00019208	0.00046098	5.0724257
6.06E-01	123857.95	0.0014142	3.91E-04	5.524E-07	6.3193E-08	40	2.528E-06	3.08011E-06	0.00308011	0.82547841	0.9192	0.02207686	8.11E-03	0.00017898	0.00042956	5.07285526
6.08E-01	123845.26	0.0014123	3.91E-04	5.5169E-07	6.3196E-08	40	2.528E-06	3.0795E-06	0.00307952	0.82856793	0.9216	0.02047237	8.11E-03	0.00016598	0.00039834	5.07325336
6.09E-01	123832.57	0.0014105	3.91E-04	5.5097E-07	6.3199E-08	40	2.528E-06	3.07894E-06	0.00307894	0.83163686	0.924	0.01887835	8.11E-03	0.00015305	0.00036733	5.07362092
6.10E-01	123819.88	0.0014087	3.91E-04	5.5026E-07	6.3202E-08	40	2.528E-06	3.07835E-06	0.00307835	0.83471522	0.9264	0.01729474	8.11E-03	0.00014021	0.00033651	5.07395744
6.11E-01	123807.19	0.0014068	3.91E-04	5.4955E-07	6.3206E-08	40	2.528E-06	3.0777E-06	0.0030777	0.83779299	0.9288	0.01572152	8.11E-03	0.00012746	0.0003059	5.07426334
6.13E-01	123794.5	0.001405	3.91E-04	5.4884E-07	6.3209E-08	40	2.528E-06	3.0772E-06	0.0030772	0.84087019	0.9312	0.01415864	8.11E-03	0.00011479	0.00027549	5.07453883
6.14E-01	123781.81	0.0014032	3.91E-04	5.4814E-07	6.3212E-08	40	2.528E-06	3.07662E-06	0.00307662	0.84394681	0.9336	0.01260607	8.11E-03	0.00010222	0.00024528	5.07478412
6.16E-01	123769.12	0.0014014	3.91E-04	5.4744E-07	6.3215E-08	40	2.529E-06	3.07605E-06	0.00307605	0.84702286	0.936	0.01106378	8.11E-03	9.9698E-05	0.00021527	5.07499939
6.17E-01	123756.43	0.0013996	3.91E-04	5.4674E-07	6.3219E-08	40	2.529E-06	3.07548E-06	0.00307548	0.85009834	0.9384	0.00953173	8.11E-03	7.7277E-05	0.00018546	5.07518485
6.19E-01	123743.74	0.0013979	3.91E-04	5.4604E-07	6.3222E-08	40	2.529E-06	3.07492E-06	0.00307492	0.85317326	0.9408	0.00800988	8.11E-03	4.4783E-06	1.0748E-05	5.07568269
6.21E-01	123731.05	0.0013961	3.91E-04	5.4535E-07	6.3225E-08	40	2.529E-06	3.07435E-06	0.00307435	0.85624761	0.9432	0.00649819	8.11E-03	2.6883E-05	0.00015585	5.07534071
6.22E-01	123718.36	0.0013943	3.91E-04	5.4466E-07	6.3228E-08	40	2.529E-06	3.07379E-06	0.00307379	0.8593214	0.9456	0.00509663	8.11E-03	4.0509E-05	9.7222E-05	5.07556637
6.24E-01	123705.67	0.0013926	3.91E-04	5.4397E-07	6.3232E-08	40	2.529E-06	3.07323E-06	0.00307323	0.86239463	0.948	0.00355017	8.11E-03	6.8202E-05	5.07563257	
6.25E-01	123692.98	0														

fase de descarga															
y(m)	Prestion(Pa)	k1/y*0.5	dy/dt	fraccion	dp/dt	fraccion	Q(m ³ /pul)	Qvol/puls	Q vol acum	delta tiempo a	t	v	Ao	Q	Q real
0.02989999	123650.58	0.0013859	1.76E-04	2.4394E-07	6.3246E-08	40	2.53E-06	2.7737E-06	0.00277377	0.00E+00	0.96	-0.003802	8.11E-03	0	0
6.30E-01	123493.48	0.001386	1.76E-04	2.4401E-07	6.3286E-08	40	2.531E-06	2.77648E-06	0.0054921	5.33E-03	9.65E-01	-0.0069651	8.11E-03	0.00016414	0.00016414
6.29E-01	123336.38	0.0013864	1.76E-04	2.4408E-07	6.3326E-08	40	2.533E-06	2.77713E-06	0.00832635	0.010665	9.71E-01	-0.01100801	8.11E-03	0.0003007	0.00046483
6.28E-01	123179.29	0.0013868	1.76E-04	2.4418E-07	6.3387E-08	40	2.535E-06	2.77882E-06	0.01140516	0.015975	9.76E-01	-0.0131471	8.11E-03	0.00043517	0.0009
6.28E-01	123022.19	0.0013872	1.76E-04	2.4423E-07	6.3407E-08	40	2.538E-06	2.78051E-06	0.01388667	0.0213	9.81E-01	-0.01616687	8.11E-03	0.00056758	0.00146758
6.28E-01	122865.09	0.0013876	1.76E-04	2.443E-07	6.3447E-08	40	2.538E-06	2.78222E-06	0.01668788	0.028625	9.87E-01	-0.0191391	8.11E-03	0.00069794	0.00216552
6.28E-01	122708	0.0013881	1.76E-04	2.4438E-07	6.3488E-08	40	2.54E-06	2.7839E-06	0.01945178	0.03195	9.92E-01	-0.0220849	8.11E-03	0.00082626	0.00299178
6.27E-01	122550.9	0.0013885	1.76E-04	2.4445E-07	6.3528E-08	40	2.541E-06	2.7856E-06	0.02228738	0.037275	9.97E-01	-0.0249443	8.11E-03	0.00095257	0.00394436
6.27E-01	122393.7	0.0013889	1.76E-04	2.4452E-07	6.357E-08	40	2.543E-06	2.7873E-06	0.02502468	0.0426	1.00E+00	-0.0277778	8.11E-03	0.00107688	0.00502124
6.27E-01	122236.7	0.0013893	1.76E-04	2.446E-07	6.361E-08	40	2.544E-06	2.78901E-06	0.02781369	0.047925	1.01E+00	-0.0305656	8.11E-03	0.00119921	0.00622044
6.28E-01	122079.61	0.0013897	1.76E-04	2.4467E-07	6.3651E-08	40	2.548E-06	2.79143E-06	0.03038668	0.05325	1.02E+00	-0.0333083	8.11E-03	0.00131956	0.00754
6.28E-01	121922.51	0.0013901	1.76E-04	2.4474E-07	6.3692E-08	40	2.548E-06	2.7932E-06	0.03338668	0.05875	1.02E+00	-0.0360061	8.11E-03	0.00143797	0.00897797
6.28E-01	121765.41	0.0013908	1.76E-04	2.4482E-07	6.3733E-08	40	2.548E-06	2.79491E-06	0.036191	0.0639	1.02E+00	-0.0386595	8.11E-03	0.00155444	0.01053241
6.28E-01	121608.32	0.001391	1.76E-04	2.4489E-07	6.3774E-08	40	2.551E-06	2.79687E-06	0.0386687	0.069225	1.03E+00	-0.0412688	8.11E-03	0.00166899	0.01220139
6.24E-01	121451.22	0.0013918	1.76E-04	2.4496E-07	6.3816E-08	40	2.553E-06	2.79797E-06	0.04178446	0.07455	1.03E+00	-0.0438343	8.11E-03	0.00178163	0.01398302
6.24E-01	121294.12	0.001392	1.76E-04	2.4504E-07	6.3857E-08	40	2.554E-06	2.79932E-06	0.04458378	0.079875	1.04E+00	-0.0463565	8.11E-03	0.00189239	0.01587541
6.24E-01	121137.02	0.0013922	1.76E-04	2.4511E-07	6.3898E-08	40	2.558E-06	2.80105E-06	0.04738483	0.0852	1.05E+00	-0.0488358	8.11E-03	0.00200128	0.01787669
6.24E-01	120979.93	0.0013926	1.76E-04	2.4518E-07	6.394E-08	40	2.558E-06	2.80278E-06	0.05018761	0.090525	1.05E+00	-0.0512724	8.11E-03	0.00210831	0.019985
6.23E-01	120822.83	0.0013931	1.76E-04	2.4526E-07	6.3981E-08	40	2.559E-06	2.80452E-06	0.05299212	0.09585	1.06E+00	-0.0536667	8.11E-03	0.0022135	0.021985
6.23E-01	120665.73	0.0013935	1.76E-04	2.4533E-07	6.4023E-08	40	2.561E-06	2.80628E-06	0.05578638	0.101175	1.06E+00	-0.0560192	8.11E-03	0.00231687	0.02451537
6.22E-01	120508.64	0.0013939	1.76E-04	2.4541E-07	6.4065E-08	40	2.563E-06	2.808E-06	0.05860638	0.1065	1.07E+00	-0.0583301	8.11E-03	0.00241843	0.0269338
6.22E-01	120351.54	0.0013943	1.76E-04	2.4548E-07	6.4107E-08	40	2.564E-06	2.80974E-06	0.06141612	0.111825	1.07E+00	-0.0605999	8.11E-03	0.00251819	0.02945199
6.22E-01	120194.44	0.0013947	1.76E-04	2.4555E-07	6.4148E-08	40	2.566E-06	2.81148E-06	0.06422762	0.11715	1.08E+00	-0.0628288	8.11E-03	0.00261618	0.032066818
6.21E-01	120037.35	0.0013952	1.76E-04	2.4563E-07	6.4189E-08	40	2.568E-06	2.81325E-06	0.06704066	0.122475	1.09E+00	-0.0650173	8.11E-03	0.00271241	0.03478059
6.21E-01	119880.25	0.0013956	1.76E-04	2.457E-07	6.4233E-08	40	2.568E-06	2.815E-06	0.06985866	0.1278	1.09E+00	-0.0671657	8.11E-03	0.00280689	0.03758748
6.20E-01	119723.15	0.001396	1.76E-04	2.4578E-07	6.4276E-08	40	2.571E-06	2.81676E-06	0.07267263	0.133125	1.09E+00	-0.0692743	8.11E-03	0.00289964	0.04048711
6.19E-01	119566.05	0.0013964	1.76E-04	2.4585E-07	6.4317E-08	40	2.573E-06	2.81852E-06	0.07549115	0.13845	1.10E+00	-0.0713435	8.11E-03	0.00299067	0.0434778
6.19E-01	119408.96	0.0013969	1.76E-04	2.4592E-07	6.4359E-08	40	2.574E-06	2.82029E-06	0.07831144	0.143775	1.10E+00	-0.0733737	8.11E-03	0.00308	0.04655779
6.19E-01	119251.86	0.0013973	1.76E-04	2.46E-07	6.4402E-08	40	2.576E-06	2.82208E-06	0.0811335	0.1491	1.11E+00	-0.0753652	8.11E-03	0.00316765	0.04972544
6.19E-01	119094.76	0.0013977	1.76E-04	2.4607E-07	6.4444E-08	40	2.578E-06	2.82383E-06	0.08395733	0.154425	1.11E+00	-0.0773184	8.11E-03	0.00325362	0.05297906
6.19E-01	118937.67	0.0013981	1.76E-04	2.4615E-07	6.4487E-08	40	2.579E-06	2.82561E-06	0.08678294	0.15975	1.12E+00	-0.0792335	8.11E-03	0.00333794	0.056317
6.18E-01	118780.57	0.0013985	1.76E-04	2.4622E-07	6.4529E-08	40	2.581E-06	2.82739E-06	0.08961034	0.165075	1.13E+00	-0.081111	8.11E-03	0.00342062	0.05973763
6.18E-01	118623.47	0.0013989	1.76E-04	2.463E-07	6.4572E-08	40	2.583E-06	2.82917E-06	0.0924395	0.1704	1.13E+00	-0.0829512	8.11E-03	0.00350168	0.0632393
6.18E-01	118466.37	0.0013994	1.76E-04	2.4637E-07	6.4615E-08	40	2.585E-06	2.83096E-06	0.09527046	0.175725	1.14E+00	-0.0847544	8.11E-03	0.00358112	0.06682042
6.17E-01	118309.28	0.0013998	1.76E-04	2.4645E-07	6.4658E-08	40	2.586E-06	2.83275E-06	0.09810321	0.18105	1.14E+00	-0.0865209	8.11E-03	0.00365897	0.07047939
6.17E-01	118152.18	0.0014002	1.76E-04	2.4652E-07	6.4701E-08	40	2.588E-06	2.83454E-06	0.10093775	0.186375	1.15E+00	-0.0882512	8.11E-03	0.00373523	0.07421462
6.16E-01	117995.08	0.0014007	1.76E-04	2.466E-07	6.4744E-08	40	2.59E-06	2.83634E-06	0.10377409	0.1917	1.15E+00	-0.0899456	8.11E-03	0.00380993	0.07802456
6.16E-01	117837.99	0.0014011	1.76E-04	2.4667E-07	6.4787E-08	40	2.591E-06	2.83814E-06	0.10661223	0.197025	1.16E+00	-0.0916043	8.11E-03	0.00388308	0.08190763
6.15E-01	117680.89	0.0014016	1.76E-04	2.4675E-07	6.483E-08	40	2.593E-06	2.83995E-06	0.10945213	0.20235	1.16E+00	-0.0932277	8.11E-03	0.00395469	0.08586232
6.15E-01	117523.79	0.001402	1.76E-04	2.4682E-07	6.4873E-08	40	2.595E-06	2.84175E-06	0.11229393	0.207675	1.17E+00	-0.0948162	8.11E-03	0.00402477	0.08988709
6.15E-01	117366.6	0.0014024	1.76E-04	2.469E-07	6.4917E-08	40	2.597E-06	2.84356E-06	0.1151375	0.213	1.17E+00	-0.09637	8.11E-03	0.00409335	0.09398044
6.15E-01	117209.5	0.0014028	1.76E-04	2.4697E-07	6.496E-08	40	2.598E-06	2.84538E-06	0.11798288	0.218325	1.18E+00	-0.0978896	8.11E-03	0.00416043	0.09814068
6.14E-01	117052.5	0.0014032	1.76E-04	2.4705E-07	6.5004E-08	40	2.6E-06	2.8472E-06	0.12083007	0.22365	1.18E+00	-0.0993752	8.11E-03	0.00422603	0.10236691
6.14E-01	116895.4	0.0014037	1.76E-04	2.4712E-07	6.5047E-08	40	2.602E-06	2.84902E-06	0.12367909	0.228975	1.19E+00	-0.1008272	8.11E-03	0.00429017	0.10665708
6.13E-01	116738.31	0.0014041	1.76E-04	2.472E-07	6.5091E-08	40	2.604E-06	2.85085E-06	0.12652984	0.2343	1.19E+00	-0.1022459	8.11E-03	0.00435286	0.11100994
6.13E-01	116581.21	0.0014045	1.76E-04	2.4727E-07	6.5139E-08	40	2.605E-06	2.85267E-06	0.12938261	0.239625	1.20E+00	-0.1036316	8.11E-03	0.0044141	0.1154204

Solución por medio de la discretización lineal para encontrar la presión y la velocidad durante el ciclo de operación

delta tiempo
 K3=Cd Ao Zg 5.33E-03
 K1=Cd Ao Zg*0.5/2
 K2=Cd Ao (2/ro)* 5
 2.22E-05

6.0900E-01	116883.96	0.0014083	3.91E-04	5.805E-07	6.805E-08	0	0	5.60166807	0.0005705	0.5032683	0.8236	0.39156	0.39181792	8.11E-03	0.00762381	0.9882338
6.0938E-01	117041.1	0.0014088	3.91E-04	5.5032E-07	6.5007E-08	0	0	5.60232E-07	0.00055033	0.50311863	0.828	3.918	0.39422434	8.11E-03	0.00767064	0.99590444
6.0975E-01	117198.16	0.0014084	3.91E-04	5.5016E-07	6.4963E-08	0	0	5.50157E-07	0.00055016	0.50366879	0.8304	3.9204	0.39662425	8.11E-03	0.00771768	1.0036217
6.1013E-01	117355.25	0.001408	3.91E-04	5.4999E-07	6.492E-08	0	0	5.49989E-07	0.00054999	0.50421878	0.8328	3.9228	0.39907168	8.11E-03	0.00776495	1.01138708
6.1050E-01	117512.35	0.0014075	3.91E-04	5.4982E-07	6.4876E-08	0	0	5.49819E-07	0.00054982	0.50476826	0.8352	3.9252	0.40151267	8.11E-03	0.00781245	1.01919953
6.1088E-01	117669.45	0.0014071	3.91E-04	5.4965E-07	6.4833E-08	0	0	5.4965E-07	0.00054965	0.50531825	0.8376	3.9272	0.40396526	8.11E-03	0.00786017	1.0270597
6.1125E-01	117826.55	0.0014067	3.91E-04	5.4948E-07	6.479E-08	0	0	5.49482E-07	0.00054948	0.50586773	0.84	3.93	0.40642949	8.11E-03	0.00790812	1.03496782
6.1163E-01	117983.64	0.0014062	3.91E-04	5.4931E-07	6.4747E-08	0	0	5.49313E-07	0.00054931	0.50641704	0.8424	3.9324	0.40890539	8.11E-03	0.00795629	1.04292412
6.1200E-01	118140.74	0.0014058	3.91E-04	5.4914E-07	6.4704E-08	0	0	5.49145E-07	0.00054914	0.50696619	0.8448	3.9348	0.41139301	8.11E-03	0.0080047	1.05092881
6.1238E-01	118297.84	0.0014054	3.91E-04	5.4898E-07	6.4661E-08	0	0	5.48977E-07	0.00054898	0.50751516	0.8472	3.9372	0.41389239	8.11E-03	0.00805333	1.05898214
6.1275E-01	118454.93	0.001405	3.91E-04	5.4881E-07	6.4618E-08	0	0	5.48809E-07	0.00054881	0.50806397	0.8496	3.9396	0.41640355	8.11E-03	0.00810219	1.06708433
6.1313E-01	118612.03	0.0014045	3.91E-04	5.4864E-07	6.4575E-08	0	0	5.4864E-07	0.00054864	0.50861128	0.852	3.942	0.41892655	8.11E-03	0.00815128	1.07523562
6.1350E-01	118769.13	0.0014041	3.91E-04	5.4847E-07	6.4532E-08	0	0	5.4847E-07	0.00054847	0.50916105	0.8544	3.9444	0.42146141	8.11E-03	0.00820026	1.08343622
6.1388E-01	118926.22	0.0014037	3.91E-04	5.4831E-07	6.4489E-08	0	0	5.48308E-07	0.00054831	0.50970939	0.8568	3.9468	0.42400818	8.11E-03	0.00825016	1.09168638
6.1425E-01	119083.32	0.0014032	3.91E-04	5.4814E-07	6.4447E-08	0	0	5.4813E-07	0.00054814	0.51025753	0.8592	3.9492	0.42656669	8.11E-03	0.00830994	1.09998632
6.1463E-01	119240.42	0.0014028	3.91E-04	5.4797E-07	6.4405E-08	0	0	5.4797E-07	0.00054814	0.51080658	0.8616	3.9516	0.4291376	8.11E-03	0.00834996	1.10833629
6.1500E-01	119397.52	0.0014024	3.91E-04	5.478E-07	6.4362E-08	0	0	5.4780E-07	0.00054814	0.51135333	0.864	3.954	0.43172033	8.11E-03	0.00839002	1.1167365
6.1538E-01	119554.61	0.001402	3.91E-04	5.4764E-07	6.432E-08	0	0	5.4763E-07	0.00054814	0.51190094	0.8664	3.9564	0.43431512	8.11E-03	0.00843011	1.12518721
6.1575E-01	119711.71	0.0014015	3.91E-04	5.4747E-07	6.428E-08	0	0	5.4747E-07	0.00054747	0.51244844	0.8688	3.9588	0.43692202	8.11E-03	0.00847017	1.13368864
6.1613E-01	119868.81	0.0014011	3.91E-04	5.473E-07	6.4238E-08	0	0	5.4730E-07	0.0005473	0.51299571	0.8712	3.9612	0.43954105	8.11E-03	0.00851439	1.14224103
6.1650E-01	120025.9	0.0014007	3.91E-04	5.4714E-07	6.4194E-08	0	0	5.4713E-07	0.00054714	0.51354285	0.8736	3.9636	0.44217227	8.11E-03	0.00855839	1.15084461
6.1688E-01	120183.02	0.0014002	3.91E-04	5.4697E-07	6.4152E-08	0	0	5.4697E-07	0.00054697	0.51409092	0.876	3.966	0.44481571	8.11E-03	0.00860239	1.15949963
6.1725E-01	120340.1	0.0013998	3.91E-04	5.468E-07	6.4111E-08	0	0	5.4680E-07	0.0005468	0.51463863	0.8784	3.9684	0.4474714	8.11E-03	0.00864639	1.16820633
6.1763E-01	120497.2	0.0013994	3.91E-04	5.4664E-07	6.4068E-08	0	0	5.4663E-07	0.00054664	0.51518627	0.8808	3.9708	0.45013939	8.11E-03	0.00869039	1.17696494
6.1800E-01	120654.29	0.001399	3.91E-04	5.4647E-07	6.4026E-08	0	0	5.4647E-07	0.00054647	0.51573474	0.8832	3.9732	0.45281972	8.11E-03	0.00873439	1.1857757
6.1838E-01	120811.39	0.0013985	3.91E-04	5.4631E-07	6.3984E-08	0	0	5.4630E-07	0.00054631	0.51628219	0.8856	3.9756	0.45551243	8.11E-03	0.00877839	1.19463885
6.1875E-01	120968.49	0.0013981	3.91E-04	5.4614E-07	6.3943E-08	0	0	5.4614E-07	0.00054614	0.51682916	0.888	3.978	0.45821756	8.11E-03	0.00882239	1.20355464
6.1913E-01	121125.58	0.0013977	3.91E-04	5.4598E-07	6.3901E-08	0	0	5.4598E-07	0.00054598	0.51737616	0.8904	3.9804	0.46093514	8.11E-03	0.00886639	1.2125233
6.1950E-01	121282.68	0.0013973	3.91E-04	5.4581E-07	6.386E-08	0	0	5.4581E-07	0.00054581	0.51792397	0.8928	3.9828	0.46365239	8.11E-03	0.00891039	1.22145409
6.1988E-01	121439.78	0.0013969	3.91E-04	5.4565E-07	6.3819E-08	0	0	5.4565E-07	0.00054565	0.51847162	0.8952	3.9852	0.46636962	8.11E-03	0.00895439	1.23038484
6.2025E-01	121596.87	0.0013964	3.91E-04	5.4548E-07	6.3777E-08	0	0	5.4548E-07	0.00054548	0.51902051	0.8976	3.9876	0.46908685	8.11E-03	0.00900039	1.2393149
6.2063E-01	121753.97	0.001396	3.91E-04	5.4532E-07	6.3736E-08	0	0	5.4532E-07	0.00054532	0.51956904	0.9	3.99	0.47179303	8.11E-03	0.00904639	1.24824161
6.2100E-01	121911.07	0.0013956	3.91E-04	5.4515E-07	6.3695E-08	0	0	5.4515E-07	0.00054515	0.52011755	0.9024	3.9924	0.47447127	8.11E-03	0.00909239	1.25716833
6.2138E-01	122068.17	0.0013952	3.91E-04	5.4499E-07	6.3654E-08	0	0	5.4499E-07	0.00054499	0.52066606	0.9048	3.9948	0.47715043	8.11E-03	0.00913839	1.26609505
6.2175E-01	122225.26	0.0013947	3.91E-04	5.4482E-07	6.3613E-08	0	0	5.4482E-07	0.00054482	0.52121457	0.9072	3.9972	0.48003032	8.11E-03	0.00918439	1.27502176
6.2213E-01	122382.36	0.0013943	3.91E-04	5.4466E-07	6.3572E-08	0	0	5.4466E-07	0.00054466	0.52176303	0.9096	3.9996	0.48281289	8.11E-03	0.00923039	1.28394847
6.2250E-01	122539.46	0.0013939	3.91E-04	5.4449E-07	6.3532E-08	0	0	5.4449E-07	0.00054449	0.52231154	0.912	4.002	0.48559646	8.11E-03	0.00927639	1.29287518
6.2288E-01	122696.55	0.0013935	3.91E-04	5.4433E-07	6.3491E-08	0	0	5.4433E-07	0.00054433	0.52286006	0.9144	4.0044	0.48838049	8.11E-03	0.00932239	1.30180189
6.2325E-01	122853.65	0.0013931	3.91E-04	5.4417E-07	6.345E-08	0	0	5.4417E-07	0.00054417	0.52340858	0.9168	4.0068	0.49116202	8.11E-03	0.00936839	1.31072861
6.2363E-01	123010.75	0.0013927	3.91E-04	5.44E-07	6.341E-08	0	0	5.4400E-07	0.000544	0.5239571	0.9192	4.0092	0.49394328	8.11E-03	0.00941439	1.31965532
6.2400E-01	123167.84	0.0013922	3.91E-04	5.4384E-07	6.3369E-08	0	0	5.4384E-07	0.00054384	0.52450562	0.9216	4.0116	0.49672453	8.11E-03	0.00946039	1.32858203
6.2438E-01	123324.94	0.0013918	3.91E-04	5.4368E-07	6.3328E-08	0	0	5.4368E-07	0.00054368	0.52505414	0.924	4.014	0.49950578	8.11E-03	0.00950639	1.33750874
6.2475E-01	123482.04	0.0013914	3.91E-04	5.4352E-07	6.3287E-08	0	0	5.4352E-07	0.00054352	0.52560266	0.9264	4.0164	0.50228703	8.11E-03	0.00955239	1.34643545
6.2513E-01	123639.14	0.001391	3.91E-04	5.4336E-07	6.3246E-08	0	0	5.4336E-07	0.00054336	0.52615118	0.9288	4.0188	0.50506843	8.11E-03	0.00959839	1.35536216
6.2550E-01	123796.23	0.0013906	3.91E-04	5.432E-07	6.3205E-08	0	0	5.4320E-07	0.0005432	0.5267007	0.9312	4.0212	0.50785074	8.11E-03	0.00964439	1.36428887
6.2588E-01	123953.33	0.0013901	3.91E-04	5.4304E-07	6.3164E-08	0	0	5.4304E-07	0.00054304	0.52724922	0.9336	4.0236	0.51063301	8.11E-03	0.00969039	1.37321558
6.2625E-01	124110.43	0.0013897	3.91E-04	5.4288E-07	6.3123E-08	0	0	5.4288E-07	0.00054288	0.52779774	0.936	4.026	0.51341528	8.11E-03	0.00973639	1.38214229
6.2663E-01	124267.52	0.0013893	3.91E-04	5.4272E-07	6.3082E-08	0	0	5.4272E-07	0.00054272	0.52834626	0.9384	4.0284	0.51619755	8.11E-03	0.00978239	1.39106900
6.2700E-01	124424.62	0.0013889	3.91E-04	5.4256E-07	6.3041E-08	0	0	5.4256E-07	0.00054256	0.52889478	0.9408	4.0308	0.51897982	8.11E-03	0.00982839	1.40000000
6.2738E-01	124581.72	0.0013885	3.91E-04	5.424E-07	6.3000E-08	0	0	5.4240E-07	0.0005424	0.5294433	0.9432	4.0332	0.52176209	8.11E-03	0.00987439	1.40900000
6.2775E-01	124738.82	0.0013881	3.91E-04	5.4224E-07	6.2959E-08	0	0	5.4224E-07	0.00054224	0.53000000	0.9456	4.0356	0.52454436	8.11E-03	0.00992039	1.41800000
6.2813E-01	124895.91	0.0013876	3.91E-04	5.4208E-07	6.2918E-08	0	0	5.4208E-07	0.00054208	0.53055772	0.948	4.038	0.52732563	8.11E-03	0.00996639	1.42700000
6.2850E-01	125053.01	0.0013872	3.91E-04	5.4192E-07	6.2877E-08	0	0	5.4192E-07	0.00054192	0.53111544	0.9504	4.0404	0.53010690	8.11E-03	0.00999039	1.43600000
6.2888E-01	125210.11	0.0013868	3.91E-04	5.4176E-07	6.2836E-08	0	0	5.4176E-07	0.00054176	0.53167316	0.9528	4.0428	0.5			



*E Resumen de la solución del gasto
de la cámara a través de la
interpolación de HERMITE*

Solución por medio de la interpolación de HERMITE para encontrar la presión y la velocidad durante el ciclo de operación

fase de carga inicial	Ar	dp/dt	fración	dp/dt	fración	Q(m³/3pul)	Qvol(m³)	delta tiempo s	V	Ar	Q	Qvol	Qvol acum
1.58E-03	128302.06	0.0277116	6.58E-01	0.0182434	3.1048E-08	2.67	8.29E-08	0.018243488	0.04378437	0.04378437	0.01462234	0.03509363	0
3.15E-03	128322.23	0.0196961	6.58E-01	0.01290004	3.1045E-08	2.67	8.28E-08	0.012900118	0.03096028	0.07474465	0.01455059	0.0349214	0.0349214
4.73E-03	128341.24	0.0159983	6.58E-01	0.01053283	3.1043E-08	2.67	8.28E-08	0.010532918	0.025279	0.10002366	0.01447906	0.03474974	0.06967115
6.30E-03	128359.09	0.0138568	6.58E-01	0.0091217	3.1041E-08	2.67	8.28E-08	0.009121765	0.02191594	0.07189228	0.01440777	0.03457864	0.10424979
7.88E-03	128375.8	0.012393	6.58E-01	0.0081587	3.1039E-08	2.67	8.27E-08	0.008158782	0.0149702	0.1968108	0.01433671	0.03440809	0.13865788
9.45E-03	128391.39	0.0113132	6.58E-01	0.00744784	3.1037E-08	2.67	8.27E-08	0.007447922	0.01787501	0.15937203	0.01426588	0.03423811	0.17289599
1.10E-02	128405.86	0.010474	6.58E-01	0.00689536	3.1035E-08	2.67	8.26E-08	0.006895442	0.01654006	0.17592109	0.01419528	0.03406887	0.20696466
1.26E-02	128419.23	0.0097975	6.58E-01	0.00645002	3.1033E-08	2.67	8.26E-08	0.006450101	0.01548024	0.19140133	0.01412492	0.0338998	0.24086446
1.42E-02	128431.52	0.0092372	6.58E-01	0.00608113	3.1032E-08	2.67	8.26E-08	0.006081218	0.01459492	0.20598625	0.01405478	0.03373147	0.27459593
1.58E-02	128442.75	0.0087632	6.58E-01	0.00576907	3.1031E-08	2.67	8.26E-08	0.005769154	0.01384597	0.21984222	0.01398488	0.03356637	0.30615964
1.73E-02	128452.93	0.0083554	6.58E-01	0.00550059	3.1029E-08	2.67	8.26E-08	0.005500676	0.01310162	0.23304385	0.0139152	0.03339648	0.34155612
1.89E-02	128462.06	0.0079997	6.58E-01	0.00526642	3.1028E-08	2.67	8.26E-08	0.0052665	0.0126196	0.24688345	0.01384575	0.03322981	0.37478593
2.05E-02	128470.18	0.0076858	6.58E-01	0.00505981	3.1027E-08	2.67	8.26E-08	0.005059893	0.01214374	0.25782719	0.01377654	0.03306369	0.40784962
2.21E-02	128478.28	0.0074062	6.58E-01	0.00487576	3.1026E-08	2.67	8.26E-08	0.004875838	0.01170201	0.26981392	0.01370755	0.03289811	0.44074773
2.36E-02	128483.4	0.0071651	6.58E-01	0.00471043	3.1026E-08	2.67	8.26E-08	0.00471051	0.01130522	0.28083442	0.01363879	0.03273309	0.47348082
2.52E-02	128488.53	0.0069279	6.58E-01	0.00456085	3.1025E-08	2.67	8.26E-08	0.004560934	0.01094624	0.29178067	0.01357025	0.03256881	0.50604942
2.68E-02	128492.7	0.0067211	6.58E-01	0.00442468	3.1024E-08	2.67	8.26E-08	0.004424758	0.01061942	0.30240009	0.01350194	0.03240467	0.53845409
2.84E-02	128495.92	0.0065317	6.58E-01	0.00430001	3.1024E-08	2.67	8.26E-08	0.004300095	0.01032023	0.31272031	0.01343386	0.03224172	0.57069536
2.99E-02	128498.24	0.0063573	6.58E-01	0.00418532	3.1024E-08	2.67	8.26E-08	0.004185406	0.00995469	0.32276529	0.01336601	0.03207842	0.60277378
3.15E-02	128499.56	0.0061965	6.58E-01	0.00407935	3.1024E-08	2.67	8.26E-08	0.004079432	0.00979064	0.33255693	0.01329838	0.03191611	0.63468989
3.31E-02	128500.01	0.0060472	6.58E-01	0.00398104	3.1024E-08	2.67	8.26E-08	0.00398112	0.00962761	0.33951307	0.01323097	0.03175434	0.66644423
3.47E-02	128499.56	0.0058961	6.58E-01	0.00388951	3.1024E-08	2.67	8.26E-08	0.00388959	0.00946302	0.345144563	0.01316379	0.0315931	0.69803733
3.62E-02	128498.24	0.0057783	6.58E-01	0.00380401	3.1024E-08	2.67	8.26E-08	0.003804096	0.00931288	0.35067546	0.01309684	0.03143241	0.72946974
3.78E-02	128496.04	0.0056566	6.58E-01	0.00372392	3.1024E-08	2.67	8.26E-08	0.00372392	0.00917983	0.35519703	0.01303031	0.03127225	0.760185461
3.94E-02	128492.99	0.0055423	6.58E-01	0.00364868	3.1024E-08	2.67	8.26E-08	0.003648764	0.00875703	0.37827071	0.01296359	0.03111262	0.79185461
4.10E-02	128489.1	0.0054347	6.58E-01	0.00357783	3.1025E-08	2.67	8.26E-08	0.003577909	0.008585708	0.38685708	0.01289731	0.03095353	0.82280815
4.26E-02	128484.38	0.0053331	6.58E-01	0.00351094	3.1025E-08	2.67	8.26E-08	0.00351028	0.00842647	0.39598355	0.01283124	0.03079498	0.85360313
4.41E-02	128478.85	0.005237	6.58E-01	0.00344768	3.1026E-08	2.67	8.26E-08	0.003447762	0.00827463	0.40355818	0.0127654	0.03063695	0.88424008
4.57E-02	128472.52	0.0051459	6.58E-01	0.00338772	3.1027E-08	2.67	8.26E-08	0.003387798	0.00813072	0.41168889	0.01269977	0.03047946	0.91471953
4.73E-02	128465.39	0.0050594	6.58E-01	0.00333077	3.1028E-08	2.67	8.26E-08	0.003330858	0.00799406	0.41968295	0.01263437	0.03032249	0.94504203
4.88E-02	128457.5	0.0049772	6.58E-01	0.00327661	3.1029E-08	2.67	8.26E-08	0.003276695	0.00786407	0.42754792	0.01256919	0.03016606	0.97520808
5.04E-02	128448.84	0.0048988	6.58E-01	0.00322801	3.103E-08	2.67	8.26E-08	0.003228092	0.00774022	0.43528724	0.01250423	0.03001015	1.00521823
5.20E-02	128439.43	0.004824	6.58E-01	0.00317577	3.1031E-08	2.67	8.26E-08	0.003175852	0.00762204	0.44290928	0.01243948	0.02985476	1.03507299
5.36E-02	128429.28	0.0047525	6.58E-01	0.00312872	3.1032E-08	2.67	8.26E-08	0.003128801	0.00750912	0.45041841	0.01237496	0.02969991	1.0647729
5.51E-02	128418.4	0.0046841	6.58E-01	0.00308337	3.1033E-08	2.67	8.26E-08	0.003083781	0.00740107	0.45781948	0.01231066	0.02954557	1.09431847
5.67E-02	128406.82	0.0046186	6.58E-01	0.00304057	3.1035E-08	2.67	8.26E-08	0.00304065	0.00729756	0.46511704	0.01224657	0.02939176	1.12371023
5.83E-02	128394.93	0.0045558	6.58E-01	0.00300992	3.1036E-08	2.67	8.26E-08	0.003009928	0.00719827	0.47231631	0.0121827	0.029233847	1.1529487
5.99E-02	128381.56	0.0044954	6.58E-01	0.00298947	3.1038E-08	2.67	8.26E-08	0.002989524	0.00710293	0.47941824	0.01211904	0.0290857	1.18203441
6.14E-02	128367.91	0.0044374	6.58E-01	0.00297128	3.104E-08	2.67	8.26E-08	0.002971366	0.00702952	0.48642952	0.01205561	0.02893345	1.21096786
6.30E-02	128353.6	0.0043816	6.58E-01	0.00295454	3.1041E-08	2.67	8.26E-08	0.002954618	0.00692308	0.49335261	0.01199239	0.02878172	1.23974959
6.46E-02	128338.84	0.0043278	6.58E-01	0.00293914	3.1043E-08	2.67	8.26E-08	0.002939224	0.00683814	0.50019074	0.01192938	0.02863051	1.2683801
6.62E-02	128323.03	0.004276	6.58E-01	0.002924502	3.1045E-08	2.67	8.26E-08	0.0029245101	0.00675624	0.50694699	0.01186659	0.02847981	1.29685991
6.77E-02	128306.8	0.004226	6.58E-01	0.00291009	3.1047E-08	2.67	8.26E-08	0.002910176	0.00667722	0.51362421	0.01180401	0.02832966	1.32518954
6.93E-02	128289.98	0.0041777	6.58E-01	0.00289603	3.1049E-08	2.67	8.26E-08	0.002896098	0.00660091	0.52022512	0.01174165	0.02817993	1.35336651
7.09E-02	128272.5	0.004131	6.58E-01	0.00288259	3.1051E-08	2.67	8.26E-08	0.002882678	0.00652716	0.52676228	0.0116795	0.02803081	1.38140032
7.25E-02	128254.46	0.0040859	6.58E-01	0.00286984	3.1053E-08	2.67	8.26E-08	0.002869926	0.00645682	0.5332081	0.01161757	0.02788217	1.40928248
7.40E-02	128236.83	0.0040422	6.58E-01	0.00285707	3.1056E-08	2.67	8.26E-08	0.002857157	0.00638678	0.53959488	0.01155585	0.02773403	1.43701651

5.4E-01	123344.96	0.0014868	6.8E-01	0.0088071	3.165E-08	2.87	8.45E-08	0.00960386	0.0025405	0.64129863	8.1E-03	0.00073907	0.00177376	5.03285988
5.47E-01	123353.51	0.0014876	6.8E-01	0.00097936	3.166E-08	2.67	8.45E-08	0.000979442	0.00235066	0.64365059	8.1E-03	0.00072262	0.00173428	5.03439416
5.48E-01	123362.04	0.0014885	6.8E-01	0.00097795	3.166E-08	2.67	8.45E-08	0.000978034	0.00234728	0.64589788	8.1E-03	0.00070626	0.00169502	5.03608918
5.50E-01	123370.53	0.0014894	6.8E-01	0.00097655	3.166E-08	2.67	8.45E-08	0.000976632	0.00234392	0.64834179	8.1E-03	0.00069069	0.00165656	5.03774518
5.51E-01	123378.98	0.0014812	6.8E-01	0.00097515	3.166E-08	2.67	8.45E-08	0.000975236	0.00234057	0.65086236	8.1E-03	0.00067383	0.00161172	5.03936238
5.53E-01	123387.39	0.0014791	6.8E-01	0.00097376	3.166E-08	2.67	8.45E-08	0.000973845	0.00233723	0.65301959	8.1E-03	0.00065776	0.00157864	5.04094102
5.54E-01	123395.76	0.0014777	6.8E-01	0.00097238	3.1659E-08	2.67	8.45E-08	0.000972461	0.00233391	0.65535349	8.1E-03	0.00064179	0.00154033	5.04248131
5.56E-01	123404.07	0.0014749	6.8E-01	0.00097101	3.1659E-08	2.67	8.45E-08	0.000971083	0.00233066	0.65768409	8.1E-03	0.00062591	0.00150219	5.04398355
5.58E-01	123412.33	0.0014729	6.8E-01	0.00096963	3.1657E-08	2.67	8.45E-08	0.000969711	0.00232731	0.66000114	8.1E-03	0.00061013	0.00146443	5.0454478
5.59E-01	123420.53	0.0014708	6.8E-01	0.00096826	3.1656E-08	2.67	8.45E-08	0.000968344	0.00232403	0.66233642	8.1E-03	0.00059444	0.00142864	5.04687445
5.61E-01	123428.66	0.0014687	6.8E-01	0.00096689	3.1655E-08	2.67	8.45E-08	0.000966963	0.00232076	0.66465618	8.1E-03	0.00057884	0.00139211	5.04826366
5.62E-01	123436.73	0.0014667	6.8E-01	0.00096554	3.1653E-08	2.67	8.45E-08	0.000965628	0.00231751	0.66697369	8.1E-03	0.00056334	0.0013562	5.04961566
5.64E-01	123444.72	0.0014646	6.8E-01	0.00096419	3.1652E-08	2.67	8.45E-08	0.000964278	0.00231427	0.66928796	8.1E-03	0.00054792	0.00131502	5.05093068
5.65E-01	123452.63	0.0014626	6.8E-01	0.00096285	3.1651E-08	2.67	8.45E-08	0.000962935	0.00231104	0.6716599	8.1E-03	0.00053261	0.00127826	5.05220894
5.67E-01	123460.46	0.0014605	6.8E-01	0.00096151	3.165E-08	2.67	8.45E-08	0.000961596	0.00230783	0.67390683	8.1E-03	0.00051738	0.00124172	5.05345066
5.69E-01	123468.2	0.0014585	6.8E-01	0.00096018	3.1649E-08	2.67	8.45E-08	0.000960264	0.00230463	0.67621146	8.1E-03	0.00050225	0.0012054	5.05465606
5.70E-01	123476.85	0.0014565	6.8E-01	0.00095885	3.1648E-08	2.67	8.45E-08	0.000958937	0.00230145	0.67851291	8.1E-03	0.00048721	0.00116931	5.055852537
5.72E-01	123484.4	0.0014545	6.8E-01	0.00095753	3.1648E-08	2.67	8.45E-08	0.000957615	0.00229828	0.68081119	8.1E-03	0.00047226	0.00113343	5.05695588
5.73E-01	123490.85	0.0014525	6.8E-01	0.00095621	3.1647E-08	2.67	8.45E-08	0.000956299	0.00229512	0.68310631	8.1E-03	0.0004574	0.00109777	5.05805657
5.75E-01	123498.19	0.0014505	6.8E-01	0.0009549	3.1646E-08	2.67	8.45E-08	0.000954988	0.00229197	0.68539828	8.1E-03	0.00044264	0.00106233	5.0591189
5.76E-01	123505.42	0.0014485	6.8E-01	0.00095356	3.1645E-08	2.67	8.45E-08	0.000953683	0.00228884	0.68768711	8.1E-03	0.00042796	0.00102711	5.06014601
5.78E-01	123512.54	0.0014465	6.8E-01	0.00095223	3.1644E-08	2.67	8.45E-08	0.000952362	0.00228572	0.68997283	8.1E-03	0.00041338	0.00099211	5.06113812
5.80E-01	123519.53	0.0014446	6.8E-01	0.00095091	3.1643E-08	2.67	8.45E-08	0.000951088	0.00228261	0.69226544	8.1E-03	0.00039888	0.00095732	5.06209544
5.81E-01	123526.4	0.0014426	6.8E-01	0.00094971	3.1642E-08	2.67	8.45E-08	0.000949798	0.00227952	0.69454396	8.1E-03	0.00038448	0.00092275	5.06301819
5.83E-01	123533.73	0.0014407	6.8E-01	0.00094843	3.1641E-08	2.67	8.45E-08	0.000948514	0.00227643	0.69681139	8.1E-03	0.00037016	0.00088839	5.06390658
5.84E-01	123539.13	0.0014387	6.8E-01	0.00094715	3.164E-08	2.67	8.45E-08	0.000947235	0.00227331	0.70135506	8.1E-03	0.00035594	0.00085425	5.06476083
5.86E-01	123546.19	0.0014368	6.8E-01	0.00094588	3.1639E-08	2.67	8.45E-08	0.000945961	0.00227021	0.70350506	8.1E-03	0.0003418	0.00082032	5.06558115
5.87E-01	123552.5	0.0014349	6.8E-01	0.00094461	3.1638E-08	2.67	8.45E-08	0.000944692	0.00226716	0.70562332	8.1E-03	0.00032775	0.00078666	5.06636776
5.89E-01	123558.66	0.0014329	6.8E-01	0.00094334	3.1638E-08	2.67	8.45E-08	0.000943428	0.00226423	0.70786655	8.1E-03	0.00031379	0.0007531	5.06712086
5.91E-01	123564.66	0.001431	6.8E-01	0.00094209	3.1637E-08	2.67	8.45E-08	0.00094217	0.00226121	0.70814776	8.1E-03	0.00030022	0.00071981	5.06784066
5.92E-01	123570.51	0.0014291	6.8E-01	0.00094083	3.1636E-08	2.67	8.45E-08	0.000940916	0.0022582	0.71040596	8.1E-03	0.00028614	0.00068672	5.06851234
5.94E-01	123576.18	0.0014272	6.8E-01	0.00093958	3.1635E-08	2.67	8.45E-08	0.000939668	0.0022552	0.71266116	8.1E-03	0.00027244	0.00065385	5.06918129
5.95E-01	123581.69	0.0014253	6.8E-01	0.00093834	3.1635E-08	2.67	8.45E-08	0.000938424	0.00225222	0.71491338	8.1E-03	0.00025883	0.00062119	5.06980243
5.97E-01	123587.02	0.0014235	6.8E-01	0.0009371	3.1634E-08	2.67	8.45E-08	0.000937185	0.00224924	0.71716262	8.1E-03	0.00024531	0.00058873	5.07039116
5.98E-01	123592.17	0.0014216	6.8E-01	0.00093587	3.1634E-08	2.67	8.45E-08	0.000935851	0.00224628	0.71940891	8.1E-03	0.00023187	0.00055649	5.07094765
6.00E-01	123597.13	0.0014197	6.8E-01	0.00093464	3.1633E-08	2.67	8.45E-08	0.000934722	0.00224333	0.72165224	8.1E-03	0.00021852	0.00052445	5.0714721
6.02E-01	123601.9	0.0014179	6.8E-01	0.00093341	3.1632E-08	2.67	8.45E-08	0.000933498	0.0022404	0.72389264	8.1E-03	0.00020526	0.00049261	5.07196471
6.03E-01	123606.48	0.001416	6.8E-01	0.00093219	3.1632E-08	2.67	8.45E-08	0.000932275	0.00223747	0.7261301	8.1E-03	0.00019208	0.00046098	5.0724257
6.05E-01	123610.85	0.0014142	6.8E-01	0.00093098	3.1631E-08	2.67	8.45E-08	0.000931064	0.00223455	0.72836166	8.1E-03	0.00017898	0.00042956	5.07288526
6.06E-01	123615.02	0.0014123	6.8E-01	0.00092977	3.1631E-08	2.67	8.45E-08	0.000929854	0.00223165	0.73059631	8.1E-03	0.00016598	0.00039834	5.07325536
6.08E-01	123618.97	0.0014105	6.8E-01	0.00092856	3.163E-08	2.67	8.45E-08	0.000928649	0.00222876	0.73282507	8.1E-03	0.00015305	0.00036733	5.07362092
6.10E-01	123622.71	0.0014087	6.8E-01	0.00092736	3.163E-08	2.67	8.45E-08	0.000927449	0.00222588	0.73505095	8.1E-03	0.00014021	0.00033651	5.073985744
6.11E-01	123626.22	0.0014068	6.8E-01	0.00092617	3.1629E-08	2.67	8.45E-08	0.000926253	0.00222301	0.73727395	8.1E-03	0.00012746	0.00030559	5.07426334
6.13E-01	123629.51	0.001405	6.8E-01	0.00092498	3.1629E-08	2.67	8.45E-08	0.000925062	0.00222015	0.7394941	8.1E-03	0.00011479	0.00027549	5.07453883
6.14E-01	123632.56	0.0014032	6.8E-01	0.00092379	3.1628E-08	2.67	8.45E-08	0.000923875	0.0022173	0.74171114	8.1E-03	0.0001022	0.00024528	5.07478412
6.16E-01	123635.38	0.0014014	6.8E-01	0.00092261	3.1628E-08	2.67	8.45E-08	0.000922693	0.00221446	0.74392586	8.1E-03	0.0000898	0.00021527	5.07499939
6.17E-01	123637.95	0.0013996	6.8E-01	0.00092143	3.1628E-08	2.67	8.45E-08	0.000921516	0.00221164	0.7461375	8.1E-03	0.00007727	0.00018546	5.07518485
6.19E-01	123640.27	0.0013979	6.8E-01	0.00092026	3.1627E-08	2.67	8.45E-08	0.000920342	0.00220882	0.74834632	8.1E-03	0.00006493	0.00015585	5.07534071
6.21E-01	123642.34	0.0013961	6.8E-01	0.00091909	3.1627E-08	2.67	8.45E-08	0.000919174	0.00220602	0.75055234	8.1E-03	0.00005268	0.00012644	5.07546715
6.22E-01	123644.15	0.0013943	6.8E-01	0.00091793	3.1627E-08	2.67	8.45E-08	0.000918009	0.00220322	0.75275556	8.1E-03	0.00004096	0.00009722	5.07556437
6.24E-01	123645.69	0.0013926	6.8E-01	0.00091677	3.1627E-08	2.67	8.45E-08	0.000916885	0.00220044	0.754966	8.1E-03	0.00002917	0.00006820	5.07563257
6.25E-01	123646.97	0.0013908	6.8E-01	0.00091561	3.1627E-08	2.67	8.45E-08	0.000915695	0.00219767	0.75715367	8.1E-03	0.00001745	0.00003977	5.07568195
6.27E-01	123647.97	0.0013891	6.8E-01	0.00091446	3.1626E-08	2.67	8.45E-08	0.000914544	0.0021949	0.75934658	8.1E-03	0.00000523	0.00001074	5.07573038
6.28E-01														

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

6.0396E-01	123650	0.0014151	1.94E-01	0.00027418	3.1626E-08	0	0	0.000274184	0.00065804	0.18520304	0.8256	3.9156	0.39181792	8.11E-03	0.00762381	0.9862338
6.0442E-01	123650	0.0014146	1.94E-01	0.00027408	3.1626E-08	0	0	0.000274078	0.00065779	0.18586082	0.828	3.918	0.39422434	8.11E-03	0.00767064	0.99590444
6.0489E-01	123650	0.0014141	1.94E-01	0.00027397	3.1626E-08	0	0	0.000273972	0.00065753	0.18651836	0.8304	3.9204	0.39664225	8.11E-03	0.00771768	1.00362213
6.0535E-01	123650	0.0014135	1.94E-01	0.00027387	3.1626E-08	0	0	0.000273867	0.00065728	0.18717564	0.8328	3.9228	0.39907168	8.11E-03	0.00776495	1.01138708
6.0582E-01	123650	0.001413	1.94E-01	0.00027376	3.1626E-08	0	0	0.000273762	0.00065703	0.18783266	0.8352	3.9252	0.40151267	8.11E-03	0.00781245	1.01919953
6.0629E-01	123650	0.0014124	1.94E-01	0.00027366	3.1626E-08	0	0	0.000273656	0.00065678	0.18848444	0.8376	3.9276	0.40396526	8.11E-03	0.00786017	1.0270597
6.0675E-01	123650	0.0014119	1.94E-01	0.00027355	3.1626E-08	0	0	0.000273551	0.00065652	0.18914596	0.84	3.93	0.40642949	8.11E-03	0.00790812	1.03496782
6.0722E-01	123650	0.0014113	1.94E-01	0.00027345	3.1626E-08	0	0	0.000273446	0.00065627	0.18980223	0.8424	3.9324	0.40890539	8.11E-03	0.00795629	1.04292412
6.0768E-01	123650	0.0014108	1.94E-01	0.00027334	3.1626E-08	0	0	0.000273341	0.00065602	0.19045825	0.8448	3.9348	0.41139301	8.11E-03	0.00800047	1.05092881
6.0815E-01	123650	0.0014103	1.94E-01	0.00027324	3.1626E-08	0	0	0.000273237	0.00065577	0.19111402	0.8472	3.9372	0.41389239	8.11E-03	0.00805333	1.05898214
6.0862E-01	123650	0.0014097	1.94E-01	0.00027313	3.1626E-08	0	0	0.000273132	0.00065552	0.19176954	0.8496	3.9396	0.41640355	8.11E-03	0.00810219	1.06708433
6.0908E-01	123650	0.0014092	1.94E-01	0.00027303	3.1626E-08	0	0	0.000273027	0.00065527	0.1924248	0.852	3.942	0.41892655	8.11E-03	0.00815128	1.07523562
6.0955E-01	123650	0.0014086	1.94E-01	0.00027292	3.1626E-08	0	0	0.000272923	0.00065502	0.19307982	0.8544	3.9444	0.42146141	8.11E-03	0.0082006	1.08343622
6.1001E-01	123650	0.0014081	1.94E-01	0.00027282	3.1626E-08	0	0	0.000272819	0.00065477	0.19373458	0.8568	3.9468	0.42400818	8.11E-03	0.00825016	1.09186838
6.1048E-01	123650	0.0014076	1.94E-01	0.00027271	3.1626E-08	0	0	0.000272715	0.00065452	0.19438991	0.8592	3.9492	0.4265669	8.11E-03	0.00830094	1.09998632
6.1095E-01	123650	0.0014071	1.94E-01	0.00027261	3.1626E-08	0	0	0.000272611	0.00065427	0.19504537	0.8616	3.9516	0.4291376	8.11E-03	0.00835172	1.10833629
6.1141E-01	123650	0.0014065	1.94E-01	0.00027251	3.1626E-08	0	0	0.000272507	0.00065402	0.19569738	0.864	3.954	0.43172033	8.11E-03	0.00840222	1.1167365
6.1188E-01	123650	0.001406	1.94E-01	0.00027241	3.1626E-08	0	0	0.000272403	0.00065377	0.19635115	0.8664	3.9564	0.43431512	8.11E-03	0.00845071	1.12518721
6.1234E-01	123650	0.0014054	1.94E-01	0.0002723	3.1626E-08	0	0	0.000272296	0.00065352	0.19700467	0.8688	3.9588	0.43692202	8.11E-03	0.00850143	1.13368864
6.1281E-01	123650	0.0014049	1.94E-01	0.0002722	3.1626E-08	0	0	0.000272196	0.00065327	0.19765794	0.8712	3.9612	0.43954105	8.11E-03	0.00855269	1.14224103
6.1328E-01	123650	0.0014043	1.94E-01	0.00027209	3.1626E-08	0	0	0.000272092	0.00065302	0.19831096	0.8736	3.9636	0.44217227	8.11E-03	0.00860359	1.15084461
6.1374E-01	123650	0.0014038	1.94E-01	0.00027199	3.1626E-08	0	0	0.000271989	0.00065277	0.19896373	0.876	3.966	0.44481571	8.11E-03	0.00865502	1.15949963
6.1421E-01	123650	0.0014033	1.94E-01	0.00027189	3.1626E-08	0	0	0.000271886	0.00065253	0.19961626	0.8784	3.9684	0.4474714	8.11E-03	0.00870669	1.16820633
6.1467E-01	123650	0.0014027	1.94E-01	0.00027178	3.1626E-08	0	0	0.000271783	0.00065228	0.20026854	0.8808	3.9708	0.45013939	8.11E-03	0.00875891	1.17696494
6.1514E-01	123650	0.0014022	1.94E-01	0.00027168	3.1626E-08	0	0	0.00027168	0.00065203	0.20092057	0.8832	3.9732	0.45281972	8.11E-03	0.00881076	1.1857757
6.1561E-01	123650	0.0014017	1.94E-01	0.00027158	3.1626E-08	0	0	0.000271577	0.00065178	0.20157235	0.8856	3.9756	0.45551243	8.11E-03	0.00886315	1.19463885
6.1607E-01	123650	0.0014012	1.94E-01	0.00027147	3.1626E-08	0	0	0.000271474	0.00065154	0.20222389	0.888	3.978	0.45821756	8.11E-03	0.00891579	1.20355464
6.1654E-01	123650	0.0014006	1.94E-01	0.00027137	3.1626E-08	0	0	0.000271369	0.00065129	0.20287518	0.8904	3.9804	0.46093514	8.11E-03	0.00896867	1.2125233
6.1700E-01	123650	0.0014001	1.94E-01	0.00027127	3.1626E-08	0	0	0.000271269	0.00065105	0.20352623	0.8928	3.9828	0.46366521	8.11E-03	0.00902179	1.22154509
6.1747E-01	123650	0.0013996	1.94E-01	0.00027117	3.1626E-08	0	0	0.000271167	0.0006508	0.20417703	0.8952	3.9852	0.46640783	8.11E-03	0.00907545	1.23062024
6.1794E-01	123650	0.0013991	1.94E-01	0.00027106	3.1626E-08	0	0	0.000271064	0.00065055	0.20482758	0.8976	3.9876	0.46916301	8.11E-03	0.00912876	1.239749
6.1840E-01	123650	0.0013985	1.94E-01	0.00027096	3.1626E-08	0	0	0.000270962	0.00065031	0.20547789	0.9	3.99	0.47193082	8.11E-03	0.00918261	1.24893161
6.1887E-01	123650	0.001398	1.94E-01	0.00027086	3.1626E-08	0	0	0.00027086	0.00065006	0.20612796	0.9024	3.9924	0.47471127	8.11E-03	0.00923672	1.25816833
6.1933E-01	123650	0.0013975	1.94E-01	0.00027076	3.1626E-08	0	0	0.000270758	0.00064982	0.20677778	0.9048	3.9948	0.47750443	8.11E-03	0.00929105	1.26745939
6.1980E-01	123650	0.0013969	1.94E-01	0.00027066	3.1626E-08	0	0	0.000270656	0.00064958	0.20742735	0.9072	3.9972	0.48031032	8.11E-03	0.00934566	1.27680505
6.2027E-01	123650	0.0013964	1.94E-01	0.00027055	3.1626E-08	0	0	0.00027055	0.00064933	0.20807668	0.9096	3.9996	0.48312898	8.11E-03	0.0094005	1.28620556
6.2073E-01	123650	0.0013959	1.94E-01	0.00027045	3.1626E-08	0	0	0.000270453	0.00064909	0.20872577	0.912	4.002	0.48596046	8.11E-03	0.0094556	1.29566115
6.2120E-01	123650	0.0013954	1.94E-01	0.00027035	3.1626E-08	0	0	0.000270352	0.00064884	0.20937461	0.9144	4.0044	0.48880479	8.11E-03	0.00951094	1.30517209
6.2166E-01	123650	0.0013948	1.94E-01	0.00027025	3.1626E-08	0	0	0.00027025	0.0006486	0.21002322	0.9168	4.0068	0.49166202	8.11E-03	0.00956664	1.31473863
6.2213E-01	123650	0.0013943	1.94E-01	0.00027015	3.1626E-08	0	0	0.000270149	0.00064836	0.21067157	0.9192	4.0092	0.49453218	8.11E-03	0.00962238	1.32436101
6.2260E-01	123650	0.0013938	1.94E-01	0.00027005	3.1626E-08	0	0	0.000270048	0.00064812	0.21131969	0.9216	4.0116	0.49741532	8.11E-03	0.00967848	1.33403949
6.2306E-01	123650	0.0013933	1.94E-01	0.00026995	3.1626E-08	0	0	0.000269947	0.00064787	0.21196756	0.924	4.014	0.50031148	8.11E-03	0.00973464	1.34377432
6.2353E-01	123650	0.0013928	1.94E-01	0.00026985	3.1626E-08	0	0	0.000269846	0.00064763	0.21261519	0.9264	4.0164	0.50322069	8.11E-03	0.00979144	1.35356576
6.2399E-01	123650	0.0013923	1.94E-01	0.00026975	3.1626E-08	0	0	0.000269745	0.00064739	0.21326258	0.9288	4.0188	0.506143	8.11E-03	0.0098483	1.36341406
6.2446E-01	123650	0.0013917	1.94E-01	0.00026964	3.1626E-08	0	0	0.000269645	0.00064715	0.21390973	0.9312	4.0212	0.50907845	8.11E-03	0.00990542	1.373331948
6.2493E-01	123650	0.0013912	1.94E-01	0.00026954	3.1626E-08	0	0	0.000269544	0.00064691	0.21455664	0.9336	4.0236	0.51202708	8.11E-03	0.00996279	1.38328227
6.2539E-01	123650	0.0013907	1.94E-01	0.00026944	3.1626E-08	0	0	0.000269443	0.00064666	0.21520333	0.936	4.026	0.51498893	8.11E-03	0.00999679	1.39330269
6.2586E-01	123650	0.0013902	1.94E-01	0.00026934	3.1626E-08	0	0	0.000269343	0.00064642	0.21584972	0.9384	4.0284	0.51796404	8.11E-03	0.01007831	1.403381
6.2632E-01	123650	0.0013896	1.94E-01	0.00026924	3.1626E-08	0	0	0.000269243	0.00064618	0.21649691	0.9408	4.0308	0.52095245	8.11E-03	0.01013646	1.41351745
6.2679E-01	123650	0.0013891	1.94E-01	0.00026914	3.1626E-08	0	0	0.000269143	0.00064594	0.21714485	0.9432	4.0332	0.5239542	8.11E-03	0.01019468	1.42371231
6.2726E-01	123650	0.0013886	1.94E-01	0.00026904	3.1626E-08	0	0	0.000269043	0.0006457	0.21779255	0.9456	4.0356	0.52696933	8.11E-03	0.01025353	1.43366584
6.2772E-01	123650	0.0013881	1.94E-01	0.00026894	3.1626E-08	0	0	0.000268943	0.00064546	0.21844302	0.948	4.038	0.52999789	8.11E-03	0.01031246	1.4442783
6.2819E-01	123650	0.0013876	1.94E-01	0.00026884	3.1626E-08	0	0	0.000268843	0.00064522	0.21909224	0.9504	4.0404	0.53303991	8.11E-03	0.01037165	1.45484995
6.2865E-01	123650	0.0013871	1.94E-01	0.00026874	3.1626E-08	0	0	0.000268743	0.00064499	0.21974232	0.9528	4.0428	0.53609544	8.11E-03	0.0104311	1.46508105
6.2912E-01	123650	0.0013866	1.94E-01													

Tesis de Maestría **10** Bibliografía

- López R. 1994. Construcción y Operación de Bajo Costo. México. Tesis profesional. U.V. p.48
- Aragón, A. 1986. Diseño y Construcción de una bomba de ariete para el medio rural. México. Tesis profesional I.T.R.V. p.86
- Berezowsky, V y Ramírez, L. 1986. Cámaras de Oscilación Análisis y Diseño Hidráulico. Instituto de Ingeniería, UNAM, México. p.135
- Crane, 1989. Flujo de Fluidos en Válvulas, accesorios y Tuberías. McGraw-Hill. México.
- Giles, R. ,1991. Mecánica de los Fluidos e Hidráulica. Serie Schaum. Ed. McGraw-Hill. Primera edición en Español. México, DF. p. 273
- Molyneux, F. 1960. Energy Relations in Transient Closed-Conduit Flow. Journal of Hydraulics Engineering, Vol. 116, No. 10 October, 1990. Canadá.
- Karney, W. 1989. Elastic Properties Pipe Materials During Hydraulics Transients. Journal of Hydraulics Engineering, Vol. 117, No. 10 October, 1991. Sweden.
- Palido, V 1989. Una
- Larson, M. y Jönsson, L. 1990. Elastic Properties Pipe Materials During Hydraulics Transients. Journal of Hydraulics Engineering, Vol. 117, No. 10 October, 1991. Sweden.

Informative. Department of
Engineering Development
Technology Unit. Technical 12
release. U.K.

Proyecto de Digitalización de Tesis
Responsable M.B. Alberto Pedro Lorandi Medina
Colaboradores: Estanislao Ferman García
M.B. Enrique Rodríguez Magaña

Instituto de Ingeniería
Universidad Veracruzana

- López, R. 1994. Diseño y Construcción y Operación de una bomba de Ariete Hidráulico de Bajo Costo. México. Tesis profesional. U.V. p.48
- Magdaleno, S. 1995. Caracterización del Hidroariete Hidráulico. México. Tesis Profesional, Universidad de Chapingo. p. 99
- Mancebo, Del C. 1987. Teoría del Golpe de Ariete y sus aplicaciones en Ingeniería Hidráulica. Limusa. México. p. 247
- Méndez, D. 1997. Evaluación Técnica de un prototipo de Ariete Hidráulico de PVC, Modelo DTU-P4. México. Reporte Residencias Profesionales. I.T.R.V.
- Molyneux, F. 1960. The Hydraulic Ramp Pump for Rural Water Supply. Bulletin Informative. Burkenhead College of Technology. U.K. October, 1960
- Palicio, V. 1989. Instalación y Operación de una bomba de Ariete Hidráulico. Tesis Profesional. U.V. p. 81



- Parmakian, J. 1963. Water-Hammer Analysis. Dover publications, Inc. New York. p. 161
- Riestra, D. 1998. El hidroariete: Dispositivo hidráulico para el abastecimiento de agua en el medio rural. [cómo, dónde y por qué utilizarlo] Instituto de Ingeniería. U.V. Veracruz, México.
- Sociedad Mexicana de Industrias Manual de Diseño. Reporte Plásticas Técnico
- Sotelo, A. 1977. Hidráulica General. Vol. 1 Fundamentos, Ed. Limusa, México.
- Streeter, L. y Wylie, B. 1988. Mecánica de Fluidos. Ed. McGraw-Hill. Octava edición. México. p. 594
- Wylie, B. y Streeter, L. 1983. Fluid Transient. Ed. FEB Press. U.S.A. p. 384
- Warwick, University. 1997. Hydraulics Ram Pumps- General Information. DTU-P 90. Bulletin Informative. Department of Engineering Development Technology Unit. Technical 12 release. U.K.