

Universidad Autónoma “Gabriel René Moreno”
Dirección Universitaria de Investigación

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN



INFORME FINAL

SIFÓN AUTOCEBANTE DE GARGANTA

Elaborado por:
Dr Carlos Orlando Hernández Suárez
Ing. Carmen Ofelia Maida Vargas

Santa Cruz – Bolivia
2006

INFORME FINAL SIFÓN AUTOCEBANTE DE GARGANTA

INDICE	/1/
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	/3/
1.1. Antecedentes	/3/
1.2. Planteamiento del problema	/3/
1.3. Definición de la tarea de investigación	/3/
CAPITULO II: OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	/5/
2.1. Objetivo general	/5/
2.2. Objetivos específicos	/5/
CAPITULO III: ANÁLISIS DE LA BIBLIOGRAFÍA	/6/
3.1 Orígenes y apuntes históricos	/6/
3.2. Definiciones	/6/
3.3. Cebado y autocebado	/7/
3.4. Sifón vertedor	/8/
3.5. Sifón invertido	/8/
3.6. Estructura de entrada	/8/
3.7. Estructura de salida	/9/
3.8. Ampliación de la búsqueda bibliográfica	/9/
3.9. Búsqueda de patentes	/10/
3.10. Comunicación con otros centros de investigaciones hidráulicas	/11/
3.11. Limitaciones en el uso de sifones	/11/
3.12. Conclusiones del capítulo	/11/
CAPITULO IV: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	/13/
4.1. Condiciones de circulación	/13/
4.2. Fundamentos para el diseño de un sifón autocebante sin equipamiento	/19/
4.3. Funcionamiento del sistema	/20/
4.4. Influencia del diámetro de la conducción en la ocurrencia del fenómeno	/21/
4.5. Conclusiones del capítulo	/22/
4.6. Recomendaciones del capítulo	/22/
CAPITULO V: METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO	/23/
5.1. Metodología para el diseño de un sifón autocebante sin equipamiento auxiliar para el cebado y mantenimiento de flujo	/23/

CAPITULO VI: INSTALACIONES Y MÉTODOS DE EXPERIMENTACIÓN	/27/
6.1. Estudio de un prototipo de sifón en el Conjunto Hidráulico Sapocó	/27/
6.2. Estudio del prototipo de sifón de 2" en el Laboratorio de Hidráulica	/33/
6.3. Estudio del prototipo de sifón de 3" en el Laboratorio de Hidráulica	/38/
6.4. Conclusiones del capítulo	/43/
CAPITULO VII: RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS	/45/
7.1. Recomendaciones para la colocación del sifón	/45/
7.2. Recomendaciones para el anclaje del sifón	/45/
CAPITULO VIII: ESTRUCTURAS DISIPADORAS DE ENERGÍA A COLOCAR EN LA DESCARGA DEL SIFÓN	/46/
8.1. Estanques amortiguadores	/46/
CAPITULO IX: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	/48/
9.1. Conclusiones generales	/48/
9.2. Recomendaciones	/49/
BIBLIOGRAFÍA	/50/

INFORME FINAL SIFÓN AUTOCEBANTE DE GARGANTA

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Todas las formas de vida dependen del agua, y es por ello que el hombre la ha utilizado desde los albores de la historia. Sin embargo, existen zonas que se encuentran limitadas en el uso y aprovechamiento de embalses de agua contruidos o naturales, debido a que no cuentan con la disponibilidad de energía eléctrica como para instalar estaciones de bombeo para lograr el transporte del agua.

La necesidad de aprovechar embalses contruidos o naturales, en lugares en los cuales no existe desarrollada la base energética como para plantearse la instalación de estaciones de bombeo, conlleva al análisis de nuevas alternativas capaces de cumplir con la misma función

El presente trabajo de investigación enmarcado en los principios mencionados anteriormente, permite la presentación de una nueva alternativa para la extracción del agua de un embalse, sin consumo energético.

Para lograr este objetivo se ha concebido el empleo de un sifón con capacidad de autocebado y con funcionamiento sin dispositivos auxiliares para el cebado y mantenimiento de flujo, a excepción de una válvula de control en la rama descendente.

A este dispositivo se le ha denominado SIFÓN AUTOCEBANTE DE GARGANTA, que satisface las exigencias de solución de la problemática planteada.

1.2. Planteamiento del problema

Ante la imposibilidad que muchas veces tiene el hombre para garantizar la extracción y el transporte de grandes volúmenes de agua, por la falta de energía eléctrica, lo cual no le permite la instalación de estaciones de bombeo para el aprovechamiento de embalses de agua contruidos o naturales, en el presente estudio se lleva a cabo el análisis de una nueva alternativa capaz de cumplir la misma función, bajo el principio de extraer grandes volúmenes de agua sin el consumo de la energía eléctrica.

Para ello se ha desarrollado la metodología de diseño y la construcción de prototipos de sifón autocebante, con el objetivo de lograr el transporte de volúmenes considerables de agua, sin consumo energético y sin dispositivos auxiliares para el cebado y mantenimiento de flujo, a excepción de una válvula de control en la rama descendente.

1.3. Definición de la tarea de investigación

Para la ejecución del trabajo de investigación se diseñó y construyó modelos y prototipos del sifón autocebante con el propósito de transportar volúmenes considerables de agua, de un nivel superior a otro inferior, pasando por un punto más alto que la superficie libre del nivel superior, sin consumo energético y sin dispositivos auxiliares para el cebado y mantenimiento de flujo, descartándose de inicio la solución de válvula de cheque en la rama ascendente o el empleo de cualquier dispositivo, a excepción de una válvula de control en la rama descendente.

Para lograr este propósito se realizó una investigación experimental sistemática empleando diseños fundamentados en el uso del efecto de émbolo que se produce durante el descenso de una masa de agua en un conducto para crear el vacío necesario y el establecimiento del flujo en el sifón.

CAPITULO II: OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Objetivo general

El trabajo de investigación tiene como objetivo general el diseño y la construcción de un sifón autocebante que permita lograr el transporte de volúmenes considerables de agua, de un nivel superior a otro inferior, pasando, pasando por un punto más alto que la superficie libre del nivel superior, sin consumo energético y sin dispositivos auxiliares para el cebado y mantenimiento de flujo, a excepción de una válvula de control en la rama descendente.

2.2. Objetivos específicos

- a. Realizar una investigación bibliográfica y de registros de patentes sobre sifones, su fundamentación teórica y las soluciones técnicas que se reconocen para el cebado y la evacuación de los gases acumulados en la cumbre.
- b. Establecer la fundamentación teórica sobre el diseño que cumpla con los objetivos propuestos.
- c. Establecer la validez del principio de funcionamiento para el diseño propuesto con relación al diámetro del conducto.
- d. Construcción y ensayo en laboratorio de los prototipos de sifones sobre diseños sin equipamiento auxiliar para el cebado y mantenimiento de flujo.
- e. Establecer, a partir de los resultados obtenidos experimentalmente, una metodología de diseño adecuada a las condiciones prácticas en el uso de sifones.
- f. Confeccionar ejemplos de cálculo donde se ilustre la metodología de diseño establecida en el objetivo anterior

CAPITULO III: ANÁLISIS DE LA BIBLIOGRAFÍA

3.1 Orígenes y apuntes históricos

El fenómeno o principio del sifón existe en la naturaleza y forma parte de ésta por si mismo en estructuras geológicas y en los propios organismos vivos. El hombre, para aprovecharlo en su beneficio, solo necesitó encontrar el conducto apropiado pues la capacidad de succión es innata en su especie, por lo que el origen del sifón se pierde en la antigüedad de la civilización humana.

La más remota información sobre el empleo del sifón ha quedado registrada en los muros de los templos y tumbas egipcias, es de suponer que uno de los primeros usos fue para extraer el agua clarificada de los recipientes donde las turbias aguas del río Nilo se dejaban sedimentar, así se representa en una tumba de Tebas a la que se atribuye una edad de 3500 años (año 1500 a.n.e.).

El conocimiento y uso del sifón pasa a la civilización occidental a través de los griegos, el año 650 a.n.e., pero no solo el sifón, sino también el fuelle, la jeringa, la pipeta y otros pequeños dispositivos hidráulicos conocidos en el antiguo Egipto que contrastan con las grandes obras hidráulicas de los fenicios y los sirios.

Como se aprecia, y es consecuencia lógica de las características físicas de los pequeños dispositivos mencionados, el escaso desarrollo tecnológico de la época impedía que estos sobrepasaran la escala humana, aun cuando ya entonces las obras hidráulicas en conducción libre permitían multiplicar varias veces tal escala.

En el desarrollo posterior de la hidráulica a partir de Daniel Bernoulli (Hidrodinámica, 1738) se establecen leyes básicas que hacen posible realizar el cálculo y diseño de las conducciones forzadas donde el sifón egipcio jugó un rol fundamental en el entendimiento de los principios del flujo.

Es de suponer que los sifones no sobrepasaron la escala humana hasta que la revolución industrial (Inglaterra, 1760–1830) y su desarrollo posterior puso a disposición de la hidráulica las bombas de vacío y los conductos herméticos de gran diámetro que permiten la construcción de los sifones modernos y su empleo en el transporte de volúmenes importantes de agua.

Existe un sector intermedio entre el sifón pequeño y el de gran capacidad con aspiración de aire, que mediante el empleo de válvulas y otros dispositivos mecánicos permite realizar el cebado del sifón llenando de agua el conducto hasta expulsar el aire de su interior e iniciar el flujo cuando la válvula es abierta. Estos tipos de sifones son empleados frecuentemente en sistemas de riego u otros de poca capacidad.

3.2. Definiciones

Por cuanto el presente trabajo pretende aportar un nuevo enfoque en los conceptos de cebado y operación de los sifones tras una historia de más de 3500 años en que se ha mantenido prácticamente inalterada, resulta necesario dejar suficientemente claros los conceptos y definiciones establecidos en la literatura consultada sobre el tema discutido.

Nekrasov, Trueba, Rusell, Rouse, y las enciclopedias y diccionarios SALVAT, NAUTA, Espasa Calpe, VOX, PENGUIN, Larousse, permiten definir el sifón como:

"El tipo especial de conducción destinada a trasvasar líquido de un depósito superior a uno de nivel inferior, pasando por un punto más alto que la superficie libre del depósito superior. Con la particularidad de que todo el tramo ascendente y parte del descendente se encuentran a una presión inferior a la atmosférica. Para que un sifón pueda funcionar es preciso cebarlo, operación que se efectúa generalmente aspirando aire desde el punto más alto del conducto (ver figura 3.1)."

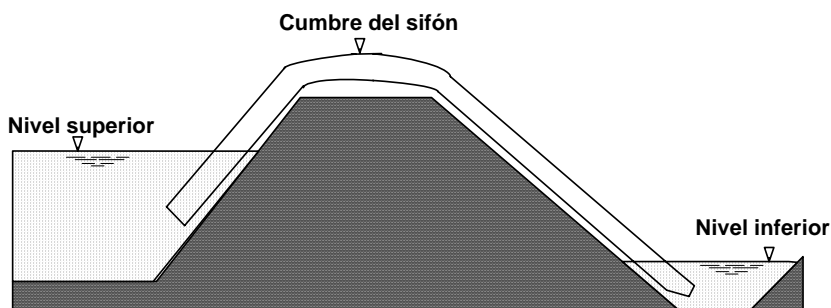


Figura 3.1. Esquema de un sifón

Hebert Addison ratifica que para cebar el sifón es necesario extraer "...el aire de su interior por medio de una bomba o un aspirador en el punto más alto..."

Gibson precisa que: "En la práctica es necesario colocar una cámara de aire en la cumbre del sifón donde gradualmente se acumula el aire, este aire es removido a intervalos frecuentes mediante algún tipo de bomba de vacío o eyector..."

La necesidad de utilizar una bomba de vacío o un eyector en la cumbre es reiterada directamente además por Nekrasov, Trueba, Russell, Rouse, Schäfer, Streeter, Shames, Rabinovich, Pérez Franco, Ingersoll, Daugherty Franzini, King, Wisler, y Woodburn, Calvin, Mayol, Schokiitsch.

Otros autores del siglo XIX y principios del XX: Collignon, Davey, y Spatarov utilizan y argumentan la misma teoría que continúa en el siglo XX, pero también en 1908 Hiscox describe soluciones prácticas para sifones sin aspiración de aire que aun mantienen su vigencia.

3.3. Cebado y autocebado

En el epígrafe anterior se ha definido qué es un sifón, y que además este debe ser cebado para que funcione. De las referencias mencionadas; en el Diccionario VOX, la voz CEBAR se define como:

"..., Llenar de líquido un sifón o una bomba, dar empuje al volante de una máquina, para que empiece a funcionar,..."

De donde; queda claro que un sifón ha sido CEBADO cuando inmediatamente de realizar esta acción queda en operación, es decir ha empezado a funcionar.

Si al realizar la acción de CEBAR el flujo no se establece, tal acción no ha sido completada y el sifón no queda en operación, siendo necesario realizar nuevamente la acción de cebar cuidando entonces de que todo el aire contenido en el conducto haya sido evacuado, o lo que es igual: *que el conducto este totalmente lleno de líquido para poder establecer el flujo.*

Luego, el autocebado se logrará cuando en el conducto, de algún modo, sea capaz de llenarse por sí mismo e iniciar el flujo. Algunos autores como: González, Díaz, González y Guzmán, muestran soluciones de autocebado, Krystal y Annett estudian y profundizan en su diseño pero en todos los casos se utiliza el trabajo de una bomba, que al succionar el líquido contenido en un depósito o tubo, crea el vacío necesario para elevar el agua hacia la bomba e iniciar su impulsión.

En ningún caso, en la literatura estudiada, pudo encontrarse una solución que provocara el autocebado y elevación del líquido desde una superficie libre hasta un punto superior sin la utilización de un mecanismo o dispositivo consumidor de energía para crear el vacío.

3.4. Sifón vertedor

Cuando Bamat concluye en su definición del sifón exponiendo que: *"...Sin embargo, existen sifones que pueden cebarse automáticamente cuando la superficie líquida del depósito superior pasa de un determinado nivel."* se está refiriendo a los sifones vertedores estructuras que, sin lugar a dudas, conducen en el presente el mayor porcentaje del agua que circula a través de sifones, excluyendo el invertido.

El sifón vertedor ha sido mucho más investigado que el sifón verdadero; Trueba, Schokltisch, Creager, Justin & Hinds, King, Academia HÜTTE, USBR, así lo refieren, además el modelado de este tipo de estructura aparece en las tareas de investigación de los laboratorios de hidráulica, incluyendo también al Centro de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad de la Habana en 1968.

Las experiencias y métodos utilizados por Prettyjohns, en sus investigaciones sobre sifones vertedores en cierta medida, se utilizan en el presente estudio atendiendo a su método de trabajo en el laboratorio para una investigación similar aunque conceptualmente diferente.

3.5. Sifón invertido

En muchas ocasiones el término sifón es confundido con el sifón invertido o alcantarilla cuya definición es precisamente el inverso de la dada en el acápite 1.1.2., siendo el sifón invertido: *"...la conducción destinada a trasvasar líquido de un depósito superior a uno de nivel inferior, pasando por un punto más bajo que la superficie libre del depósito inferior."*

La población de sifones invertidos es muy superior a cualquier otra variante de la familia y es más frecuente en la ingeniería vial que en la propia hidráulica. Diseños y criterios sobre esta estructura son discutidos por Gibson, Calvin, King, Academia HÜTTE, Urrea y Fesser, Zurita, Ferrero, Carni, Burgess, Fresneda, sin embargo, algunos de ellos, o quizás la traducción, también incurren en la misma confusión que se señalaba inicialmente: llamar sifón al sifón invertido. Por supuesto que en cuanto al sifón invertido, el presente estudio no interviene en lo absoluto pero toma aspectos de las metodologías de cálculo y diseño desarrolladas para tales estructuras.

3.6. Estructura de entrada

Entre las soluciones más frecuentes y que prescinden de la bomba de vacío o del eyector se encuentra la utilización de una válvula de cheque en la estructura de entrada o rama ascendente, tal solución permite el cebado expulsando el aire al llenar el sifón desde la cumbre, lo cual es técnicamente menos complejo para diámetros menores que la extracción de este creando el vacío.

Sin embargo, aunque el cebado en este caso es resuelto de modo muy simple, la necesidad de extraer el aire que de todas formas se acumula en la cumbre, y la frecuente interrupción del flujo por este motivo, sin contar con las obstrucciones del mecanismo, también frecuente en las condiciones de trabajo donde suele utilizarse, implica la continua incertidumbre sobre el funcionamiento y la necesidad de realizar tal operación de cebado.

Por otra parte, el incremento de las pérdidas debidas a la válvula de cheque provoca una presión inferior a la que se alcanza cuando la toma es diseñada atendiendo a los coeficientes de pérdidas mínimos para la estructura de entrada y en consecuencia produce un rendimiento inferior para el diámetro y la carga disponibles.

Por tales razones Rusell advierte que *"...en ningún caso se instale una válvula de control en la rama ascendente..."* mientras que Mayol por su parte expresa *"...esta solución no es totalmente satisfactoria, por lo que es preferible el llenado por bomba de vacío"*.

3.7. Estructura de salida

En la literatura consultada se discuten los principios de funcionamiento, características del flujo entre otros aspectos sobre las estructuras de salida, mientras que en los gráficos que se presentan del sifón, es decir, el tubo encorvado, se observa con sus extremos sumergidos en sendos recipientes, así lo presentan Nekrasov y Rouse. Autores más cercanos a la práctica constructiva como Scháfer y Mayol, presentan esquemas ajustados a condiciones de posibles topografías reales. Pero en todos los casos la estructura de salida o punto de entrega se representa sumergido. Aparentemente se da por establecido que la entrega de un sifón es necesariamente sumergida.

Solo Gibson profundiza en este aspecto y señala que:

"Cuando el sifón descarga libre cualquier fallo en la rama de salida en que no trabaje totalmente lleno, de modo tal que admita aire en su ápice, el vacío se romperá y detendrá el flujo.. "

Este es un criterio plenamente válido y consecuente con las características de circulación de los sifones tal como han sido concebidos hasta el presente.

El vertimiento libre es aceptable para pequeños sifones, pero en los grandes solo sería admisible si el cebado se efectuara automáticamente ante cada interrupción y el costo capitalizado de esta operación resultara inferior al costo de la estructura de salida, sin considerar las afectaciones por el tiempo en que se suspende el suministro.

3.8. Ampliación de la búsqueda bibliográfica

Como se ha demostrado, la búsqueda de información sobre el tema de este trabajo ha sido extensa entre los autores e instituciones de reconocida autoridad en el campo de la hidráulica. No solamente se han tratado de referenciar los libros más recientes: *D. Pérez Franco de 1986*, y también las revistas donde aparece algún artículo relativo al tema: *The Institution of Civil Engineering Proceeding, Inglaterra, marzo de 1989*, sino también los más antiguos: *E. Collignon de 1880*, sin dejar de mencionar la documentada obra de *Rouse, "Historia de la Hidráulica"* que en su abarcador recorrido deja establecido que el sifón moderno es igual al de sus orígenes en conceptos e interpretación.

El desarrollo de los medios informáticos permitieron a los autores conocer todo lo que se ha publicado en el mundo desde 1985 hasta diciembre de 2004, bajo la palabra clave *SIPHON* en los CD-ROM de las instituciones: *National Technical Information Science*, *Science Citation Index* y *Concise Engineering and Technology Index*.

Todos los autores, a través de los resúmenes obtenidos en la búsqueda automatizada, refieren, estudian y utilizan lo que se ha sedimentado y consolidado en los últimos 258 años sobre el tema discutido.

3.9. Búsqueda de patentes

Si en la investigación bibliográfica pueden buscarse a todos los que estudian, explican y aplican los conocimientos establecidos, entre estos también estarán los que investigan y aportan nuevos conocimientos. Pero es más práctico buscar a estos últimos en los registros de patentes de invención, donde sin lugar a dudas debe encontrarse una solución para el cebado del sifón o la extracción de los gases acumulados en la cumbre sin utilizar una bomba de vacío o eyector, que además sea capaz de cebarse automáticamente cuando el flujo se interrumpa, condición esta que excluiría la necesidad de una estructura de salida sumergida.

Lógicamente una solución como esta solo será reconocida y se establecerá en la literatura si es capaz de demostrar teórica y prácticamente su validez, así como las mencionadas ventajas sobre las tecnologías disponibles hasta el presente.

En esta búsqueda se utilizaron los servicios de la ONHTEM, donde se recuperaron 32 documentos de Patentes registrados. Aunque la búsqueda se realizó en los fondos de 12 países, solo en 7 de estos se pudo encontrar registros sobre el tema investigado: en Rusia; USA; Francia; Japón; Inglaterra; Alemania y en Australia. En el tiempo la búsqueda abarcó desde 1969 hasta 1993 donde los últimos registros fueron realizados en Rusia y Japón en 1987.

Es interesante conocer algunas de estas soluciones que si bien resultan ingeniosas y resuelven determinados aspectos del problema crean también otras dificultades, lo que sin dudas ha impedido que estas patentes sustituyan a las soluciones tradicionales establecidas y comprobadas ya durante siglos.

La patente registrada por *Sokolov en 1969*, resuelve el problema del cebado al modo de una jeringuilla utilizando como émbolo un balón, que es arrastrado por un cable hasta una compuerta receptora. Al moverse el balón y levantar la compuerta receptora el sifón queda cebado y por ende el flujo establecido.

Sin embargo, antes de aplicar esta solución cabe preguntarse ¿Qué longitud máxima podrá recorrer el balón-émbolo que permita recuperar la posición inicial?, ¿Qué características deben cumplir las superficies en contacto y los ángulos del conducto para que el dispositivo tenga una vida útil razonable?. Estas, entre otras razones hacen que esta solución sea factible solo en un rango muy estrecho de aplicación.

En cuanto a la patente registrada por *Bujarin y Brachov en 1986*, la misma consta de un complicado mecanismo para resolver los mismos problemas ya conocidos, evidentemente esta y otras soluciones similares resultan demasiado complejas y menos confiables que utilizar la conocida bomba de vacío.

3.10. Comunicación con otros centros de investigaciones hidráulicas

Utilizando la vía e-mail se envió comunicación a otras entidades de reconocido prestigio internacional para solicitar información sobre el tema investigado, estas son:

- *British Hydromechanics Research Association. Cranfield, Inglaterra*
- *International Institute for Infrastructural - Hydraulic and Environmental Engineering. Delft Holanda*
- *Delft Hydraulic Laboratory Consultancy & Research. Delft, Holanda.*
- *Laboratorio Hidráulico del CRIS-DSR-ENEL, Milán, Italia*

Es importante resaltar que nunca se recibió respuesta por parte de estas instituciones.

3.11. Limitaciones en el uso de sifones

En la literatura estudiada no se han encontrado referencias a este tipo de obra en la forma en que si aparecen para los sifones invertidos, es decir sobre el comportamiento de obras realizadas.

Como toda obra hidráulica, la decisión sobre utilizar una u otra solución depende de la necesidad a satisfacer, de las posibilidades materiales, tecnológicas y financieras para su realización, y cada situación particular exige a la vez sus propias soluciones, las que generalmente pueden ser seleccionadas entre distintas variantes. Aquí, si una posible variante de solución es la construcción de un sifón probablemente el ingeniero decida otra distinta, pues según el criterio de A. Schoklitsh:

Los sifones " ... sirven para salvar pequeñas tomas, pero su servicio es complicado, pues, por ejemplo, hay que extraer continuamente los gases desprendidos del agua y acumulados en el vértice del sifón. Además, la construcción es difícil, y por esto solamente en casos excepcionales debe construirse un sifón de este tipo..."

Criterios parecidos son frecuentes en las entidades de proyectos hidráulicos y no parece que la población de sifones sea muy numerosa, sino prácticamente inexistente. Pero es muy probable que existan obras y sistemas que resultarían más económicos utilizando un sifón. Desde luego, distinto del que critica Schoklitsh.

3.12. Conclusiones del capítulo

El resultado de la investigación realizada confirma que el diseño y empleo de sifones esta limitado por las características del flujo. También se destaca el hecho de que se ha tratado de encontrar una solución práctica para resolver tales limitaciones, pero sin resultados hasta el presente, debido a que ha estado dirigida hacia dispositivos auxiliares y mecanismos sin considerar la propia naturaleza del flujo y la forma de conducción.

Se confirma a través de la búsqueda e investigación, que criterios tales como:

- Que el tubo tiene que estar totalmente lleno para establecer el flujo.
- Que el método empleado para el cebado será una bomba volumétrica o un eyector.
- Que la rama de salida debe realizar la entrega sumergida.

constituyen leyes para el diseño en los sifones que no pueden ser violadas y que su incumplimiento provocará la imposibilidad absoluta de funcionar para la primera Ley o el funcionamiento ineficiente e inseguro para las otras dos.

Como conclusión de la investigación realizada se hace evidente la ventaja que reportaría la posibilidad de diseñar, construir y operar sifones que no requieran del equipamiento auxiliar establecido hasta el nivel de conocimiento actual, es decir: empleando bombas de vacío, eyectores u otro dispositivo de operación eléctrica o manual para lograr el cebado, sin que, además deban ser controlados y operados sistemáticamente para eliminar los gases que se acumulan en la cumbre para mantener el flujo una vez que se establece la circulación, y que tampoco se requiera de la descarga sumergida.

CAPITULO IV: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

4.1. Condiciones de circulación

Las condiciones de circulación en un sifón se determinan aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos en que se requiere precisar las mismas, en la figura 4.1 se plantea para el flujo total entre los planos A y B.

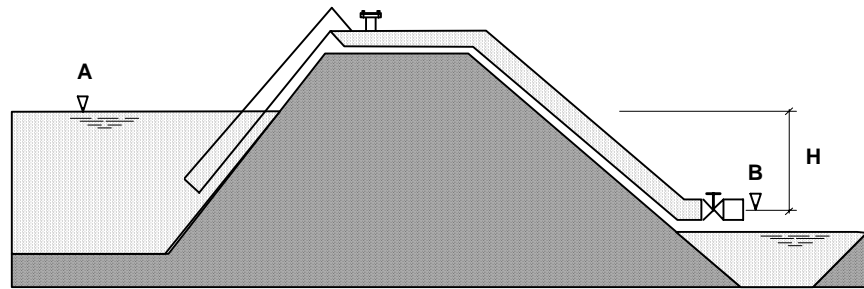


Figura 4.1. Representación esquemática de los planos A y B para el análisis de las condiciones de circulación en el sifón.

Si se aplica Bernoulli entre los puntos A y B, se tiene que:

$$h_a + \frac{v_a^2}{2g} + \frac{P_a}{\gamma} = h_b + \frac{v_b^2}{2g} + \frac{P_b}{\gamma} + hf_{a-b} \quad (4.1)$$

Tomando como base que el plano de referencia pasa por B, los términos de la ecuación [4.1] se expresan como:

γ :	Densidad del agua	:1000 (kg/m ³)
h_a :	H Altura del plano A sobre el plano B	:Carga disponible (m)
$\frac{v_a^2}{2g}$:	Carga de velocidad en el plano A	:0
$\frac{P_a}{\gamma}$:	Carga de presión sobre el plano A	:10.33 (m)
h_b :	Altura del plano B	:0
$\frac{v_b^2}{2g}$:	Carga de velocidad en el plano B	:(m)
$\frac{P_b}{\gamma}$:	Carga de presión sobre el plano B	:10.33 (m)
hf_{a-b} :	Carga debida a las pérdidas por fricción y locales en la tubería en los planos A y B	:(m)

Si se aplican estas condiciones en la ecuación (4.1) se obtiene que:

$$H = \frac{v^2}{2g} + hf_{a-b} \quad (4.2)$$

4.1.1. Pérdidas de carga en la tubería entre los puntos A y B

Si se asume las pérdidas de carga entre los puntos A y B como:

$$h_{a-b} = hf_{\text{fricción}} + hf_{\text{locales}} \quad (4.3)$$

de donde:

$$hf_{\text{fricción}} = 10.6430 \cdot \left(\frac{Q}{C \cdot D^{2.63}} \right)^{1.852} \cdot L$$

$$hf_{\text{locales}} = \sum K_{\text{Loc}} \frac{v^2}{2g}$$

Entonces se obtiene que:

$$h_{a-b} = 10.6430 \cdot \left(\frac{Q}{C \cdot D^{2.63}} \right)^{1.852} \cdot L + \sum K_{\text{Loc}} \frac{v^2}{2g} \quad (4.4)$$

Donde:

$\sum K_{\text{Loc}}$: Sumatoria de los coeficientes de pérdidas locales entre los puntos A y B (adim)

Q : Caudal de diseño del sifón (m^3/s)

C : Coeficiente de fricción de Hazen–Williams (adim)

L : Longitud de la tubería entre los puntos A y B (m)

D : Diámetro del conducto (m)

g : Aceleración de caída libre (9.81 m/s^2)

v : Velocidad de circulación del fluido en la tubería (m/s)

4.1.2. Velocidad de circulación

Si se sustituye la ecuación (4.4) en la ecuación (4.2) se obtiene que :

$$H = \frac{v^2}{2g} + 10.6430 \cdot \left(\frac{Q}{C \cdot D^{2.63}} \right)^{1.852} \cdot L + \sum K_{\text{Loc}} \frac{v^2}{2g}$$

Si se extrae como factor común el término $\frac{v^2}{2g}$, se tiene que:

$$H = \frac{v^2}{2g} (1 + \sum K_{\text{Loc}}) + 10.6430 \cdot \left(\frac{Q}{C \cdot D^{2.63}} \right)^{1.852} \cdot L$$

$$H = \frac{v^2}{2g} (1 + \sum K_{Loc}) + hf_{fricción}$$

Despejando la velocidad de circulación, para el flujo establecido, se obtiene que:

$$v = v_{fe} = 4.43 \sqrt{\frac{H - hf_{fricción}}{1 + \sum K_{Loc}}} \quad (4.5)$$

Donde:

$\sum K_{loc}$: Sumatoria de los coeficientes de pérdidas locales entre los puntos A y B (adim)

H : Altura entre los planos A y B (m)

$hf_{fricción}$: Pérdidas de carga por fricción entre los puntos A y B (m)

v : (v_{fe}) Velocidad de circulación del fluido en el sifón para el flujo establecido (m/s)

Lo que significa que la velocidad de circulación en el sifón depende solamente de la diferencia de altura entre los niveles de los planos superior e inferior y de las pérdidas por fricción y locales de la tubería.

Evidentemente, la velocidad para el flujo establecido no depende de la altura a que se sitúe la cumbre. Sin embargo, esto solo es posible dentro de ciertos límites ya que con el aumento de la altura (Z) disminuye la presión absoluta en la sección superior del sifón y cuando ésta se hace igual a la presión del vapor saturado se produce la cavitación formándose vapor que se dirige al punto más elevado de la tubería. Como consecuencia de este fenómeno el gasto en circulación disminuye en la medida en que el vapor se acumula hasta que cesa el flujo.

El valor de la presión del vapor saturado a la temperatura de 25 (°C) es de 0,032 (kg/cm²) (0,32 m).

4.1.3. Influencia de la altura entre la cumbre y el nivel de aguas en el depósito (Z)

Para el análisis de la influencia de la altura entre la cumbre y el nivel de aguas en el depósito (Z), se aplica la ecuación de Bernoulli entre los puntos en que se requiere precisar las mismas, en la figura 4.2 se plantea para el flujo entre los planos A y C.

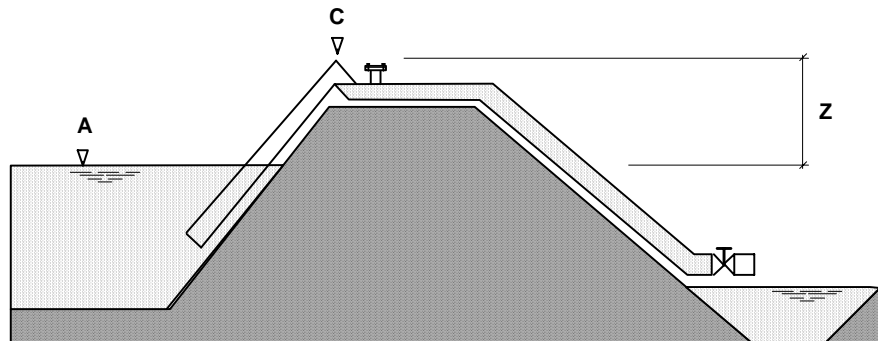


Figura 4.2. Representación esquemática de los planos A y C para el análisis de las condiciones de circulación en el sifón.

Si se aplica Bernoulli entre los puntos A y C, se tiene que:

$$h_a + \frac{v_a^2}{2g} + \frac{P_a}{\gamma} = h_c + \frac{v_c^2}{2g} + \frac{P_c}{\gamma} + hf_{a-c} \quad (4.6)$$

Tomando como base que el plano de referencia pasa por A, los términos de la ecuación (4.6) se expresan como:

γ :	Densidad del agua	:1000 (kg/m ³)
h_a :	Altura del plano A	:0
$\frac{v_a^2}{2g}$:	Carga de velocidad en el plano A	:0
$\frac{P_a}{\gamma}$:	Carga de presión sobre el plano A	:10.33 (m)
h_c :	Z Altura del plano C sobre el plano A	:(m)
$\frac{v_c^2}{2g}$:	$\frac{v_{fe}^2}{2g}$ Carga de velocidad en el plano C para el flujo establecido	:(m)
$\frac{P_c}{\gamma}$:	$\frac{P_{fe}}{\gamma}$ Carga de presión sobre el plano C para el flujo establecido	:(m)
hf_{a-c} :	Carga debida a las pérdidas por fricción y locales en la tubería en los planos A y C	:(m)

Si se aplican estas condiciones en la ecuación (4.6) se obtiene que:

$$\frac{P_{fe}}{\gamma} = 10.33 - Z - \frac{v_{fe}^2}{2g} - hf_{a-c} \quad (4.7)$$

Si se considera la cumbre del sifón (punto C) como el punto crítico en cuanto al comportamiento de las presiones en el sifón, ya que con el aumento de (Z) es posible disminuir la presión absoluta en este punto, pudiéndose alcanzar la igualdad con la presión de vapor saturado, lo cual provocaría la ocurrencia del fenómeno de cavitación, la ecuación (4.7) reviste especial importancia, pues a través de ella se puede obtener el valor de la presión que tiene lugar en la cumbre, cuando el flujo queda totalmente establecido.

Si a los efectos prácticos se aplica el criterio de A. Schäffer, quien establece 2,00 (m) como valor mínimo para la presión en la cumbre, para prevenir el fenómeno de la cavitación, entonces se debe asumir siempre que:

$$\frac{P_{fe}}{\gamma} \geq 2.00 \text{ (m)}, \text{ para evitar la ocurrencia de la cavitación y sus consecuencias.}$$

De donde se obtiene un valor inferior al posible teóricamente, pero capaz de garantizar la no ocurrencia del fenómeno de la cavitación y sus consecuencias,

4.1.4. Influencia del descenso

Las condiciones del descenso en el sifón se determinan aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos en que se requiere precisar las mismas, en la figura 4.3 se plantea para el flujo entre los planos C y B.

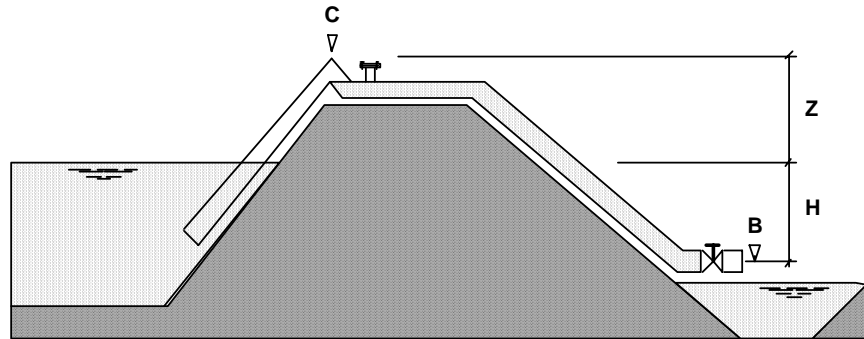


Figura 4.3. Representación esquemática de los planos C y B para el análisis de las condiciones del descenso en el sifón.

Si se aplica Bernoulli entre los puntos C y B, se tiene que:

$$h_c + \frac{v_c^2}{2g} + \frac{P_c}{\gamma} = h_b + \frac{v_b^2}{2g} + \frac{P_b}{\gamma} + hf_{c-b} \quad (4.8)$$

Tomando como base que el plano de referencia pasa por B, los términos de la ecuación [3.8] se expresan como:

γ :	Densidad del agua	:1000 (kg/m ³)
h_c :	(Z+H) Altura del plano C sobre el plano B	:(m)
$\frac{v_c^2}{2g}$:	$\frac{v_d^2}{2g}$ Carga de velocidad en el plano C durante el descenso	:(m)
$\frac{P_c}{\gamma}$:	$\frac{P_d}{\gamma}$ Carga de presión sobre el plano C durante el descenso	:(m)
h_b :	Altura del plano B	:0
$\frac{v_b^2}{2g}$:	$\frac{v_d^2}{2g}$ Carga de velocidad en el plano B durante el descenso	:(m)

$\frac{P_b}{\gamma}$: Carga de presión sobre el plano B :10.33 (m)

hf_{c-b} : Carga debida a las pérdidas por fricción y locales en la tubería en los planos A y B : (m)

Si se aplican estas consideraciones a la ecuación (4.8), se obtiene que:

$$(Z + H) + \frac{v_d^2}{2g} + \frac{P_d}{\gamma} = \frac{v_d^2}{2g} + 10.33 + hf_{c-b}$$

Aplicando la ecuación de continuidad y asumiendo que el diámetro del sifón no varía, se tiene que la velocidad de circulación el sifón durante el descenso es única (v_d), obteniéndose:

$$\frac{P_d}{\gamma} = 10.33 + hf_{c-b} - Z - H \quad (4.9)$$

Tomando en cuenta que los sifones operan con la cumbre a cierta altura sobre el nivel del agua a extraer, es necesario forzar el agua hacia la cumbre por medio de la acción de la presión atmosférica.

Si se logra que la presión en el tubo que lleva el agua del depósito a la cumbre, sea inferior a la atmosférica, el agua subirá a una altura equivalente a la de la depresión creada, o sea, la diferencia entre la presión atmosférica y la presión en el interior de la tubería. Esta diferencia se denomina vacío perfecto o vacío parcial, dependiendo de si se logra o no una diferencia equivalente al valor absoluto de la presión atmosférica.

El vacío perfecto, al nivel del mar sería 1.033 (kg/cm²), por debajo de la presión atmosférica. Por consiguiente, 10.33 (m) representa la altura máxima que podrá alcanzar la columna de agua que la presión atmosférica puede elevar dentro del tubo del sifón, con la ayuda de un vacío perfecto en el mismo.

En la bibliografía consultada, se ha podido establecer que en el sifón, solo se ha podido lograr la elevación del flujo del depósito hasta la cumbre, por medio del uso de dispositivos auxiliares, bombas de vacío o eyectores, encargados de extraer el aire de su interior creando a su vez una depresión o vacío que permite lograr el propósito del cebado.

Si se toma en cuenta los criterios antes planteados, en el presente estudio, para lograr la depresión o vacío necesario para elevar el flujo del depósito a la cumbre, se utilizará el volumen de agua almacenado en la rama descendente, el cual actuará como émbolo para lograr dicho propósito.

Si se adopta el criterio de que los líquidos circulan del lugar de mayor energía al lugar de menor energía, resulta una condición importante a tener en cuenta en el sifón autocebante el garantizar siempre que la carga a presión que tiene lugar en la cumbre durante el descenso del émbolo

$\left(\frac{P_d}{\gamma}\right)$ sea inferior a la carga a presión que tiene lugar en dicho punto para el flujo establecido $\left(\frac{P_{fe}}{\gamma}\right)$.

Por tal motivo, durante el diseño del sifón autocebante, deberá adoptarse como condición de comprobación importante, el criterio:

$\left(\frac{P_d}{\gamma}\right) < \left(\frac{P_{fe}}{\gamma}\right)$ para que se establezca la circulación del flujo.

4.1.5. Carga estática de aspiración

En un sifón, se le llama carga estática de aspiración a la distancia vertical entre la cumbre y el nivel del líquido en el depósito de donde se extrae.

Como se vio en el epígrafe 4.1.3, la succión que puede realizar un sifón tiene un valor práctico que debe garantizar la no ocurrencia del fenómeno de cavitación para el flujo establecido

$\left(\frac{P_{fe}}{\gamma} \geq 2.00(m)\right)$ y puede ser determinado por la expresión:

$$\frac{P_{fe}}{\gamma} = 10.33 - Z - \frac{v_{fe}^2}{2g} - hf_{a-c}$$

4.2. Fundamentos para el diseño de un sifón autocebante sin equipamiento

Un diseño que cumpla los objetivos propuestos en el Capítulo II del presente trabajo, deberá satisfacer las siguientes condiciones:

- Llenar hasta el máximo punto posible la tubería del sifón con el objetivo de dejar el menor volumen vacío en el conducto.
- Utilizar la caída del agua en la rama descendente, incluyendo el tramo horizontal en la cumbre como un émbolo hidráulico.
- El vacío creado por el émbolo líquido debe ser suficiente como para elevar el volumen faltante en la tubería y alcanzar los parámetros de trabajo del flujo establecido.

Las condiciones antes mencionadas, conllevan a obtener la configuración dada en la figura 4.4, cuya característica fundamental radica en la garganta que se sitúa en el punto, que en este diseño, determina la división entre las ramas ascendente y descendente.

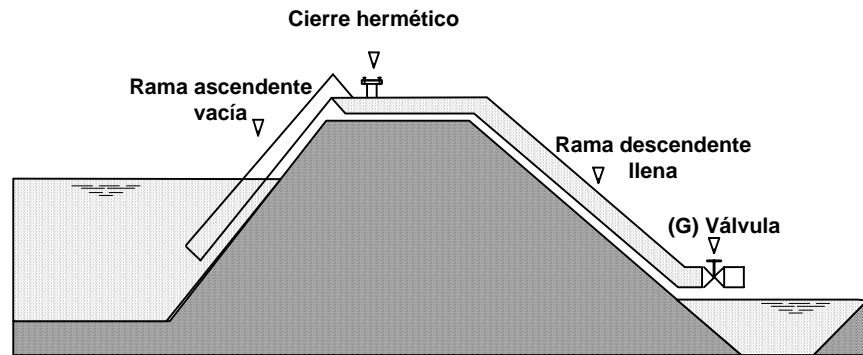


Figura 4.4. Representación esquemática de la configuración del sifón estudiado.

En la figura 4.5, se puede observar el detalle de la garganta, la cual permite el llenado de todo el tramo horizontal o casi horizontal que en condiciones normales es necesario realizar para salvar la cortina de un embalse, y en el cual se hace coincidir la cota de la cresta vertedora (I) con la corona de la tubería en la rama descendente (J) y tiene la función de retener el agua a sección llena en toda la rama descendente mientras que el sifón no se encuentra en operación.

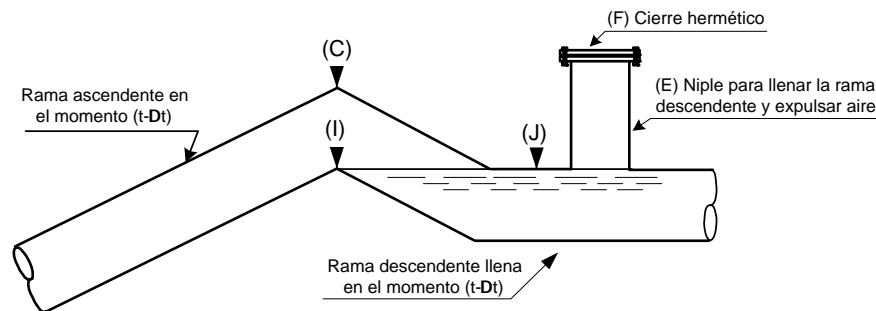


Figura 4.5. Detalle de la garganta del sifón.

Por su parte, la válvula que se coloca al final del sifón (G) (ver figura 4.4) cuando está cerrada permite retener el agua a sección llena en toda la rama descendente, pero una vez abierta permite también dar continuidad al flujo cuando en el sifón se establece la circulación.

4.3. Funcionamiento del sistema

Una vez que mediante cualquier método elemental y a través de la conexión (E), se ha completado el llenado del tramo (C-G), se cierra la comunicación con la atmósfera mediante una tapa (F) (válvula, tapón, brida etc.) de modo hermético, y se procede a abrir la válvula (G) en la salida, en este instante el agua depositada en el tramo (C-G) comienza su evacuación y el nivel en la corona inicia el descenso, produciéndose el vaciado de un depósito semicerrado que descarga libre a la atmósfera.

El nivel del líquido se encuentra en la posición J para el tubo totalmente lleno, comparado con una bomba recíprocante, corresponderá con la posición extrema del pistón iniciando el movimiento para la carrera, que podemos llamar de succión.

Al iniciarse el movimiento de la superficie líquida, es decir el descenso del nivel horizontal en el conducto, la presión se hace menor por el comienzo del enrarecimiento del ambiente dentro del mismo.

Este enrarecimiento (vacío), a su vez origina entonces que la presión atmosférica, actuando del lado de la succión haga que la columna líquida se eleve en la rama ascendente y que este comience a entrar en el tramo horizontal. El líquido continua entrando durante el descenso de la superficie, pero a diferencia de la carrera del pistón en la bomba reciprocante, *cuando termina la carrera para iniciar un nuevo ciclo*, en este caso será; cuando se ha completado el volumen equivalente al volumen de vacío inicial, entonces se habrá llenado totalmente el conducto y se establecerán las condiciones de circulación normales para el flujo en el sifón. En este momento el pistón se transforma en flujo.

Este comportamiento hace que el efecto autocebante dependa solo del desplazamiento del pistón hidráulico hasta alcanzar el volumen que permite completar la capacidad del conducto.

Una vez que se completa el volumen, desaparece el pistón y se establece el flujo, ocasionando que la velocidad de circulación vaya aumentando y la presión disminuyendo hasta alcanzar los valores para el flujo establecido.

Al cerrarse la válvula de control, la circulación se detiene y el líquido en la rama ascendente queda retenido, debido a que la presión interna del tubo es menor a la presión atmosférica, debido a que el sistema es totalmente hermético.

Al abrirse la válvula de control nuevamente, se establece el flujo dado que el sifón se encuentra cebado. Este ciclo se repetirá indefinidamente, mientras la válvula de control permanezca abierta, y la carga hidráulica sea capaz de mantener el gradiente necesario para las condiciones del flujo establecido.

4.4. Influencia del diámetro de la conducción en la ocurrencia del fenómeno

Si bien el fenómeno del autocebado y el establecimiento del flujo ocurren en cualquier diámetro, no es posible afirmar que éste sea independiente del mismo, debido a que existe una relación estrecha entre este y las condiciones específicas en que se quiere emplear este dispositivo.

Si se parte del criterio de que, la altura de succión y la altura de descenso se conocen y, por ende es posible determinar a partir de ellas la longitud de la tubería ascendente, la longitud de la tubería descendente y sus pérdidas locales y por fricción, se puede afirmar que uno de los aspectos más importantes para el diseño del sifón lo constituye la búsqueda del diámetro que garantice, para las condiciones específicas el cumplimiento de que:

- a) $\frac{P_{fe}}{\gamma} \geq 2.00 \text{ (m)}$, para evitar la ocurrencia de la cavitación y sus consecuencias y,
- b) $\left(\frac{P_d}{\gamma}\right) < \left(\frac{P_{fe}}{\gamma}\right)$ para el establecimiento del flujo de circulación.

En acápites anteriores, se concluyó que ambas condiciones, tienen relación directa con las pérdidas, evidenciándose que a mayores pérdidas se empeora el requerimiento a cumplir.

Si se considera que el diámetro es inversamente proporcional a las pérdidas, es decir, a menor diámetro mayores pérdidas y viceversa, se puede concluir que el diseño del sifón debe estar encaminado a la obtención del diámetro mínimo capaz de garantizar una pérdida en el sistema que permita el cumplimiento de los requisitos mencionados.

4.5. Conclusiones del capítulo

- a. La solución presentada en el capítulo no está referida en la historia de los sifones, conocida en la hidráulica.
- b. Los requisitos para la ocurrencia del efecto autocebante y el establecimiento del flujo se verifican teóricamente en el presente capítulo.
- c. El sifón concebido en el presente capítulo, tiene la capacidad de autocebado y funcionamiento sin dispositivos auxiliares para el cebado y mantenimiento de flujo, a excepción de una válvula de control en la rama descendente.
- d. Los resultados obtenidos teóricamente, contradicen las condiciones referidas en la literatura y que fueran enumeradas en el capítulo anterior.
- * La tubería del sifón no requiere estar totalmente llena para iniciar el establecimiento del flujo.
- * El método empleado para la preparación del sistema será el llenado de la rama descendente hasta el nivel determinado por la garganta.
- * La rama de salida no requiere de la entrega sumergida para mantenerse en servicio.
- e. El efecto autocebante alcanzado convierte definitivamente al sifón en un conducto hidráulico sencillo y sin las complejidades operativas que hasta la fecha le limitaban en su aplicación.
- f. Según el estudio teórico, el diseño del sifón debe estar encaminado a la obtención del diámetro mínimo capaz de garantizar una pérdida en el sistema que permita el cumplimiento de los requisitos establecidos para el adecuado funcionamiento del sifón.

4.6. Recomendaciones del capítulo

- a. Llevar a cabo la instalación de los prototipos para profundizar en las características y propiedades del fenómeno.
- b. Realizar un prototipo totalmente en tubería transparente. Esta característica permitiría observar el fenómeno de manera completa, el ascenso de la columna en la rama ascendente, la mezcla y arrastre del aire en la descendente y evaluar este comportamiento en función de la pendiente en la cima.
- c. Revisar la teoría ajustándola a los resultados que se obtengan en la instalación de los prototipos.

CAPITULO V: METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO

5.1. Metodología para el diseño de un sifón autocebante sin equipamiento auxiliar para el cebado y mantenimiento de flujo

5.1.1. Condiciones de diseño y uso del sifón

Un sifón autocebante puede ser utilizado bajo las siguientes condiciones:

- a) La diferencia entre la cota de entrada (Z_E) y la cota de salida (Z_S) es mayor o igual a cero.

$$Z_E - Z_S \geq 0$$

- b) La diferencia entre la cota de entrada (Z_E) y la cota de salida (Z_S) es menor a cero, pero la diferencia entre la cota del NAN (Z_{NAN}) y la cota de salida (Z_S) es mayor a cero.

$$Z_E - Z_S < 0 \quad \text{y} \quad Z_{NAN} - Z_S > 0$$

5.1.2. Partes de las que consta un sifón

- a) Conducto de sección circular.
- b) Ápice o cumbre.
- c) Conexión para el llenado
- d) Estructuras de entrada y de salida.

5.1.3. Consideraciones hidráulicas de diseño

Sin importar el material del conducto a ser empleado, siempre se debe garantizar la total hermeticidad en la conducción.

5.1.4. Validez de la metodología de diseño

La metodología de diseño es válida solo para diámetros iguales o mayores a 2" (51 mm).

5.1.5. Procedimiento de cálculo de un sifón con rama ascendente inclinada o vertical

Información requerida:

- Q: Caudal de diseño (m^3/s)
- Z_{NAN} : Cota del nivel de aguas normales en el embalse (m.s.n.m.)
- Z_{NVM} : Cota del nivel de volumen muerto (m.s.n.m.)
- Z_S : Cota del eje de la tubería de salida del sifón (m.s.n.m.)
- Z_{CD} : Cota de la corona del dique (m.s.n.m.)
- T: Temperatura promedio anual de la zona donde se instalará el sifón ($^{\circ}\text{C}$)
- L_{HT} : Longitud del terreno en la rama horizontal (m)
- L_V : Longitud de la tubería que contiene la válvula en la descarga (m)
- Material de la tubería
- m_M : Talud mojado del dique
- m_S : Talud seco del dique

Pasos:

1º) Cálculo de la viscosidad cinemática del agua (ν)

$$\nu = (1.758506 - 0.04814959 \cdot (T) + 0.00060223 \cdot (T)^2 - 0.000002681414 \cdot (T)^3) \cdot 10^{-6}$$

Donde:

ν : Viscosidad cinemática del agua (m^2/s) (ver Tabla 5.1)

T: Temperatura promedio anual de la zona donde se instalará el sifón ($^{\circ}\text{C}$)

Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	0.00	4.40	10.00	15.60	21.60	26.70	32.20	37.80
Viscosidad	m^2/s	1.790×10^{-6}	1.550×10^{-6}	1.310×10^{-6}	1.120×10^{-6}	0.975×10^{-6}	0.864×10^{-6}	0.765×10^{-6}	0.684×10^{-6}
Ecuación	$\nu = (1.758506 - 0.04814959 \cdot (T) + 0.00060223 \cdot (T)^2 - 0.000002681414 \cdot (T)^3) \cdot 10^{-6}$								

Tabla 5.1. Valores de la viscosidad cinemática del agua en función de la temperatura

2º) Selección del Coeficiente de Hazen–Williams (C) (adimensional)

Con el material de la tubería, en la Tabla 5.2, se selecciona el valor del Coeficiente de Hazen–Williams que le corresponde.

MATERIAL	C
PVC	150
Tuberías de acero negro	120

Tabla 5.2. Valores del coeficiente C de Hazen–Williams en función del material del conducto

3º) Cálculo de la carga hidráulica del sifón (H)

4º) Cálculo de la longitud total del sifón (L)

- Cálculo de la longitud de la tubería ascendente (L_A)
- Cálculo de la longitud de la tubería horizontal (L_H)
- Cálculo de la longitud de la tubería descendente (L_D)
- Cálculo de la longitud horizontal de la tubería que contiene la válvula en la descarga (L_V)
- Cálculo de la longitud total de la tubería del sifón (L)

$$L = L_A + L_H + L_D + L_V \text{ (m)}$$

Donde: L_A : Longitud de la tubería ascendente (m)
 L_H : Longitud de la tubería horizontal (m)
 L_D : Longitud de la tubería descendente (m)
 L_V : Longitud horizontal de tubería que contiene la válvula en la descarga (m)

- 5º) Cálculo del diámetro del sifón (D)
- 6º) Diseño de la estructura de entrada del sifón
- 7º) Dimensionamiento de la garganta del sifón
- 8º) Cálculo del Número de Reynolds (R_e)
- 9º) Cálculo del coeficiente de fricción (f).
- 10º) Cálculo de las pérdidas de carga a lo largo del sifón
- 11º) Cálculo de la velocidad en el sifón para la condición de flujo establecido (v_e)
- 12º) Cálculo de la presión en la cumbre para el flujo establecido $\left(\frac{P_e}{\gamma}\right)$

Nota: En este paso se deberá proceder a comprobar que:

Si $\frac{P_e}{\gamma} \leq 2.00$ (m), se acepta el diseño para el valor de (H) dado.

Si $\frac{P_e}{\gamma} > 2.00$ (m), no se acepta el diseño para el valor de (H) dado, pues es posible la ocurrencia del fenómeno de la cavitación. En este caso se recomienda disminuir el valor de (H) y reiniciar el cálculo a partir del paso 9º, hasta lograr que $\frac{P_e}{\gamma} \leq 2.00$ (m).

- 13º) Cálculo de las pérdidas en la rama descendente desde la cumbre hasta la salida
 - 14º) Cálculo de la presión creada por el émbolo en la cumbre durante el descenso $\left(\frac{P_d}{\gamma}\right)$
 - 15º) Comparación del valor de la presión creada por el émbolo con el valor de la presión calculada para el flujo establecido
- Si $\frac{P_d}{\gamma} \leq \frac{P_{fe}}{\gamma}$ El sistema será capaz de establecer el efecto de autocebado y funcionará.
- 16º) Resumen de las condiciones para que ocurra el efecto de autocebado en un sifón.

Condición necesaria.

- a. La presión creada por el émbolo hidráulico $\frac{P_d}{\gamma}$ durante el descenso es menor o igual que la presión en la cumbre para el flujo establecido $\frac{P_{fe}}{\gamma}$, $\left(\frac{P_d}{\gamma} \leq \frac{P_{fe}}{\gamma}\right)$.

- b. La presión en la cumbre para el flujo establecido $\frac{P_e}{\gamma}$ es menor o igual a 2.00 (m) para que no ocurra el fenómeno de la cavitación, $\left(\frac{P_c}{\gamma} \leq 2.00(m) \right)$.

17º) Cálculo de la curva de capacidad de servicio $H_{vs} Q$ del sifón diseñado.

18º) Conclusiones del diseño

Donde se procede a la elaboración de la memoria de cálculo y los planos en planta y perfil así como de detalle del sifón diseñado.

CAPITULO VI: INSTALACIONES Y MÉTODOS DE EXPERIMENTACIÓN

6.1. Estudio de un prototipo de sifón en el Conjunto Hidráulico Sapocó

6.1.1. Diseño de la instalación

El prototipo de sifón a construir fue diseñado aplicando la metodología correspondiente al sifón con rama ascendente inclinada, que se presenta en el capítulo V del trabajo. Para ello se levantó la información necesaria del Conjunto Hidráulico Sapocó donde se deseaba instalar el sifón. Esta información inicial se puede apreciar en la tabla 6.1.

Descripción	Notación	Valor	Unidad
Cota del nivel de aguas normales (NAN)	Z_{NAN}	469.200	(m.s.n.m)
Cota del eje de la tubería de entrada al sifón	Z_E	469.000	(m.s.n.m)
Cota del eje de la tubería de salida del sifón	Z_S	459.800	(m.s.n.m)
Cota de la corona del dique	Z_{CD}	470.694	(m.s.n.m)
Temperatura promedio anual de la zona	T	24.000	(°C)
Viscosidad cinemática del agua	ν	9.127E-07	(m ² /s)
Talud mojado del dique	m_M	3.000	(adim)
Talud seco del dique	m_S	3.000	(adim)
Longitud de terreno en la rama horizontal	L_{HT}	5.000	(m)
Longitud de la tubería que contiene la válvula	L_V	0.300	(m)
Carga hidráulica	H	9.400	(m)

Fuente: Descripción y diagnóstico del Conjunto Hidráulico Sapocó de la localidad de Concepción. Prefectura del Departamento de Santa Cruz- Bolivia, 2003.

Tabla 6.1. Información del Conjunto Hidráulico Sapocó

Una vez que se contó con la información requerida, se realizó el cálculo de las dimensiones del sifón para su construcción, adoptándose como criterio, la selección del diámetro mínimo que se podía instalar para las condiciones existentes en el lugar, de manera que su montaje fuera posible sin el uso de maquinaria pesada adicional y los costos de instalación fueran accesibles económicamente. Las dimensiones del sifón calculado, se pueden ver en la tabla 6.2.

Descripción	Notación	Valor	Unidad
Diámetro del sifón	D	3.000	(pulg)
Material de la tubería		PVC	
GARGANTA DEL SIFÓN			
Angulo de inclinación de la rama ascendente	β	71.565	(°)
Longitud de la base de la garganta	L_G	0.457	(m)
Longitud del tramo ascendente de la garganta	L_1	0.241	(m)
Longitud del tramo descendente de la garganta	L_2	0.266	(m)
Altura del conducto de cebado	h_c	0.080	(m)
Cota de la cumbre del sifón	Z_C	470.851	(m.s.n.m)
Altura de elevación del agua NAN-cumbre	Z	1.651	(m)
Carga hidráulica	H	9.400	(m)
Longitud de la tubería ascendente	L_A	5.598	(m)
Longitud de la tubería horizontal	L_H	4.543	(m)
Longitud de la tubería descendente	L_D	34.691	(m)
Longitud total de tubería del sifón	L_T	45.398	(m)

Fuente: Elaboración propia, en base a cálculo

Tabla 6.2. Dimensiones del sifón diseñado

6.1.2. Esquema de la instalación

En la figura 6.1 se puede ver un esquema de la instalación donde se realizarían las investigaciones, en la misma se puede observar las cotas y dimensiones más relevante objeto de estudio.

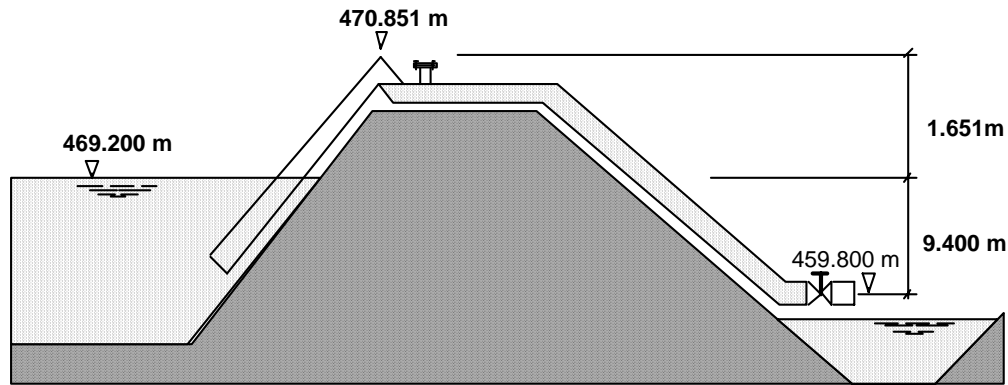


Figura 6.1. Esquema de la instalación del sifón estudiado.

6.1.3. Alcance de la investigación

En esta etapa de la investigación se pretende evaluar:

- a) La factibilidad del uso del sifón en condiciones reales.
- b) La relación de los resultados obtenidos con el modelo matemático desarrollado y, los registrados durante la experimentación.
- c) La posibilidad del uso de válvulas diferentes a la de media vuelta.
- d) La efectividad de la garganta diseñada, para el propósito concebido.

6.1.4 Metodología a seguir para la experimentación

La metodología a seguir para la ejecución de la experimentación deberá ser:

- a) Montaje del sifón para la condición concebida durante su diseño a través del modelo matemático.
- b) Registro de los resultados obtenidos para las condiciones antes mencionadas.
- c) Evaluación del comportamiento del sifón durante la etapa de cebado, como resultado del uso de una válvula de cortina.
- d) Evaluación del comportamiento del sifón como consecuencia de la variación de la altura (Z), manteniendo el mismo valor de (H).

6.1.5. Instalación del sifón

A momento de efectuar el montaje del sifón, fue necesario cambiar el lugar en el que inicialmente se tenía previsto instalar, por la cortina de la presa mayor, debido a que no fue posible salvar la dificultad que representaba la presencia de un parapeto de hormigón de 1,15 (m) de altura, ubicado sobre la corona de la presa.

Por tal motivo se decidió, instalar el sifón encima de la corona del dique de la presa menor (ver foto 1), esta situación provocó algunos cambios de relevante importancia en las variables de diseño del sifón, que se detallan en la tabla 6.3.

Descripción	Notación	Valor	Unidad
Diámetro del sifón	D	3.000	(pulg)
Material de la tubería	PVC		
Cota de la corona del dique	Z_{CD}	470.694	(m.s.n.m)
Cota del eje de la tubería de entrada al sifón	Z_E	468.680	(m.s.n.m)
Cota del eje de la tubería de salida del sifón	Z_S	462.184	(m.s.n.m)
Talud mojado del dique	m_M	3.000	(adim)
Talud seco del dique	m_S	3.915	(adim)
GARGANTA DEL SIFÓN			
Angulo de inclinación de la rama ascendente	β	71.565	(°)
Longitud de la base de la garganta	L_G	0.457	(m)
Longitud del tramo ascendente de la garganta	L_1	0.241	(m)
Longitud del tramo descendente de la garganta	L_2	0.266	(m)
Altura del conducto de cebado	h_C	0.080	(m)
Cota de la cumbre del sifón	Z_C	470.851	(m.s.n.m)
DIMENSIONES DEL SIFÓN			
Altura de elevación del agua NAN-cumbre	Z	1.651	(m)
Carga hidráulica	H	7.020	(m)
Longitud de la tubería ascendente	L_A	6.610	(m)
Longitud de la tubería horizontal	L_H	4.543	(m)
Longitud de la tubería descendente	L_D	34.691	(m)
Longitud total de tubería del sifón	L_T	45.844	(m)
DESCARGA DEL SIFÓN			
Tipo de válvula	Inicial	Media vuelta o cierre rápido	
	Final	De cortina o de compuerta	

Tabla 6.3. Dimensiones del sifón correspondiente a la cota 470.694 (m.s.n.m), sobre la corona del dique de la presa menor

Para el estudio de la influencia de la variación de la altura de elevación del agua NAN-cumbre (Z) se procedió a elevar el tramo horizontal del sifón con respecto a la cota de corona (ver foto 2), siendo las condiciones de los ensayos realizados las que se presentan en las tablas 6.4, 6.5 y 6.6.



Foto 1. Sifón montado sobre la corona de la presa menor en concepción.



Foto 2. Variación de la elevación del sifón con respecto al NAN.

Descripción	Notación	Valor	Unidad
Diámetro del sifón	D	3.000	(pulg)
Material de la tubería		PVC	
Cota de la corona del dique	Z_{CD}	470.924	(m.s.n.m)
Cota del eje de la tubería de entrada al sifón	Z_E	468.770	(m.s.n.m)
Cota del eje de la tubería de salida del sifón	Z_S	462.184	(m.s.n.m)
Talud mojado del dique	m_M	3.000	(adim)
Talud seco del dique	m_S	3.806	(adim)
GARGANTA DEL SIFÓN			
Angulo de inclinación de la rama ascendente	β	71.565	(°)
Longitud de la base de la garganta	L_G	0.457	(m)
Longitud del tramo ascendente de la garganta	L_1	0.241	(m)
Longitud del tramo descendente de la garganta	L_2	0.266	(m)
Altura del conducto de cebado	h_C	0.080	(m)
Cota de la cumbre del sifón	Z_C	471.081	(m.s.n.m)
DIMENSIONES DEL SIFÓN			
Altura de elevación del agua NAN-cumbre	Z	1.881	(m)
Carga hidráulica	H	7.020	(m)
Longitud de la tubería ascendente	L_A	7.053	(m)
Longitud de la tubería horizontal	L_H	4.543	(m)
Longitud de la tubería descendente	L_D	34.691	(m)
Longitud total de tubería del sifón	L_T	45.852	(m)
DESCARGA DEL SIFÓN			
Tipo de válvula	-	De cortina o de compuerta	

Tabla 6.4. Dimensiones del sifón correspondiente a la cota 470.924 (m.s.n.m), ubicada 0.23 (m) sobre la corona del dique de la presa menor

Descripción	Notación	Valor	Unidad
Diámetro del sifón	D	3.000	(pulg)
Material de la tubería	PVC		
Cota de la corona del dique	Z_{CD}	471.104	(m.s.n.m)
Cota del eje de la tubería de entrada al sifón	Z_E	468.690	(m.s.n.m)
Cota del eje de la tubería de salida del sifón	Z_S	462.184	(m.s.n.m)
Talud mojado del dique	m_M	3.000	(adim)
Talud seco del dique	m_S	3.724	(adim)
GARGANTA DEL SIFÓN			
Angulo de inclinación de la rama ascendente	β	71.565	(°)
Longitud de la base de la garganta	L_G	0.457	(m)
Longitud del tramo ascendente de la garganta	L_1	0.241	(m)
Longitud del tramo descendente de la garganta	L_2	0.266	(m)
Altura del conducto de cebado	h_C	0.080	(m)
Cota de la cumbre del sifón	Z_C	471.261	(m.s.n.m)
DIMENSIONES DEL SIFÓN			
Altura de elevación del agua NAN-cumbre	Z	2.061	(m)
Carga hidráulica	H	7.020	(m)
Longitud de la tubería ascendente	L_A	7.875	(m)
Longitud de la tubería horizontal	L_H	4.543	(m)
Longitud de la tubería descendente	L_D	34.691	(m)
Longitud total de tubería del sifón	L_T	47.675	(m)
DESCARGA DEL SIFÓN			
Tipo de válvula	-	De cortina o de compuerta	

Tabla 6.5. Dimensiones del sifón correspondiente a la cota 471.104 (m.s.n.m), ubicada 0.41 (m) sobre la corona del dique de la presa menor

Descripción	Notación	Valor	Unidad
Diámetro del sifón	D	3.000	(pulg)
Material de la tubería	PVC		
Cota de la corona del dique	Z_{CD}	471.304	(m.s.n.m)
Cota del eje de la tubería de entrada al sifón	Z_E	468.270	(m.s.n.m)
Cota del eje de la tubería de salida del sifón	Z_S	462.184	(m.s.n.m)
Talud mojado del dique	m_M	3.000	(adim)
Talud seco del dique	m_S	3.637	(adim)
GARGANTA DEL SIFÓN			
Angulo de inclinación de la rama ascendente	β	71.565	(°)
Longitud de la base de la garganta	L_G	0.457	(m)
Longitud del tramo ascendente de la garganta	L_1	0.241	(m)
Longitud del tramo descendente de la garganta	L_2	0.266	(m)
Altura del conducto de cebado	h_C	0.080	(m)
Cota de la cumbre del sifón	Z_C	471.461	(m.s.n.m)
DIMENSIONES DEL SIFÓN			
Altura de elevación del agua NAN-cumbre	Z	2.261	(m)
Carga hidráulica	H	7.020	(m)
Longitud de la tubería ascendente	L_A	9.835	(m)
Longitud de la tubería horizontal	L_H	4.543	(m)
Longitud de la tubería descendente	L_D	34.691	(m)
Longitud total de tubería del sifón	L_T	49.636	(m)
DESCARGA DEL SIFÓN			
Tipo de válvula	-	De cortina o de compuerta	

Tabla 6.6. Dimensiones del sifón correspondiente a la cota 471.304 (m.s.n.m), ubicada 0.61 (m) sobre la corona del dique de la presa menor

6.1.6. Resultados experimentales obtenidos con el prototipo estudiado

Los resultados obtenidos durante el desarrollo de la experimentación fueron:

- Se verifica que el fenómeno autocebante ocurre objetivamente para todas las condiciones estudiadas.
- La garganta diseñada para la retención del flujo de la rama horizontal cumple a cabalidad la función para la que ha sido concebida.
- La válvula ubicada al final del sifón para la retención del flujo de la rama descendente y de descarga cumple a cabalidad la función para la que había sido instalada.
- Durante la observación de la descarga, desde el momento de la apertura de la válvula de media vuelta, hasta la expulsión de los gases en forma de una columna de burbujas de similar diámetro al de la tubería del sifón, transcurrieron 27 (s). Luego de expulsados todos los gases se observó el establecimiento del flujo en el sifón.
- Una vez establecido el flujo en sifón se observó durante aproximadamente una hora el trabajo continuo del mismo, pudiéndose constatar que el sifón funcionó sin alteración.
- El uso de la válvula de media vuelta permitió corroborar su efectividad en el establecimiento del flujo en el sifón.

- g) Luego de establecido el flujo se procedió al cerrado y apertura de la válvula, pudiéndose constatar que una vez cebado el sifón, el flujo se establece de manera inmediata a la apertura de la válvula.
- h) El empleo de una válvula de cortina en la rama descendente, resultó ser tan efectivo como el uso de la válvula de media vuelta en el establecimiento del flujo en el sifón. El tiempo de cebado en este tipo de válvula fue de 1'15". La válvula quedó completamente abierta a los 2'. Esto permite concluir que el establecimiento del flujo es independiente de la abertura de la válvula.
- i) El empleo de la válvula de cortina en la rama descendente, es más efectivo que el de la válvula de media vuelta en cuanto al cerrado de este accesorio, puesto que un cierre rápido (característica propia de la válvula de media vuelta), provoca en el sifón el fenómeno conocido como "golpe de ariete", situación que es menos probable en una válvula de cortina.

6.2. Estudio del prototipo de sifón de 2" en el Laboratorio de Hidráulica

6.2.1. Diseño de la instalación de laboratorio

Una vez verificado el espacio disponible en el laboratorio, se procedió al cálculo de las dimensiones del sifón para su construcción, adoptándose como criterio fundamental, la selección del diámetro mínimo a emplear (2"), para garantizar la facilidad en la manipulación del dispositivo.

Las dimensiones del sifón calculado, según la metodología correspondiente al sifón con rama ascendente vertical, que se presenta en el capítulo V del trabajo se pueden observar en la tabla 6.7.

Descripción	Notación	Valor	Unidad
Diámetro del sifón	D	2.00	(pulg)
Material de la tubería		PVC	
GARGANTA DEL SIFÓN			
Angulo de inclinación de la rama ascendente	β	90	(°)
Longitud de la base de la garganta	L_G	0.130	(m)
Longitud del tramo ascendente de la garganta	L_1	0.105	(m)
Longitud del tramo descendente de la garganta	L_2	0.076	(m)
Altura del conducto de cebado	h_C	0.054	(m)
Cota de la cumbre del sifón	Z_C	4.605	(m.s.n.m)
Altura de elevación del agua NAN-cumbre	Z	1.035	(m)
Carga hidráulica	H	2.970	(m)
Longitud de la tubería ascendente	L_A	2.435	(m)
Longitud de la tubería horizontal	L_H	2.870	(m)
Longitud de la tubería descendente	L_D	3.951	(m)
Longitud total de tubería del sifón	L_T	9.332	(m)

Fuente: Elaboración propia, en base a cálculo

Tabla 6.7. Dimensiones del sifón de diámetro (2") diseñado

Es importante destacar que la instalación ha sido diseñada de manera tal que el valor de la carga hidráulica (H) se puede mantener fijo para las distintas variaciones de (Z), gracias a la colocación de una unión universal ubicada en la rama descendente, aguas arriba de la válvula de control.

Por otra parte la instalación concebida permite modificar (H), moviendo la superficie libre del líquido dentro del tanque de almacenamiento que sirve como suministro al sistema.

6.2.2. Esquema de la instalación

En la figura 6.2 se puede observar el esquema de la instalación que se empleó para la realización de los ensayos, debiéndose resaltar en ella los soportes, el tanque de almacenamiento y el tanque de aforo volumétrico donde posteriormente se realizaría el aforo del caudal evacuado por el sifón para las diferentes condiciones de trabajo.

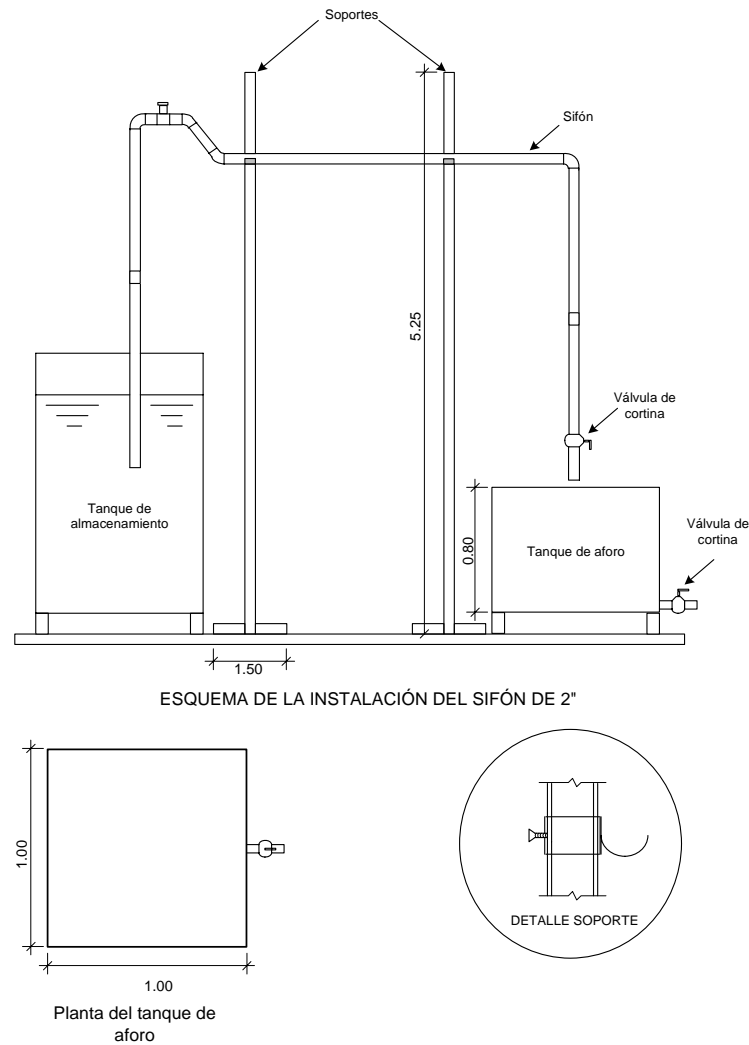


Figura 6.2. Esquema de la instalación utilizada para los ensayos

Por su parte en la figura 6.3 se puede observar el dimensionamiento del sifón estudiado.

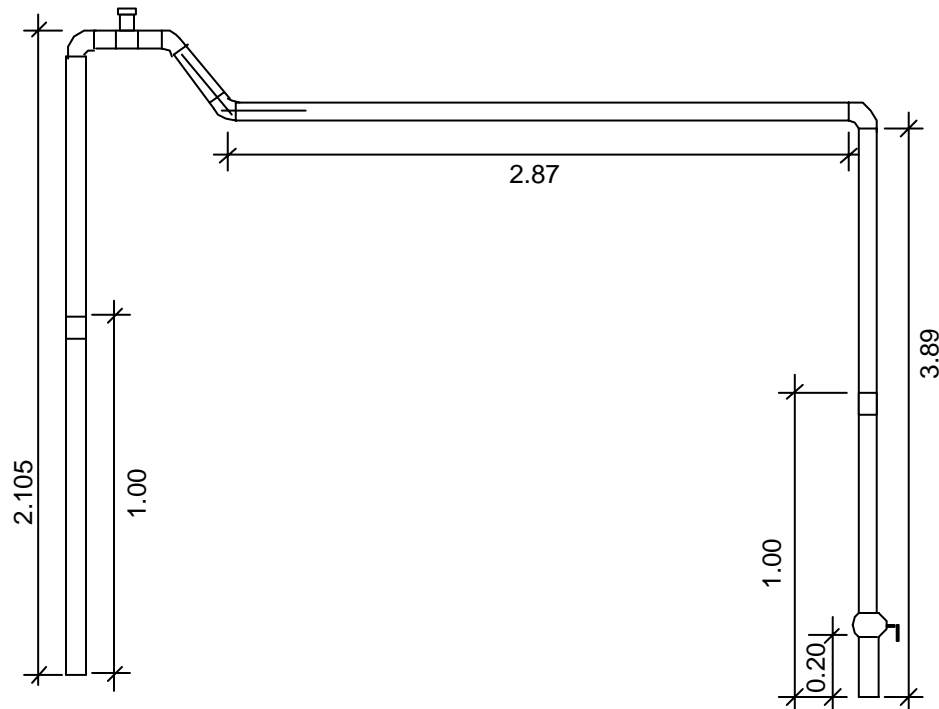


Figura 6.3. Dimensionamiento del sifón

En las fotos 3 y 4 se puede observar el montaje en el laboratorio de la instalación empleada en las investigaciones.



Foto 3. Detalle completo del sifón de 2" estudiado en el laboratorio.



Foto 4. Detalle de la succión del sifón de 2" estudiado en el laboratorio.

6.2.3. Alcance de la investigación

En esta etapa de la investigación se pretende evaluar:

- a) La factibilidad del uso del sifón en condiciones reales.
- b) La relación de los resultados obtenidos con el modelo matemático desarrollado y los registrados durante la experimentación.
- c) La calibración del modelo matemático a partir de los resultados obtenidos en el punto anterior.
- d) Las condiciones límites de funcionamiento del sifón.

6.2.4 Metodología a seguir para la experimentación

La metodología a seguir para la ejecución de la experimentación deberá ser:

- a) Montaje del sifón para la condición concebida durante su diseño a través del modelo matemático.
- b) Registro de los resultados obtenidos para las condiciones antes mencionadas.
- c) Evaluación del comportamiento del sifón como consecuencia de la variación de las alturas (Z) y (H), manteniendo fija las cotas de la cumbre y la de la descarga.
- d) Simulación con el modelo matemático las condiciones ensayadas en el laboratorio y establecimiento de la correlación entre los resultados obtenidos.

6.2.5. Resultados experimentales obtenidos en el prototipo de laboratorio

En las tablas 6.8 y 6.9 se presentan los resultados obtenidos durante los ensayos de laboratorio, para el prototipo del sifón de 2" estudiado. Como se puede apreciar los ensayos se realizaron de forma tal que tanto los valores de las alturas (H) y (Z), variaban simultáneamente, manteniéndose constante en todos los casos las cotas de la cumbre del sifón y la de la descarga fija.

La diferencia específica entre las condiciones de estudio de los resultados de las tablas 6.8 y 6.9, radica en la altura máxima de la instalación (H+Z), lo cual permitiría en el caso en que mayor era esta altura obtener mayor variabilidad en la relación (H/Z).

Como resultados importantes a resaltar durante los estudios, es la presencia de determinadas condiciones (de relación Z/H), donde el sifón funciona finalmente, pero con cierta dificultad para alcanzar el cebado. Nótese de las tablas como esta condición es transitoria entre lo que se le ha denominado cebado óptimo del sifón y cuando no ocurre el cebado del sifón.

RESULTADOS EXPERIMENTALES						
FECHA 14/10/05						
Nº	COTA NAN	H	Z	Z/H	OBSERVACIONES	
1	3.570	2.970	1.035	0.348	funciona	Cebado óptimo
2	3.470	2.870	1.135	0.395	funciona	Cebado óptimo
3	3.370	2.770	1.235	0.446	funciona	Cebado c/ dificultad
4	3.250	2.650	1.355	0.511	funciona	Cebado c/ dificultad
7	2.930	2.330	1.675	0.719	no funciona	No ocurre el cebado

Tabla 6.8. Resultados obtenidos durante los ensayos de laboratorio para una altura máxima ($H+Z=4.005$)

RESULTADOS EXPERIMENTALES						
FECHA 21/10/05						
Nº	COTA NAN	H	Z	Z/H	OBSERVACIONES	
1	4.210	3.810	0.875	0.230	funciona	Cebado óptimo
2	3.910	3.510	1.175	0.335	funciona	Cebado óptimo
3	3.640	3.240	1.445	0.446	funciona	Cebado c/ dificultad
6	3.100	2.700	1.985	0.735	no funciona	No ocurre el cebado

Tabla 6.9. Resultados obtenidos durante los ensayos de laboratorio para una altura máxima ($H+Z=4.685$)

6.2.6. Correlación cálculos – observaciones

En las tablas 6.10 y 6.11 se presenta la correlación entre los resultados obtenidos durante los ensayos de laboratorio y los cálculos realizados por medio de la metodología desarrollada para el diseño de este dispositivo.

Como se puede observar de las tablas, existe una total coincidencia entre los resultados obtenidos por medio de la metodología desarrollada y los alcanzados durante los estudios experimentales llevados a cabo en el laboratorio, lo que evidencia la eficiencia de la metodología desarrollada en el diseño de este dispositivo.

RESULTADOS EXPERIMENTALES							RESULTADOS DEL DISEÑO TEÓRICO			
FECHA 14/10/05										
Nº	COTA NAN	H	Z	Z/H	OBSERVACIONES		P _d /γ	P _d /g	Pe/γ >Pd/γ	Pe/γ >2
1	3.570	2.970	1.035	0.348	funciona	óptimo	8.258	8.027	funciona	no cavita
2	3.470	2.870	1.135	0.395	funciona	óptimo	8.194	8.032	funciona	no cavita
3	3.370	2.770	1.235	0.446	funciona	Cebado c/ dificultad	8.129	8.036	funciona	no cavita
4	3.250	2.650	1.355	0.511	funciona	Cebado c/ dificultad	8.052	8.042	funciona	no cavita
5(*)	3.235	2.635	1.370	0.520	-	-	8.043	8.043	funciona	no cavita
6(*)	3.234	2.634	1.371	0.521	-	-	8.042	8.043	no funciona	no cavita
7	2.930	2.330	1.675	0.719	no funciona	No ocurre el cebado	7.847	8.059	no funciona	no cavita
(*) Simulación teórica NO comprobada experimentalmente										

Tabla 6.10. Resultados de la correlación cálculos – observación para los ensayos de laboratorio de una altura máxima ($H+Z=4.685$)

RESULTADOS EXPERIMENTALES							RESULTADOS DEL DISEÑO TEÓRICO			
FECHA 21/10/05										
Nº	COTA NAN	H	Z	Z/H	OBSERVACIONES		P _d /γ	P _d /g	Pe/γ >Pd/γ	Pe/γ >2
1	4.210	3.810	0.875	0.230	funciona	óptimo	8.106	7.531	funciona	no cavita
2	3.910	3.510	1.175	0.335	funciona	óptimo	7.914	7.542	funciona	no cavita
3	3.640	3.240	1.445	0.446	funciona	Cebado c/ dificultad	7.742	7.554	funciona	no cavita
4(*)	3.365	2.965	1.720	0.580	-	-	7.567	7.566	funciona	no cavita
5(*)	3.360	2.960	1.725	0.583	-	-	7.563	7.567	no funciona	no cavita
6	3.100	2.700	1.985	0.735	no funciona	No ocurre el cebado	7.397	7.580	no funciona	no cavita
(*) Simulación teórica NO comprobada experimentalmente										

Tabla 6.11. Resultados de la correlación cálculos – observación para los ensayos de laboratorio de una altura máxima ($H+Z=4.685$)

6.3. Estudio del prototipo de sifón de 3" en el Laboratorio de Hidráulica

6.3.1. Diseño de la instalación de laboratorio

Dando continuidad a la investigación de prototipos, se instaló en el laboratorio un sifón de 3" de diámetro. Las dimensiones del sifón calculado, según la metodología correspondiente al sifón con rama ascendente vertical, que se presenta en el capítulo V del trabajo se pueden observar en la tabla 6.12.

Descripción	Notación	Valor	Unidad
Diámetro del sifón	D	3.00	(pulg)
Material de la tubería		PVC	
GARGANTA DEL SIFÓN			
Angulo de inclinación de la rama ascendente	β	90	(°)
Longitud de la base de la garganta	L_G	0,195	(m)
Longitud del tramo ascendente de la garganta	L_1	0,157	(m)
Longitud del tramo descendente de la garganta	L_2	0,114	(m)
Altura del conducto de cebado	h_C	0,081	(m)
Cota de la cumbre del sifón	Z_C	4,657	(m.s.n.m)
Altura de elevación del agua NAN-cumbre	Z	1,087	(m)
Carga hidráulica	H	2,970	(m)
Longitud de la tubería ascendente	L_A	2,487	(m)
Longitud de la tubería horizontal	L_H	2,805	(m)
Longitud de la tubería descendente	L_D	3,976	(m)
Longitud total de tubería del sifón	L_T	9,382	(m)

Fuente: Elaboración propia, en base a cálculo

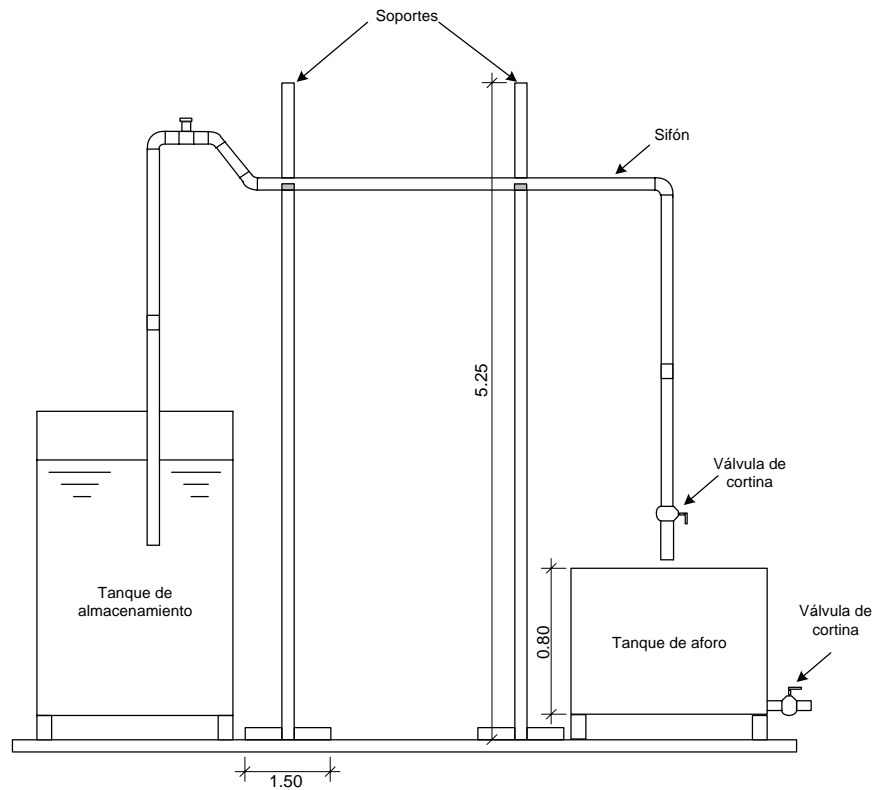
Tabla 6.12. Dimensiones del sifón de diámetro (3") diseñado

Es importante destacar que la instalación ha sido diseñada de manera tal que el valor de la carga hidráulica (H) se puede mantener fijo para las distintas variaciones de (Z), gracias a la colocación de una unión universal ubicada en la rama descendente, aguas arriba de la válvula de control.

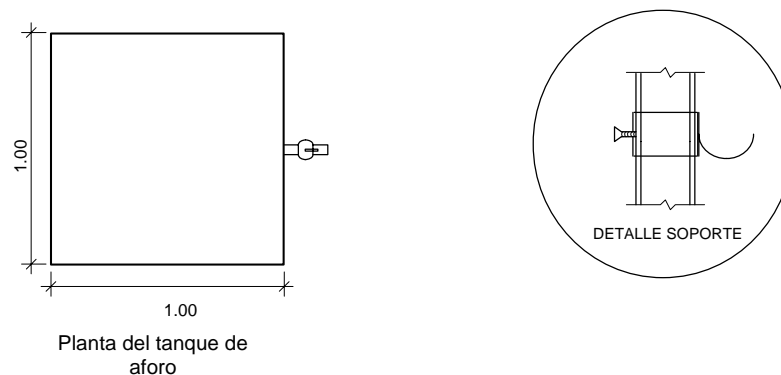
Por otra parte la instalación concebida permite modificar (H), moviendo la superficie libre del líquido dentro del tanque de almacenamiento que sirve como suministro al sistema.

6.3.2. Esquema de la instalación

En la figura 6.4 se puede observar el esquema de la instalación que se empleó para la realización de los ensayos, debiéndose resaltar en ella los soportes, el tanque de almacenamiento y el tanque de aforo volumétrico donde posteriormente se realizaría el aforo del caudal evacuado por el sifón para las diferentes condiciones de trabajo.



ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN DEL SIFÓN DE 3"



NOTA: Todas las dimensiones están dadas en metros

Figura 6.4. Esquema de la instalación utilizada para los ensayos

Por su parte en la figura 6.5 se puede observar el dimensionamiento del sifón estudiado.

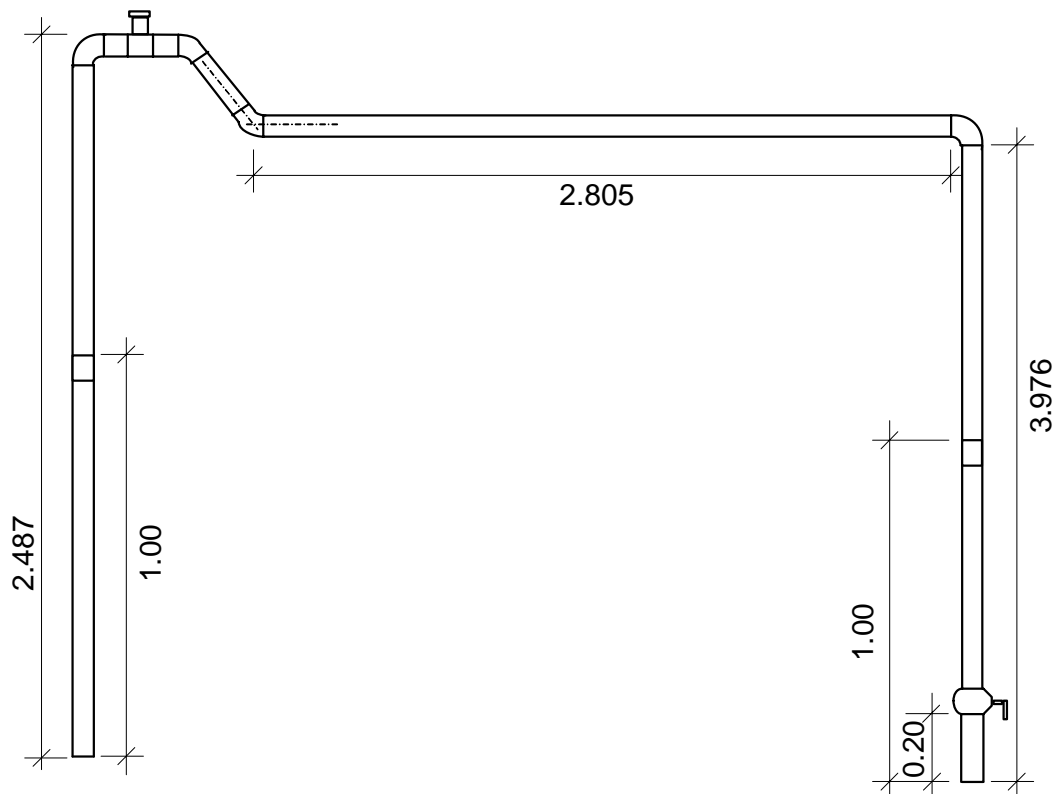


Figura 6.5. Dimensionamiento del sifón

En las fotos 5 y 6 se puede observar el montaje en el laboratorio de la instalación empleada en las investigaciones.



Foto 5. Detalle completo del sifón de 3" estudiado en el laboratorio

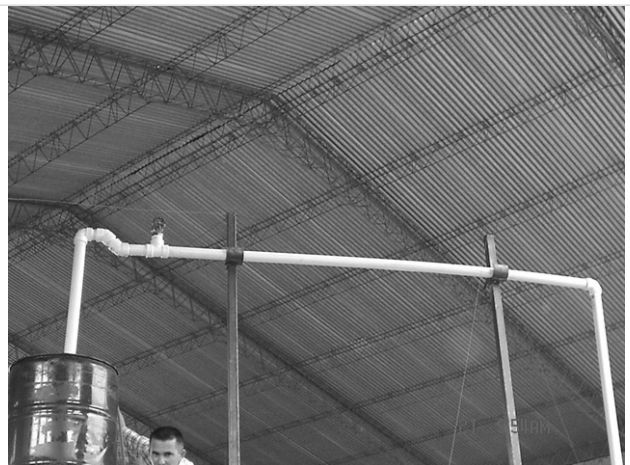


Foto 6. Detalle de la succión del sifón de 3" estudiado en el laboratorio

6.3.3. Alcance de la investigación

En esta etapa de la investigación se pretende evaluar:

- a) Comparar la influencia del diámetro en la variación de los parámetros que fueran estudiados con el sifón de 2".
- b) La relación de los resultados obtenidos con el modelo matemático desarrollado y los registrados durante la experimentación.
- c) La calibración del modelo matemático a partir de los resultados obtenidos en el punto anterior.
- d) Las condiciones límites de funcionamiento del sifón.

6.3.4 Metodología a seguir para la experimentación

La metodología a seguir para la ejecución de la experimentación deberá ser:

- a) Montaje del sifón para la condición concebida durante su diseño a través del modelo matemático.
- b) Registro de los resultados obtenidos para las condiciones antes mencionadas.
- c) Evaluación del comportamiento del sifón como consecuencia de la variación de las alturas (Z) y (H), manteniendo fija las cotas de la cumbre y la de la descarga.
- d) Simulación con el modelo matemático las condiciones ensayadas en el laboratorio y establecimiento de la correlación entre los resultados obtenidos.

6.3.5. Resultados experimentales obtenidos en el prototipo de laboratorio

En las tablas 6.13 y 6.14 se presentan los resultados obtenidos durante los ensayos de laboratorio, para el prototipo del sifón de 3" estudiado. Como se puede apreciar los ensayos se realizaron de forma tal que tanto los valores de las alturas (H) y (Z), variaban simultáneamente, manteniéndose constante en todos los casos las cotas de la cumbre del sifón y la de la descarga fija.

La diferencia específica entre las condiciones de estudio de los resultados de las tablas 6.13 y 6.14, radica en la altura máxima de la instalación (H+Z), lo cual permitiría en el caso en que mayor era esta altura obtener mayor variabilidad en la relación (H/Z).

Como resultado importante a resaltar durante los estudios, es el comportamiento similar al obtenido con el sifón de 2", relativo a la presencia de determinadas condiciones (de relación Z/H), donde el sifón funciona finalmente, pero con cierta dificultad para alcanzar el cebado. Nótese de las tablas como esta condición es transitoria entre lo que se le ha denominado cebado óptimo del sifón y cuando no ocurre el cebado del sifón.

RESULTADOS EXPERIMENTALES							
FECHA 21/06/06							
Nº	COTA NAN	H	Z	Z/H	OBSERVACIONES		
1	3,610	3,010	1,047	0,348	funciona	Cebado óptimo	
2	3,509	2,909	1,148	0,395	funciona	Cebado óptimo	
3	3,406	2,806	1,251	0,446	funciona	Cebado óptimo	
4	3,285	2,685	1,372	0,511	funciona	Cebado óptimo	
5	3,269	2,669	1,388	0,520	funciona	Cebado óptimo	
6	3,268	2,668	1,389	0,521	funciona	Cebado óptimo	
7	2,960	2,360	1,697	0,719	funciona	Cebado c/ dificultad	
8	2,900	2,300	1,757	0,764	no funciona	No ocurre el cebado	

Tabla 6.13. Resultados obtenidos durante los ensayos de laboratorio para una altura máxima ($H+Z = 4.057$)

RESULTADOS EXPERIMENTALES							
FECHA 28/06/06							
Nº	COTA NAN	H	Z	Z/H	OBSERVACIONES		
1	4,250	3,850	0,887	0,230	funciona	Cebado óptimo	
2	3,948	3,548	1,189	0,335	funciona	Cebado óptimo	
3	3,675	3,275	1,462	0,446	funciona	Cebado óptimo	
4	3,360	2,960	1,777	0,600	funciona	Cebado óptimo	
5	2,900	2,500	2,237	0,895	no funciona	No ocurre el cebado	

Tabla 6.14. Resultados obtenidos durante los ensayos de laboratorio para una altura máxima ($H+Z = 4.737$)

6.3.6. Correlación cálculos – observaciones

En las tablas 6.15 y 6.16 se presenta la correlación entre los resultados obtenidos durante los ensayos de laboratorio y los cálculos realizados por medio de la metodología desarrollada para el diseño de este dispositivo.

Como se puede observar de las tablas, existe una total coincidencia entre los resultados obtenidos por medio de la metodología desarrollada y los alcanzados durante los estudios experimentales llevados a cabo en el laboratorio, lo que evidencia la eficiencia de la metodología desarrollada en el diseño de este dispositivo, independientemente del diámetro que sea analizado.

RESULTADOS EXPERIMENTALES							RESULTADOS DEL DISEÑO TEÓRICO			
FECHA 14/10/05										
Nº	COTA NAN	H	Z	Z/H	OBSERVACIONES		P _d /γ	P _d /g	Pe/γ >Pd/γ	Pe/γ >2
1	3,610	3,010	1,047	0,348	funciona	óptimo	8,363	7,874	Funciona	no cavita
2	3,509	2,909	1,148	0,395	funciona	óptimo	8,294	7,879	Funciona	no cavita
3	3,406	2,806	1,251	0,446	funciona	óptimo	8,223	7,883	Funciona	no cavita
4	3,285	2,685	1,372	0,511	funciona	óptimo	8,140	7,888	Funciona	no cavita
5	3,269	2,669	1,388	0,520	funciona	óptimo	8,130	7,889	funciona	no cavita
6	3,268	2,668	1,389	0,521	funciona	óptimo	8,129	7,889	funciona	no cavita
7	2,960	2,360	1,697	0,719	funciona	Cebado c/ dificultad	7,915	7,889	funciona	no cavita
8(*)	2,941	2,341	1,716	0,733	funciona	Cebado c/ dificultad	7,905	7,904	funciona	no cavita
9(*)	2,940	2,340	1,717	0,734	no funciona	No ocurre el cebado	7,904	7,904	no funciona	no cavita
10	2,900	2,300	1,757	0,764	no funciona	No ocurre el cebado	7,876	7,907	no funciona	no cavita
(*) Simulación teórica NO comprobada experimentalmente										

Tabla 6.15. Resultados de la correlación cálculos – observación para los ensayos de laboratorio de una altura máxima ($H+Z=4.057$)

RESULTADOS EXPERIMENTALES							RESULTADOS DEL DISEÑO TEÓRICO			
FECHA 21/10/05										
Nº	COTA NAN	H	Z	Z/H	OBSERVACIONES		P _d /γ	P _d /g	Pe/γ >Pd/γ	Pe/γ >2
1	4,250	3,850	0,887	0,230	funciona	óptimo	8,246	7,303	funciona	no cavita
2	3,948	3,548	1,189	0,335	funciona	óptimo	8,040	7,313	funciona	no cavita
3	3,675	3,275	1,462	0,446	funciona	óptimo	7,850	7,323	funciona	no cavita
4	3,360	2,960	1,777	0,600	funciona	óptimo	7,640	7,336	funciona	no cavita
5(*)	2,943	2,543	2,194	0,863	funciona	Cebado c/ dificultad	7,356	7,355	funciona	no cavita
6(*)	2,942	2,542	2,195	0,863	no funciona	No ocurre el cebado	7,355	7,356	no funciona	no cavita
7	2,900	2,500	2,237	0,895	no funciona	No ocurre el cebado	7,326	7,358	no funciona	no cavita
(*) Simulación teórica NO comprobada experimentalmente										

Tabla 6.16. Resultados de la correlación cálculos – observación para los ensayos de laboratorio de una altura máxima ($H+Z=4.737$)

6.4. Conclusiones del capítulo

Las conclusiones generales a las que se puede arribar en este capítulo son:

1. Se verifica que el fenómeno de autocebado del sifón ocurre objetivamente para todas las condiciones estudiadas.
2. La garganta diseñada para la retención del flujo de la rama horizontal cumple a cabalidad la función para la que ha sido concebida.

3. La válvula ubicada al final del sifón para la retención del flujo de la rama descendente y de descarga cumple a cabalidad la función para la que había sido instalada.
4. En todos los ensayos realizados, se pudo constatar que hasta que no se produzca la total expulsión de los gases en forma de una columna de burbujas de similar diámetro al de la tubería del sifón, no ocurre el establecimiento del flujo en el mismo.
5. El uso de la válvula de cortina y la válvula de media vuelta que se ensayaron como alternativas, permitió corroborar su efectividad en el establecimiento del flujo en el sifón.
6. Los estudios realizados, permiten concluir que el empleo de la válvula de cortina en la rama descendente, es más efectivo que el de la válvula de media vuelta en cuanto al cerrado de este accesorio, puesto que un cierre rápido (característica propia de la válvula de media vuelta), provoca en el sifón el fenómeno conocido como “golpe de ariete”, situación que es menos probable en una válvula de cortina.
7. Todos los ensayos realizados, tanto para el sifón de 2”, como el de 3”, permitieron corroborar la presencia de determinadas condiciones (de relación Z/H), donde el sifón funciona finalmente, pero con cierta dificultad para alcanzar el cebado. Siendo esta condición transitoria entre lo que se le ha denominado cebado óptimo del sifón y cuando no ocurre el cebado del sifón.
8. Los estudios realizados, permiten concluir diciendo, que existe una total coincidencia entre los resultados obtenidos por medio de la metodología desarrollada y los alcanzados durante los estudios experimentales llevados a cabo en el laboratorio, lo que evidencia la eficiencia de la metodología desarrollada en el diseño de este dispositivo, independientemente del diámetro que sea analizado.

CAPITULO VII: RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

7.1. Recomendaciones para la colocación del sifón

Entre las recomendaciones que se deben tener en cuenta para la colocación del sifón se tienen que:

1. En caso de colocar un sifón en el cuerpo de una presa este no sea ubicado por encima de la cota de corona de la misma, para de esa manera evitar entorpecer la circulación en dicha zona.
2. En caso de colocar un sifón por debajo de la cota de la corona de la presa, se recomienda se realice siempre por encima de la cota del nivel de aguas máxima (NAM) del embalse para evitar las posibles filtraciones del flujo entre el material de la presa y el contorno de la tubería.
3. La cota de la entrada al sifón, siempre se coloque a una cierta altura con respecto a la cota del fondo del embalse, para evitar así el ingreso a dicha tubería del material sólido que pudiera ser arrastrado por la corriente.
4. La descarga del sifón se ubique lo más alejada posible del pie de talud seco de la presa, para evitar la erosión del mismo.

7.2. Recomendaciones para el anclaje del sifón

Entre las recomendaciones a tener en cuenta para el anclaje del sifón se tienen que:

1. El anclaje del sifón sea lo más sencillo y económico desde el punto de vista estructural. Una buena opción consiste en un bloque de hormigón empleado como apoyo de la tubería, la cual se sujetaría con una abrazadera de platina asegurada con pernos anclados en el hormigón.
2. La separación entre la tubería y el fondo del embalse, se garantice a través a través de una columna, debidamente cimentada, de acuerdo al tipo de suelo que se tenga en la zona de instalación.
3. La separación longitudinal entre el eje de los apoyos sea de 9,00 a 12,00 (m), según convenga.

CAPITULO VIII: ESTRUCTURAS DISIPADORAS DE ENERGÍA A COLOCAR EN LA DESCARGA DEL SIFÓN

8.1. Estanques amortiguadores

8.1.1. Fundamentos teóricos

Cuando el agua sale de una válvula de control o de un conducto, con descarga libre, puede utilizarse un estanque amortiguador de sección trapezoidal revestido de enrocamiento o de concreto. Este estanque debe utilizarse únicamente cuando el chorro descarga libremente en el aire y luego cae hacia abajo dentro del estanque. Las pruebas han demostrado que el ángulo con que el chorro cae en el estanque deberá ser tal que garantice que la línea superior del chorro debe como máximo coincidir con el límite de la solera horizontal del fondo del estanque y el inicio de la pendiente adversa del mismo, de lo contrario se producirán olas y remolinos en el estanque suficiente para erosionar los taludes laterales y provocará que el agua salga a gran velocidad.

Los criterios que se han establecido para el diseño de los estanques de inmersión son los siguientes:

- a. La disposición general de estos estanques es la que se dispone en la figura 8.1.
- b. El tirante en el estanque deberá ser igual a ($Y_p = 1/5 H$), siendo (H) la diferencia entre los niveles máximos en el vaso de la presa y la descarga.
- c. El ancho mínimo de la solera horizontal ubicada en el fondo, deberá ser igual al ancho del chorro de llegada es decir el diámetro del conducto de llegada al estanque de inmersión.
- d. La velocidad media en el extremo final del tanque deberá ser de 1,00 m/s aproximadamente.

8.1.2. Metodología para su diseño

Información que se requiere:

Y_{cs} – Tirante de circulación en el canal de salida del estanque (m)

H - Diferencia entre los niveles máximos en el vaso de la presa y la descarga (m)

D - Diámetro del conducto de llegada al estanque (m)

Pasos:

- 1º. Calcular la profundidad del estanque (Y_p)
- 2º. Calcular la longitud horizontal de la solera divergente (L_1)
- 3º. Calcular la longitud de la solera horizontal del fondo del estanque (L_2)
- 4º. Calcular la longitud horizontal de la solera convergente (L_3)
- 5º. Calcular el ancho de la solera horizontal ubicada en el fondo del estanque (A_1)

- 6°. Calcular el ancho superficial entre la solera horizontal ubicada en el fondo y los muros laterales del estanque (A_2)
- 7°. Calcular la altura total del estanque, medida desde la solera horizontal de fondo (H_t)
- 8°. Cálculo de la longitud total del estanque (L_t)
- 9°. Calcular la distancia horizontal que recorre el chorro de agua medida desde la sección final de la tubería hasta el eje del chorro en la solera del fondo del estanque (X_c)
- 10°. Dimensionar el estanque de inmersión según las recomendaciones de la figura 8.1

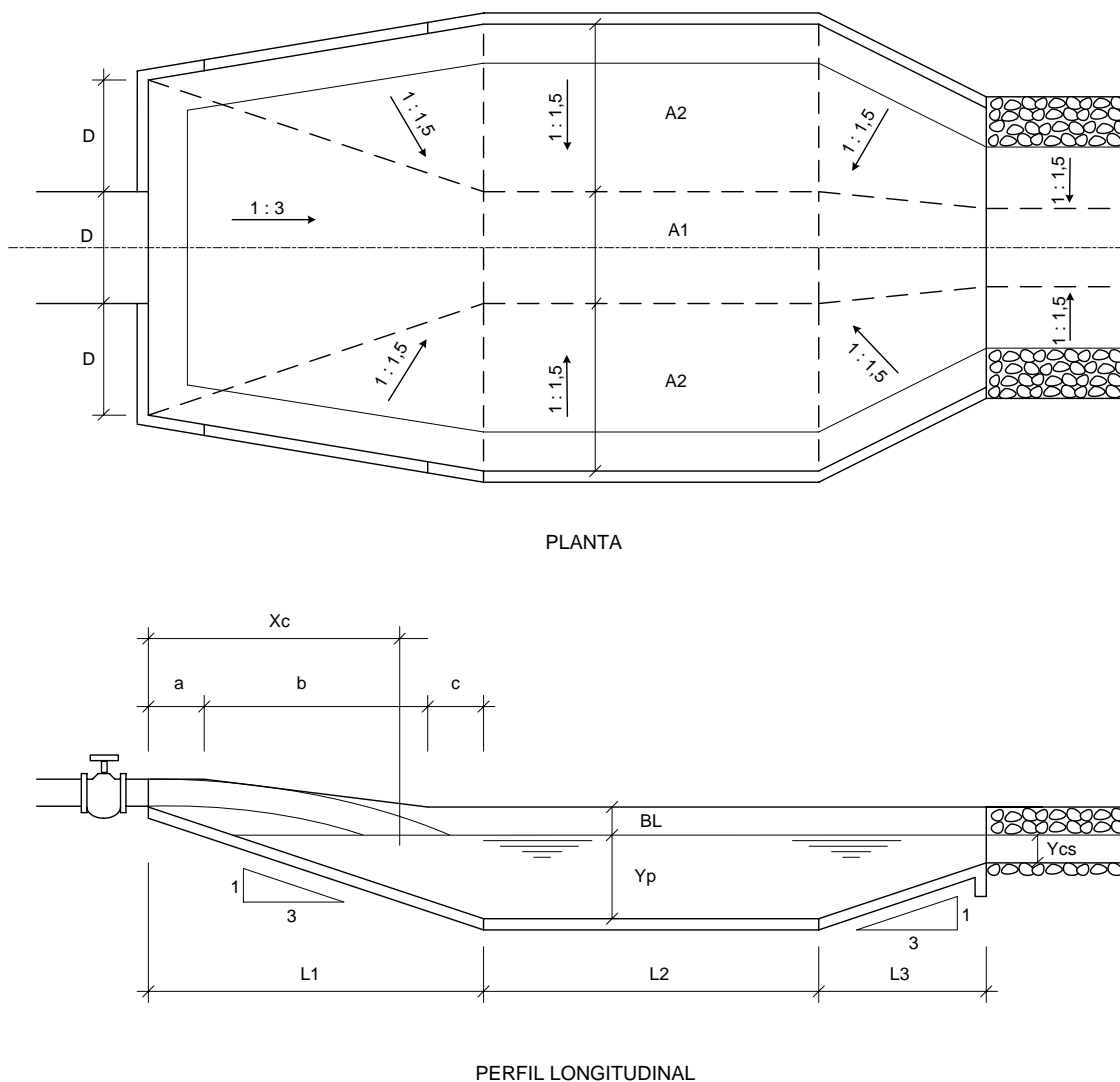


Figura 8.1. Esquema de un estanque amortiguador o de inmersión

CAPITULO IX: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones generales

1. En el trabajo se presenta un amplio estudio acerca del Sifón Autocebante de Garganta, que permiten el conocimiento de los mismos en diferentes condiciones de trabajo.
2. La revisión de la bibliografía especializada sobre el tema, cuyo resumen se muestra en capítulo III del presente trabajo, permitió corroborar la evidente ventaja que reportaría la posibilidad de diseñar, construir y operar sifones que:
 - a. no requieran de un equipamiento auxiliar de los tradicionalmente conocidos, tales como: bombas de vacío, eyectores u otro dispositivo de operación eléctrica o manual, para lograr el cebado y de esa manera eliminar los gases que se acumulan en la cumbre y así establecer el flujo.
 - b. no requieran de la descarga sumergida, para garantizar su funcionamiento.
3. La solución presentada en el trabajo, no está referida en la historia de los sifones, conocida en la hidráulica.
4. El sifón concebido, tiene la capacidad de autocebado y funcionamiento sin dispositivos auxiliares para el cebado y mantenimiento de flujo, a excepción de una válvula de control en la rama descendente.
5. Los resultados obtenidos tanto en la teoría, como en la práctica, contradicen las condiciones referidas en la literatura acerca de que:
 - a. La tubería del sifón requiere estar totalmente llena para iniciar el establecimiento del flujo.
 - b. La rama de salida requiere de la entrega sumergida para mantenerse en servicio.
6. Los resultados obtenidos durante el estudio de los prototipos, permiten verificar que el fenómeno de autocebado del sifón ocurre objetivamente para todas las condiciones ensayadas, corroborándose de esa manera los resultados teóricos previamente analizados.
7. La garganta diseñada para la retención del flujo de la rama horizontal cumple a cabalidad la función para la que fue concebida.
8. La válvula ubicada al final del sifón para la retención del flujo de la rama descendente y de descarga cumple a cabalidad la función para la que fue instalada.
9. En todos los ensayos realizados, se pudo constatar que el establecimiento del flujo tiene lugar, una vez que se produce la total expulsión de los gases en forma de una columna de burbujas de similar diámetro al de la tubería del sifón.

10. El uso de la válvula de cortina y la válvula de media vuelta que se ensayaron como alternativas, permitió corroborar su efectividad en el establecimiento del flujo en el sifón, aunque el empleo de la válvula de cortina en la rama descendente, es más efectivo que el de la válvula de media vuelta en cuanto al cerrado de este accesorio, puesto que un cierre rápido (característica propia de la válvula de media vuelta), provoca en el sifón el fenómeno conocido como “golpe de ariete”, situación que es menos probable en una válvula de cortina.
11. Todos los ensayos realizados, permitieron corroborar la presencia de determinadas condiciones (de relación Z/H), donde el sifón funciona finalmente, pero con cierta dificultad para alcanzar el cebado. Siendo esta condición transitoria entre lo que se le ha denominado cebado óptimo del sifón y cuando no ocurre el cebado del sifón.
12. Los estudios realizados, permiten concluir que existe una total coincidencia entre los resultados obtenidos por medio de la metodología desarrollada y los alcanzados durante los estudios experimentales llevados a cabo en el laboratorio, lo que evidencia la eficiencia de la metodología desarrollada en el diseño de este dispositivo, independientemente del diámetro que sea analizado.
13. El efecto autocebante alcanzado durante el presente trabajo, convierte definitivamente al sifón en un conducto hidráulico sencillo y sin las complejidades operativas que hasta la fecha le limitaban en su aplicación.
14. Los resultados que se presentan en este trabajo, ofrecen suficiente confiabilidad como para recomendar su utilización en el diseño hidráulico de los Sifones Autocebantes de Garganta.

9.2. Recomendaciones

1. Se recomienda al diseñar los sifones autocebantes de garganta, seguir la metodología que se presenta en capítulo V del presente trabajo, debiéndose poner especial hincapiés para ello, en las condiciones bajo las cuales puede ser utilizado este tipo de dispositivo hidráulico.
2. Se recomienda la elaboración de un paquete computacional que permita la facilidad del diseño de este dispositivo hidráulico.
3. Se recomienda la colocación de un dispositivo para la disipación de energía en la descarga del sifón, para garantizar de esa manera la estabilidad del terreno en dicha zona. Una variante a ser empleada es el uso del estanque amortiguador o de inmersión que se muestra en el capítulo VIII del presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Rouse Hunter; HISTORY OF HYDRAULICS / Dover Publications, New York, 1963.
2. His Cox, Gardener D.; HYDRAULIC ENGINEERING / The Norman W. Henley Publishing Co. New York.1908.
3. Nekrasov, B, HIDRÁULICA/eR, ICL. La Habana, 1976.
4. Trueba Coronel. Samuel; HIDRÁULICA/Ed. Norgie, México, 1961.
5. Rousell. George; HYDRAULICS / Ed. H. Holt & Co. USA, 1946.
6. Rouse H.; HIDRÁULICA, MECÁNICA ELEMENTAL DE FLUIDOS / ED. DOSSAT, Madrid
7. SALVAT, Enciclopedia., COMO FUNCIONA. Vol IX/Ed. Salvat. España, 1979,
8. Barnat J. ENCICLOPEDIA DE LA CIENCIA Y LA TÉCNICA Tomo IV/ ED. NAUTA S.A.. Barcelona. 1979.
9. Nelson A.; DICTIONARY OF WATER AND WATER ENGINEERING/Butterworths, London 1973.
10. Diccionario VOX/Bibliograf S.A.,. Barcelona ,1964.
11. Scott, John S. ; THE PENGUIN DICTIONARY OF CIVIL ENGÍNEERING/ Ed. Penguin Books, London, 1980.
12. PEQUEÑO LAROUSSE DE CIENCIA Y TÉCNICA / ED Larousse, Buenos Aires, 1967.
13. Addison, Herbert, ; TRATADO DE HIDRÁULICA APLICADA / ED. Gustavo Gili. S.A. Barcelona. 1954.
14. Gibson, A. H.; HYDRAULICS AND ITS APLICATIONS / Ed. D, Van Nostrand Co. New York, 1923, / Ed. Constable & Co. London, 1952.
15. Schafer, AugusL, ; HIDRÁULICA Y CONSTRUCCIONES HIDRÁULICAS/ ED. Labor, Barcelona, 1971.
16. Streeter, Víctor L.; MECÁNICA DE LOS FLUIDOS / ED, C y T, ICL La Habana, 1970.
17. Shames, Irving H.; LA HIDRÁULICA DE LOS FLUIDOS/ ED. Castillo, Madrid.
18. Rabinovich, Ez; HIDRÁULICA / ED, MIR Moscú, 1978.
19. Pérez, D., INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LOS SISTEMAS DE TUBERÍAS / ICL, La Habana, 1986.
20. Daugherty, I.; FLUIDS MECHANICS / Ed. California Institute of Technology USA, 1954.
21. Daugherty F., FLUID MECHANICAS WITHENGINEERING APLICATIONS / ED C y T, ICL La Habana, 1970
22. King, Wisler Woodburn.; HYDRAULICS / Jon-n Wiley & Sons. Inc. , USA, 1955
23. Calvin, V , TRATADO DE HIDRÁULICA APLICADA / ICL. , La Habana, 1976,
24. Mayol, José María , TUBERÍAS / ETA, Barcelona. 1982
25. Schoklitsch, A , : ARQUITECTURA HIDRÁULICA, T 1 / Ed. Gustavo Gili, Barcelona, 1981
26. Collignon. Edouard., COURS DE MECANIQUE APLIQUE AUX CONSTRUCTIONS/ Dunned Editeur. Paris 1880
27. Davey, Henry : PRINCIPLES. CONSTRUCTION AND APPLICATIONS OF PUMPING MACHINARY/ Ed. Charles Griffin & Co. Ltd. London 1905.
28. Pashkov. , HIDRÁULICA Y MAQUINAS HIDRÁULICAS/ Ed. M1R Moscú 1985.
29. Díaz, González y Guzmán : EQUIPOS Y ESTACIONES PARA RIEGO/ Ed, Pueblo y Educación, ICL La Habana 1981.
30. King. HW MANUAL DE HIDRAULICA/ Ed. ICL La Habana 1969.
31. USBR,. DÍSEÑO DE PRESAS PEQUEÑAS / MiCons. La Habana 1972.
32. Pretiyjhons, R.C.; ÁIR REGULATED SIPHON WITH NOVEL ARRÊNGEMENT FOK AIR ADMISSION Rev. The Institution of Civil Engineering Proceeding GBR March 1989.
33. Zurita, J. , OBRAS HIDRAULICAS / Ed. CEAC, Barcelona 1971.
34. Carril. TUBERÍAS DE HORMIGÓN DE GRAN DIAMETRO / ETA, Barcelona 1968.
35. Fresneda A. ; DISEÑO DE UN SIFÓN / Rev. Técnica Construcción 2/85-5, la Habana 1985.
36. Vindusov-Pishinski, SIFÓN QUE NO PIERDE EL CEBADO/PAT SU 1321949 Moscú 1987.
37. Kakushiro O INSTALACION PARA LA INTRODUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SIFÓN EN EL MEDIO LIQUIDO, /PAT JP 61 -22160. Japón 1987.
38. SOKOLOV, A.I.; ADITAMENTO PARA EL CEBADO DE SIFONES PORTATILES / PAT SU 235640, Moscú 1969.
39. Bujarín. AV., Vrachev, AV : HIDROELEVADOR SIFONICO / PAT SU 1273655, Moscú 1986.

40. Torginol Industries Inc. : SIPHONING POUR LIQUIDES UTILISES DANS LES CIERCUIITS A VIDE / PAT FR 2045202 Paris 1969.
41. Newsteder, R. ; SIPHONING APPARATUS / PAT US 3682193, New Jersey, USA 1970.
42. Willinger, A. H.; PRIMING DIVÍCE FOR A SIPHON / PAT US 3670758, New York, USA 1970.
43. Johnson.V.E , SIPHON / PAT US 3783888, Minnesota, USA 1971.
44. Niesterov, I.V.; SIFON... / PAT SU 370374, Moscú 1973.
45. Horvath, T ; AQUARIUM SYPHON / PAT US 3771544, New York, USA 1973.
46. Newsteder, R. ; SIPHON STARTING DEVICE / PAT US 4041971, New Jersey, USA 1975.
47. Belieskov, B.I. Matishev.T.I. : ADITAMENTO HIDRÁULICO PARA EXTRAER LOS GASES DE UN SIFÓN Y MANTENER SU PRESIÓN DE VACÍO/ PAT SU 492682, Moscú 1976
48. MareK. P, , APPAREIL ET PROCEDE DE PURGEAGE AUTOMATIQUE DE SIPHONS POUR EVITER LEUR DESAMORCAGE / PAT FR 2372977, Paris 1976.
49. George, J.A. ; SIPHON APPARATUS / PAT US 4181842, Kansas, USA 1977
50. Rinket W.R. TEMPERATURE ACTUATED SIPHON SYSTEM/PAT US 4168717, USA 1978
51. Brugnolf. V. Alberan. A. ; SIPHON HYDRAULIQUE A REFLUX NEUMATIQUE / PAT FR 2435619, Paris 1979.
52. Jacobson, J. A.; SIPHON / PAT US 4414997. California. USA 1980.
53. Becker F. S ; COMBINATON SIPHON AND POSITIVE ACTION PUMP/PAT US 4301826, USA 1981.
54. Mc. Cluskey John, A : SIPHON SYSTEM / PAT GB 2105411. London, UK 1961,
55. Brumfield, W. , HAND HELD AND HAND OPERATED PUMPING AND SIPHONING DEVICE/ PAT US 4574826, Kentucky, USA 1985.
56. Masayu. S. ; SIFÓN PARA DETENER AUTOMÁTICAMENTE UNA BOMBA/ PAT JP 51 -60280 Japón 1985.
57. Maruyata, K. , INTERRUPTOR AUTOMÁTICO TIPO SIFÓN PARA DETENER UNA BOMBA/ PAT JP 621-6497, Japón 1987.
58. Pérez. Diosdado. : EQUIPOS DE BOMBEO / De. CT, 1CL. La Habana 1969
59. Ven Te Chow, ; OPEN CHANNEL HYDRAULICS / eR ICL, La Habana 1969
60. Kraatz, D. , PEQUEÑAS OBRAS HIDRÁULICAS / FAO, Roma 1976.
61. Sotto, March L , TEMAS DE INGENIERIA HIDRAULICA \CIH, ISP JAE, La Habana 1985
62. Sotelo Apila, G : HIDRÁULICA GENERAL / Ed Limusa, México 1952
63. Lancastre, A. ; MANUAL DE HIDRÁULICA GENERAL / Ed. Dossat, Madrid 1957.
64. ENCICLOPEDIA UNIVERSAL ILUSTRADA EUROPEO-AMERICANA Tomo LVI / Ed. Espasa-Calpe, España 1927.
65. Renold G.: TEORÍA Y PROBLEMAS DE MECÁNICA DE LOS FLUIDOS/Ed. Mc.Graw Hill, México 1961.
66. López, Cadenas, . HIDRÁULICA/ Ed-ETS. Madrid 1983
67. Osuna, A ; HIDRÁULICA, MECÁNICA DE LOS FLUIDOS E HIDRÁULICA TÉCNICA / Ed.ETS, Madrid 1978.
68. Silvestre, P. ; FUNDAMENTOS DE HDRAULICA GENERAL, / Ed Limusa, Mexico 1983
69. Ackers, Thomas, , DESIGN AND OFERATÍON OF AIR REGULATED SIPHONS FOR RESERVOIR AND HEADWATER CONTROL / Symp. on Design and Operation of Siphon and Siphon Spillway, British Hydromechanics Research Ass. UK 1975.
70. Goldering, B. T. ; THE USE OF SMALL SCALE SIPHON MODELS. / Proc Instn, Civ Engrs. Part 2, 1979,67, Dec 924-942.
71. Whittington, R. B. : SIPHON, SOME SCALE EFFECTS IN MODELS / J. Hydraulics Div. Am Soc. Civ. Engrs, 1972.
72. Francis, J. R. D. , PROBLEMAS DE HIDRÁULICA Y MECANICA DE LOS FLUIDOS, / Ed. Urmo, España 1968.
73. Kestens Jean, : HYDRAULIQUE GÉNÉRALE / Universite Libre Bélgica 1970.
74. Kisiliov, P; SPRAVOCHIIK PO GIDRAVLISHIESKIM RÁSSCHJETAM / N. MES. SSSR 1951.