

Una publicación de
AGUA PARA LA VIDA

Aire en tuberías de agua

Secunda edición
2005

**Manual para Diseñadotes de Sistemas de Distribución
Rural de Agua Potable Abastecidos por un Manantial e
Impulsados por la Gravedad**

Por
Gilles Corcos

Este Manual esta diseñado como un complemento para los manuales que tratan sobre la construcción de sistemas de distribución rural de agua con flujo gravitacional. Enfoca en los problemas y las oportunidades asociadas con la presencia casi inevitable de aire en la tubería principal desde el manantial hasta el estanque de distribución. El punto de partida es la opinión del autor que la producción de agua desde el manantial es un recurso escaso y valioso que el diseñador debe transportar íntegramente al estanque de distribución, una meta que, dada las variaciones estacionales de una producción típica de manantial, es casi imposible lograr con las tuberías llenas - aun con válvulas reguladoras. Sin embargo, dicha meta se puede lograr mayoritariamente cuando la presencia de aire en la tubería es aceptada, entendida y controlada.

El Manual contiene material nuevo que el autor ha recolectado tanto en el campo como en el laboratorio y que se encaja dentro de un marco teórico relativamente sencillo.

Las ideas esenciales también se pueden aplicar a otras áreas técnicas, como por ejemplo el drenaje, donde se usan tuberías para transportar un líquido a un caudal no especificado.

INTRODUCCIÓN

Cuando se diseña la tubería de un sistema de distribución de agua por gravedad se presume generalmente que el flujo de agua llenará la tubería. En ese caso el caudal en la tubería esta controlado por la carga disponible, la larga, el diámetro y aspereza de la tubería y las así llamadas perdidas singulares causadas por diferentes obstrucciones (constricciones, codos, expansiones, té s y especialmente válvulas). Este caso lo llamaremos el de la tubería llena o el determinado por la fricción. Se encuentra adecuadamente explicado en varios libros de texto y manuales¹. Pero, si por alguna razón la tubería no esta completamente llena de agua, la relación entre la carga disponible y el caudal será muy diferente. Esto se producirá en varios casos, por ejemplo:

- cuando se abre paso al agua por primera vez en una instalación nueva con las tuberías vacías o parcialmente llenas,
- si hay cavitación (demasiada aspiración implicando vaporización del agua) en algún punto del circuito,
- si la tubería esta alimentada por un una fuente a través de una caja de acopio y que su producción es menor que aquella por la cual fue diseñado el sistema.

Ahora bien, la creencia general es que si hay aire en una tubería es necesario deshacerse de el para que los tubos puedan funcionar llenos de agua. Esto se debe a que la presencia de aire a menudo aumenta la carga necesaria para lograr un caudal determinado. De hecho, no es nada raro que el aire actúe como una obstrucción de modo que no haya agua alguna que salga por la boca de salida de la tubería.

Por otra parte, resulta que en el caso de sistemas con fuentes cuya producción es incierta o variable, hay una gran ventaja en poder operar con aire en las tuberías. La ventaja es que se puede diseñar el sistema de tal modo que funcione como un canal y no como una tubería. Dentro delimites fácilmente calculables conducirá hasta el final de la tubería todo el caudal producido por el manantial, y todo esto sin tener que ajustar ninguna válvula – sin necesidad de controles.

Este manual esta escrito para ayudarle a bien manejar el aire en tuberías de agua. En particular, permitirá que:

- entienda el problema de iniciar la operación con tuberías vacías,
- prediga lo que sucederá si el abastecimiento de agua es o llega a ser menor de lo que había supuesto en sus cálculos (para un sistema controlado por la fricción)
- diseñe de propósito sistemas que abastecen suavemente de forma automática una serie especificada de caudales a pesar de que casi siempre haya aire presente en las tuberías.

¹ Véase por ejemplo: *A Handbook of Gravity-Flow Water Systems* por Thomas D. Jordan, Intermediate Technology Publications, 1984. Este manual cubre un amplio rango de temas incluyendo "obstrucciones de aire". Aunque no es lo suficientemente completa para nuestros propósitos, la exposición que hace el Sr. Jordan del aire en las tuberías constituye, sin embargo, un valioso punto de partida.

A través de todo este manual suponemos que, aunque con el tiempo pueda variar la producción del manantial, uno de sus objetivos principales es conducirla integralmente hasta un caudal máximo escogido al tanque de distribución al final de la tubería.

Este manual esta destinado a la vez a dos tipos de diseñadores:

- los que no han tenido la desagradable experiencia de ver que problemas con aire hacen que se comporten mal sus tuberías,
- los que, angustiados por potenciales problemas de aire, ponen una válvula automática saca aire en cada punto alto de sur tubería.

Primero se presentaran los antecedes hidráulicos necesarios para entender el tema. Luego se analizara el método para predecir flujos y diseñar sistemas con aire en las tuberías. Finalmente, se presentaran varios ejemplos que le ayudarán a usar este material y llegar a dominar el tema.

Hallara entre estos unos diseños determinados por fricción que caen en problemas cuando el caudal del manantial llega a ser un poco menor que le valor del diseño, tanto como casos en los que no hay problemas de aire no importe cuan pequeño sea el caudal suministrado a la tubería. Después de haber estudiado estos ejemplos podrá predecir si su diseño determinado por fricción le causará problemas en una situación específica o no. También podrá modificar sus diseños para eliminar los problemas que resulten del aire en las tuberías.

Los ejemplos ponen en claro que el problema no es escoger entre un diseño de tubería llena determinado por fricción y un diseño de tubería con una mezcla aire-agua sino más bien adaptar el diseño considerando la probabilidad de que haya aire presente en las tuberías parte del tiempo.

La manera habitual de eludir la posibilidad de un atasco por bolsas de aire es de sistemáticamente instalar válvulas automáticas saca-aire en cada uno de los puntos altos de una línea de conducción. No aconsejamos esta opción por las razones siguientes:

- 1) como se explicará en el texto cuando una tal válvula funciona en un segmento “supercritico” del circuito con un flujo transitorio de agua y aire, se abre y se cierra constantemente y de manera abrupta, lo que limita su tiempo de vida,
- 2) algunos circuitos no necesitan válvulas ni previsiones particulares para manejar aire ingerido. ¿Porque aumentar su complejidad y sus costos en estos casos?
- 3) La colocación de válvulas saca-aire cerca de puntos altos es algo delicada: se tienen que poner cerca del inicio pero dentro de las bolsas de aire que se forman (si hay flujo) únicamente aguas abajo de los puntos altos que no son nada fácil de ubicar precisamente. Este es un argumento más a favor de no colocar ciegamente válvulas inútiles.

Se ha ordenado el material a continuación de tal manera que se presentan los fundamentos en el Capítulo I. En el Capítulo II se explica la manera de proceder con el diseño. En ese Capítulo se le enseña cómo manejar el aire. En otras palabras: el Capítulo II corresponde a la parte del manual que enseña el “cómo hacerlo”, mientras que el Capítulo I corresponde a la parte que hace referencia al “porqué”. El Capítulo III presenta los ejemplos que explican la materia. La información adicional necesaria para lograr un diseño se encuentra en el Apéndice A, que sea información nueva o información ya disponible en otros libros o manuales. El Apéndice B plantea unos puntos especializados más que darían lugar a confusión en el texto principal. Estos se pueden leer más tarde.

Obviamente las soluciones que se presentan en los Capítulos II y III no son las únicas soluciones posibles, quizás ni sean las mejores. Después de examinar la materia, sin duda escogerá su propia solución. Lo importante es tener suficientes elementos disponibles para poder tomar una decisión fundada.

Nota: es posible (aunque aburrido) realizar un diseño adecuado sin usar las ecuaciones que aparecen en el texto, es decir solamente añadiendo, sustrayendo, multiplicando y dividiendo las tablas. Las únicas excepciones siendo las dos formulas del Apéndice A-IV. Esto se muestra en los Capítulos II y III. Pero también puede descargar del internet un programa APLV llamado *Air in pipes* que le llevara rápidamente (y algo mas precisamente) a través del diseño de una línea de conducción. La ley de fricción utilizada en el programa es algo diferente de la usada en este manual. En particular, la primera permite perdidas de carga singulares y es valida para valores más grandes del número de Reynolds. Esto explica las livianas diferencias que se encuentran entre los cálculos hechos con este manual y con el programa (ver nuestro sitio internet, www.aplv.org o pida el programa a aplv@aplv.org).

Este programa hecho en Visual Basic Excel es la obra de Charlie Huizenga con aportes y sugerencias de Katherine Force, Mathieu Le Corre, Jim Stacey and Gilles Corcos.

La segunda edición de este manual es el resultado de doce años de uso continuo de la primera edición. Incorpora algunos cambios de presentación y mas atención a ciertos casos que han ocurrido en el campo con mayor frecuencia de lo inicialmente previsto. Muchas gracias a Kay Force por el minucioso trabajo de edición hecho y por las sugerencias útiles para mejorar la presentación de esta edición.

SIMBOLOS

h = carga en metros (de **head** en inglés)

H = altura en metros (de **Height** en inglés); H_{AB} = diferencia de altura entre A y B (lo que significa $H_A - H_B$);

Los índices 1 y 2 se refieren a dos puntos a lo largo de la tubería, el punto 1 estando aguas arriba del punto 2. La letra S se refiere al manantial (**Spring** en inglés) o a la caja de acopio. La letra T se refiere al final de la tubería o al tanque de distribución. Otros puntos a lo largo de la tubería están indicados en los esquemas.

h_a = carga disponible ($H_S - H_T$)

h_t = altura de escurrimiento (definida en el texto). El Apéndice A muestra como se calcula.

h_r = pérdida de carga por fricción. Se puede usar la tabla A 1 o las formulas en el Apéndice A para calcularla.

h_{fl} = pérdida de carga por fricción para $Q = Q_C$

h_r = carga máxima requerida ($h_r = h_f + h_t$) si Q es más pequeño que Q_C
($h_r = h_t$) si Q es más grande que Q_C

Q = caudal (m³/s)

Q_C = el caudal critico el más pequeño, o sea el caudal por el cual una larga bolsa de aire es llevada aguas abajo en un segmento horizontal del tubo. Su valor depende únicamente del diámetro de la tubería (ver ecuaciones 1c y 1d, y la tabla A2).

Q_S = el caudal critico el más grande, o sea el caudal por el cual una larga bolsa de aire es llevada aguas abajo cualquiera sea la pendiente de la tubería.

Q_{max} = producción máxima esperada del manantial.

Q_{min.} = producción mínima esperada del manantial.

Q* = Q/Q_C o Q/Q_S . Si $Q < Q_C$ el flujo es llamado subcritico. Si $Q > Q_S$ es llamado supercritico. Cuando $Q_C < Q < Q_S$ el flujo es considerado transicional.

L = larga de una tubería. **L_{ST}** = larga de la tubería del manantial hasta el tanque. **L_{AB}** = larga de la tubería entre los puntos A y B...

V = velocidad del agua en m/s (promedio por sección)

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/sec²)

A = superficie interior de un corte perpendicular del tubo

CAPITULO I

AIRE EN TUBERIAS

El aire en las tuberías de agua aparece principalmente como bolsones grandes y estacionarios o como burbujas grandes o pequeñas móviles.

Cuando el aire se junta en diferentes partes de la tubería sin moverse mueve, el paso del agua puede ser obstruido al punto que el agua no fluya en absoluto, o bien el agua puede circular escurriéndose por debajo de los bolsones de aire. Aprenderá a deducir cual de las dos situaciones se producirá en un caso determinado.

Cuando el agua fluye por la tubería a una velocidad suficientemente alta, los bolsones de aire no pueden permanecer estacionarios y son empujados junto con el agua. En ese caso la presencia del aire en la tubería no afecta la salida del agua. También podrá determinar cuando se producirá esta situación en un caso determinado.

Bolsones de aire estacionarios : puede toparse con este problema al llenar por primera vez la línea de conducción de un sistema de distribución de agua por gravedad recién construido, ya que estará al menos parcialmente llena de aire.

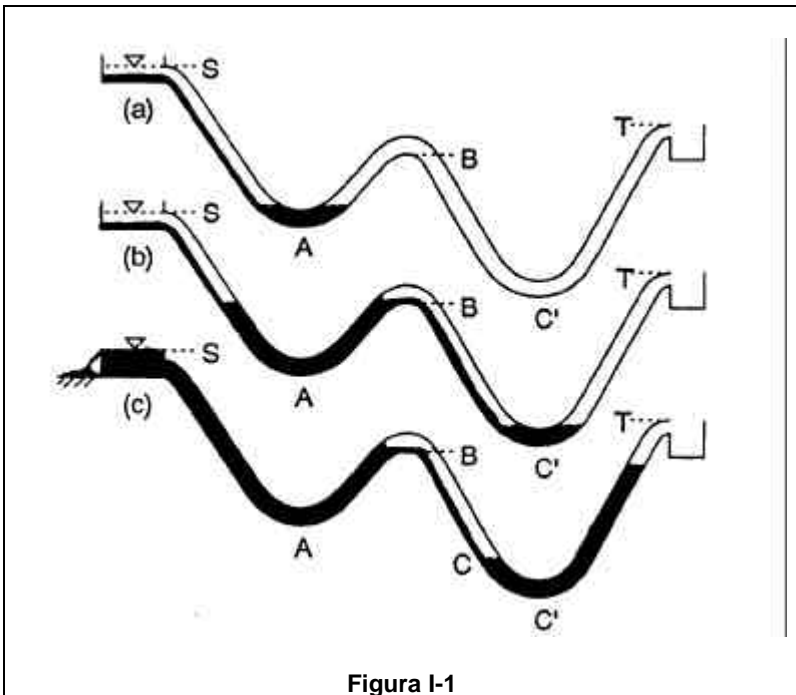


Figura I-1

Si, como sucede en la figura I-1, el perfil tiene un punto máximo local (punto B) entre el manantial S y el estanque T, a medida que se deja salir un flujo pequeño de agua de

S, el agua se acumulará en el punto bajo A y luego llenará la tubería a ambos lados de A (figura I-1a).

El aire será expulsado progresivamente de esta sección de la tubería hasta que no quede más aire entre A y B y el agua llegue al nivel de la parte inferior de la tubería en el punto B (Figura I-1b). La sección BC' seguirá llena de aire y ahora el agua escurrirá lentamente por debajo del aire en dirección descendiente hacia C'. Un pequeño caudal de agua no será capaz de expulsar este aire. A este bolsón de aire estacionario que se encuentra sobre el hilo de agua la denominaremos un **soquete** de aire. El hilo de agua fluyendo por debajo del soquete pronto llenará el fondo de la tubería en C', de modo que el aire entre B y C' ahora estará atrapado y aislado de la atmósfera: el soquete se habrá cerrado (Figura I-1b).

Un Soquete Causa una Pérdida de Carga Igual a Su Altura. El soquete constituye un **constreñimiento** causante de una nueva pérdida de carga: la presión a lo largo de todo el soquete aguas abajo de B debe ser uniforme (porque las variaciones de la presión hidrostática en los gases son insignificantes), y esto hace que la presión en el delgado chorro de agua que fluye por debajo del soquete de aire sea forzosamente uniforme. De allí se origina la pérdida de carga causada por la presencia del soquete: Entre B y el final del soquete el agua pierde energía potencial (altura), no existe ningún aumento correspondiente en la carga de presión puesto que la presión sigue igual en el chorro que fluye por debajo del soquete de aire, y la energía cinética (altura de velocidad) es la misma tanto al comienzo como al final del soquete.

La pérdida de carga causada por la presencia del soquete corresponde a la diferencia entre las cotas al comienzo y al final del mismo.

Dos o Más Puntos Altos. Si existen varios puntos altos locales, como sucede en la figura I-2, a medida que se sigue llenando la tubería aparecerán más soquetes de aire aguas abajo de estos puntos altos, con el resultado que se perderá más carga. La pérdida de carga total es igual a la suma de todas las pérdidas de carga individuales de cada soquete.

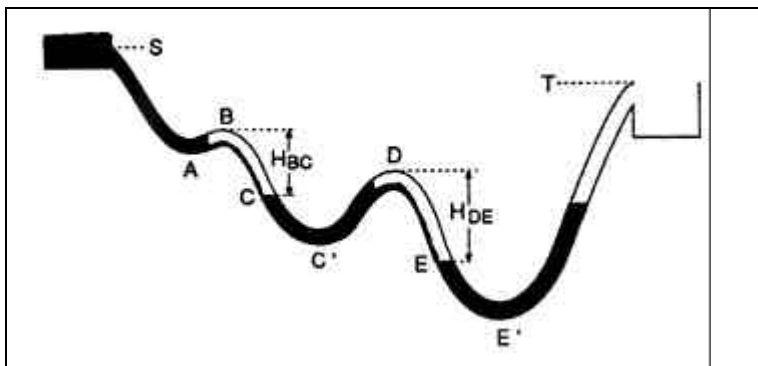


Figura I-2

El Efecto de la Carga en los Puntos Altos. Observe en las Figuras I-1c y I-2 que, mientras que la parte superior de los soquetes de aire permanece en el nivel de los puntos altos locales, como B o D, la parte inferior no tiene por qué permanecer en los

puntos bajos locales, porque a medida que se sigue llenando la tubería, la presión hidrostática en los soquetes aumenta. Esto comprime el aire en los soquetes haciendo que su volumen disminuya, y así ellos se hacen más cortos y su nivel inferior sube de C' a C y de E' a E.

Al Llenar la Tubería ¿Saldrá Agua por la Boca de Salida?

Si se sigue liberando agua lentamente del manantial, el nivel de agua en la tubería más abajo del manantial podría llegar al nivel del estanque del manantial S antes de salir por la boca de salida de la tubería en el nivel T. Este es el caso que se muestra en la Figura I-1c. En ese caso el agua no puede llegar al estanque aguas abajo sino hasta que se haya purgado algo de aire de los soquetes. **Este caso se produce cuando la carga disponible, $h_a = H_S - H_T$, es menor que la suma de las alturas de los soquetes.**

O el agua podría salir por la boca de salida en el punto T antes de rebalsarse al nivel de S. En ese caso, Ud. quizás querrá purgar algo de aire de los soquetes, pero de todos modos antes de hacerlo algo de agua escurrirá por la boca de salida de la tubería. **Este caso se produce cuando $h_a = H_S - H_T$ es mayor que la suma de las alturas de los soquetes.**

Esto enfatiza la importancia de calcular la suma de las alturas de los soquetes. En el Apéndice A-II se enseña cómo hacerlo.

Si el Agua Fluye: Dos Maneras de Limitar la Descarga. Hasta ahora hemos supuesto que sólo una cantidad muy pequeña de agua es entregada por el manantial. Ahora supondremos que la descarga del manantial es mayor, aunque siempre limitada. O sea no existe un estanque grande o un lago en el sitio del manantial. Podemos ver que el caudal de agua y las descargas en T pueden ser limitados de una de dos maneras:

1. Se puede limitar por medio de la pérdida de carga en la tubería. Esta pérdida de carga aumenta con el caudal, así que existe un gasto en el cual la pérdida de carga es igual a la carga disponible, y obviamente no importa cuanta agua salga del manantial, la cantidad que fluye por la tubería no puede superar el caudal en el cual la carga disponible es igual a la pérdida de carga. El resto de la producción del manantial simplemente rebalsa del estanque del manantial. (Desde el punto de vista práctico esto es poco deseable ya que rara vez nos encontramos con fuentes cuya producción excede las necesidades presentes o futuras de la comunidad, así que, consideramos que un derrame en el manantial constituye una pérdida, aun cuando el suministro al estanque de distribución cumpla con las necesidades mínimas: la comunidad siempre puede servirse ventajosamente de agua adicional).

2. O la descarga puede estar limitada por la producción del manantial. Esto sucede siempre que dicha producción es menor que el caudal para el cual las pérdidas de carga son iguales a la carga disponible.

En el primer caso (gasto limitado por pérdidas de carga) la sección de la tubería más abajo de S estará llena de agua.

En el segundo caso (gasto limitado por producción del manantial) el caudal que sale del estanque del manantial no llenará la tubería, y empezaremos más abajo de S con lo que se podría llamar una cascada. Esto es importante porque generalmente la cascada produce burbujas de aire y éstas son transportadas (en mayor o menor grado) por el agua a lo largo de la tubería, de modo que en este segundo caso junto con el agua también se suministrará aire. A veces esto no tiene mayor importancia; sin embargo, veremos que existen casos frecuentes donde esta nueva fuente de aire causa problemas.

El caudal Crítico.

Ahora regresemos a los soquetes de aire que suponemos que no hemos purgado. Resulta que existe un gasto especial que se llama el **caudal crítico**, Q_c , que es fijado por el diámetro de la tubería en la zona de los soquetes.

Puede ser que el sistema sólo entregue un caudal inferior al crítico Q_c , ya sea porque el caudal que sale del manantial es menor o porque las pérdidas combinadas causadas por roce para $Q = Q_c$ y el aire en los soquetes superan la presión disponible.

O el sistema podrá entregar un caudal mayor que Q_c porque el caudal que sale del manantial es mayor y la carga disponible es mayor que la suma de la pérdida por roce requerida para $Q = Q_c$ y cualquier otra pérdida de carga debido a la presencia de aire.

Pues el caudal crítico Q_c tiene el siguiente significado físico : Si el caudal Q que el sistema es capaz de producir es menor que Q_c , los soquetes de aire permanecerán en posiciones fijas aguas abajo de los puntos altos. Los puntos superiores de los soquetes permanecerán al mismo nivel que los puntos altos de la tubería. El nivel de los puntos inferiores de los soquetes dependerá de la masa de aire que haya logrado entrar al soquete y de la presión en él. La pérdida de carga que producirán seguirá siendo la suma de las alturas de los soquetes.

Si el caudal Q que el sistema es capaz de entregar es mayor que Q_c , el aire será expulsado de los soquetes y cualquier aire adicional proveniente desde aguas arriba también circulará por la zona de los soquetes sin quedar atrapado.

El caudal crítico sólo depende del diámetro de la tubería en la zona del soquete, se da en puntos altos cuando:

$$Q_c = 0,38 d^{5/2} g^{1/2} \quad * \quad (1a)$$

Pero soquetes estacionarios no serán llevados aguas abajo de la cuesta siguiendo el punto alto hasta que el caudal Q valga:

$$Q_s = 0,50 d^{5/2} g^{1/2} \quad * \quad (1b)$$

donde d es el diámetro interior de la tubería en la zona del soquete y g es la aceleración de gravedad. Si Q está en metros cúbicos por segundo, las ecuaciones (1a) y (1b) se puede escribir con d en metros:

$$Q_c = 1,19 d^{5/2} \quad (1c)$$

$$Q_s = 1,57 d^{5/2} \quad (1d)$$

* En la tabla A2, Apéndice A, se da Q_c y Q_s para algunos diámetros de tubería. **A los gastos mayores que Q_s se les llama supercríticos, y a los que son menores que Q_c se les llama subcríticos, subcritical.**

¿Podemos Evaluar la Pérdida de Carga Adicional Causada por los Soquetes?

Una conocida ecuación energética (escrita en unidades de altura) nos permite determinar el flujo en tuberías llenas sin soquetes de aire. Es:

$$\frac{8Q^2}{d_1^4} + h_1 + H_1 = \frac{8Q^2}{d_2^4} + h_2 + H_2 + h_f$$

1 2 3

El primer término a la izquierda corresponde a la "energía cinética" (energía de velocidad). El segundo corresponde a la energía de presión. Y el tercero corresponde a la "energía potencial" (energía debido a altura). El subíndice 1 se refiere a la sección aguas arriba y el subíndice 2 a la sección aguas abajo. La ecuación dice que la suma de los tres términos energéticos en la sección aguas abajo es menor que la suma de los tres términos energéticos en la sección aguas arriba porque hay una pérdida h_f causada por la fricción entre 1 y 2. Esta pérdida siempre es positiva. Se puede calcular h_f si se conoce los valores de Q , d , y la distancia entre 1 y 2, (véase el Apéndice A). Ahora bien, tal como hemos visto, cuando existen soquetes de aire entre 1 y 2, la ecuación energética debe incluir un término adicional de pérdida en el lado derecho de la ecuación. Sólo se puede calcular este término cuando se sabe la diferencia entre las cotas al comienzo y al final de los soquetes. Sin embargo, este caso se produce solamente cuando se llenan tuberías vacías (véase el Apéndice A), y no más adelante porque el aire puede salir de los bolsones de aire como burbujas, y además puede ingresar desde aguas arriba para reaprovisionar lo que ha salido como burbujas; así que por lo general no se sabe cuanto aire hay en la tubería. Lo que sí se sabe es que la pérdida inicial de carga a causa de los soquetes que usted encontrará al llenar las tuberías vacías por primera vez y que luego calculará para el caudal crítico (más adelante llamaremos a esta pérdida de carga **la altura de escurrimiento, h_t**), corresponde a la pérdida máxima de carga causada por soquetes de aire. Normalmente usted diseñará pensando en esta situación, que es el peor de los casos.

Debe tener en mente los puntos siguientes:

- la pérdida de carga causada por un soquete de aire que contiene una masa determinada de aire no variará significativamente con el caudal, siempre y cuando ese gasto sea menor que el crítico, Q_c . En el caso en

que Q es mayor que Q_c (en realidad menor que Q_s como se verá en el Capítulo II), la pérdida de carga desaparecerá porque el aire será expulsado.

- la pérdida de carga causada por soquetes no es solamente un problema de la puesta en marcha. Sin importar si el caudal es subcrítico o supercrítico, las burbujas de aire y los bolsones de aire pueden ser transportados desde la parte de la tubería debajo del manantial hacia el lugar donde se encuentran los soquetes de aire, siempre que la carga requerida sea menor que la carga disponible. Si el caudal es subcrítico, esto quiere decir que los soquetes de aire podrán volver a llenarse después de haber sido purgados en forma manual.

Bolsones y Burbujas de Aire en Movimiento: Lo que sucede cuando Q supera a Q_s es que, puesto que ahora el caudal es lo suficientemente grande para expulsar el soquete de aire, la carga requerida disminuye de repente (desaparece h_f). Ahora bien, si la carga disponible es suficientemente grande para hacer que Q supere a Q_s antes que sea expulsado el soquete, se producirá después un gasto aun mayor. Ahora el caudal será determinado por la carga disponible y las pérdidas normales por roce. Si la producción del manantial es suficientemente grande para suministrar ese gasto mayor, la tubería se llenará de agua y se mantendrá llena. Pero si no es así, es decir, si la producción del manantial no alcanza para suministrar el caudal de la tubería sin aire, lo que casi siempre sucederá es que el agua arrastrará el aire que se encuentra en la sección inicial de la tubería y lo conducirá por la tubería. Más adelante se darán algunos detalles acerca de este arrastre. Aunque el caudal supercrítico puede parecer complicado, inestable e impredecible, lleno de burbujas en movimiento continuo, guarde en mente que **siempre que Q siga siendo mayor que Q_s , la presión requerida será aquella que usted calcularía para Q si la tubería estuviera llena.**

Arrastre de Aire en Gastos Subcríticos y Supercríticos Cuando la Producción del manantial Limita el Caudal. Imagine ahora que el caudal del manantial a bajado de manera a que necesite menos carga (para una tubería dada) que la disponible. Uno pensaría que en este caso el nivel del agua en la tubería más abajo del estanque del manantial simplemente se ajustaría de modo que la carga de agua compensaría la pérdida por roce para el caudal disponible. Sin embargo, esto sucede solamente cuando el caudal es extremadamente pequeño (comparado con Q_c). Más bien, si la tubería no está llena más abajo del manantial (porque la carga disponible h_a es mayor que la pérdida por roce h_f), la corriente puede transportar burbujas de aire (creadas por la caída del agua desde el manantial) aguas abajo junto con el agua. En el caso de caudales pequeños, el agua solamente transporta burbujas pequeñas y arrastra poco aire. En el caso de caudales que son un buen porcentaje de Q_c , burbujas más grandes (y un mayor volumen de aire) son transportadas aguas abajo. Ambos pueden volver a llenar los soquetes de aire después que han sido sangrados. Normalmente esto toma bastante tiempo, hasta varios días. Cuando Q es mayor que Q_c , el aire sigue siendo arrastrado desde más abajo del manantial, pero no permanece en un soquete fijo, estacionario. En cambio, es expulsado periódicamente (cuando Q es sólo un poco mayor que Q_c), o en forma más continua (en el caso de gastos mayores). Ahora el flujo en la primera sección de la tubería es muy complejo, lleno de rebalsas en movimiento y cascadas. Las burbujas de aire o bolsones de diferentes tamaños circulan por la tubería junto con el agua. Esto no afecta negativamente el funcionamiento de la tubería, **siempre que el manantial sea capaz de suministrar un gasto mayor que Q_s .** Sin embargo, si la producción del manantial cae por debajo de Q_c , el aire en tránsito por la tubería volverá a acumularse en las zonas de soquetes aguas abajo de los puntos altos locales, y producirá una nueva pérdida de carga. Así que:

La manera más frecuente de meterse en líos con soquetes de aire después de haber puesto en marcha el sistema, es que el caudal disminuya de un gasto supercrítico a uno subcrítico como resultado de una disminución en la producción del manantial. Si esto sucede, el flujo puede quedar completamente cortado.

La manera más frecuente de meterse en líos con soquetes de aire después de haber puesto en marcha el sistema, es que el caudal disminuya de un gasto supercrítico a uno subcrítico como resultado de una disminución en la producción del manantial. Si esto sucede, el flujo puede quedar completamente cortado.

Otra fuente menos frecuente de problemas es el caudal subcrítico logrado cuando se sangraron los soquetes de aire la primera vez: El aire lentamente regresa a la zona del soquete sin que el caudal disminuya, pero, si la producción del manantial disminuye y luego nuevamente aumenta, el sistema no será capaz de seguir las variaciones en la producción del manantial.

La Figura I-3 presenta los requisitos de presión (si se comienza con tuberías vacías).

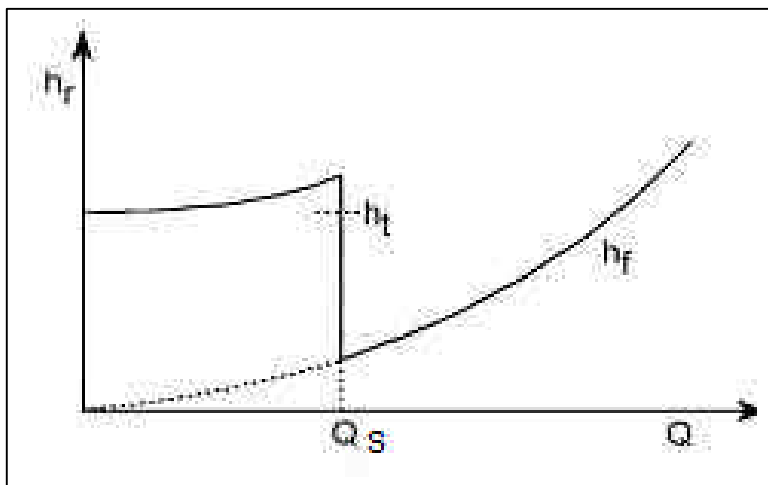


Figura I-3

Este gráfico es apropiado aun cuando existan varios puntos máximos locales en el perfil de la tubería, como sucede en la figura I-2, pero solamente si los diámetros aguas abajo de los diferentes puntos máximos son todos iguales. Muestra la carga máxima requerida en el eje vertical y el caudal en el eje horizontal. Cuando Q es menor que Q_s , la carga requerida corresponde a la suma de dos términos: la altura de escurrimiento h_t y la pérdida de carga por roce h_f . h_f es la curva que comienza como una línea de puntos y sube en forma constante. Ella aumenta con el caudal. Cuando Q es mayor que Q_s , h_t es igual a h_f porque h_t habrá desaparecido (no se producen pérdidas por soquetes).

Cuando existen varios soquetes y los diámetros del tubo aguas abajo de los puntos altos no son iguales, la disminución repentina de h_f a medida que Q aumenta sucede por etapas, tal como lo muestra la figura I-4. La primera etapa se produce en el valor de Q igual al valor de Q_s para el diámetro de tubería más pequeño: el soquete con el diámetro de tubería más pequeño pierde el aire primero.

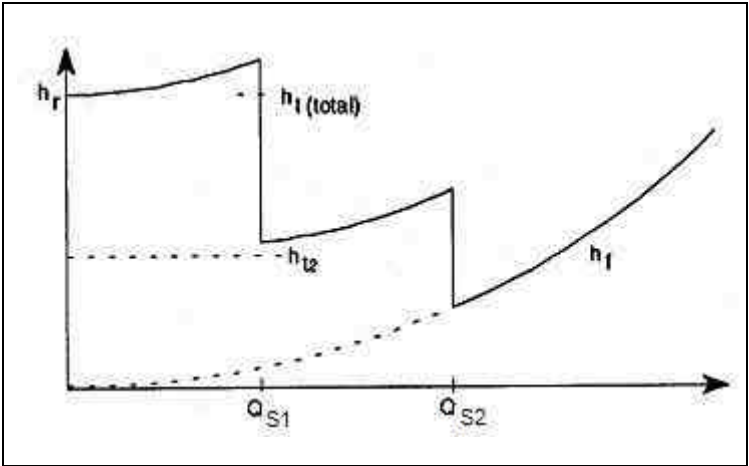


Figura I-4

Representamos la carga disponible, $h_a = H_S - H_T$, como una línea horizontal en el mismo gráfico (Figuras I-5a y I-5b).

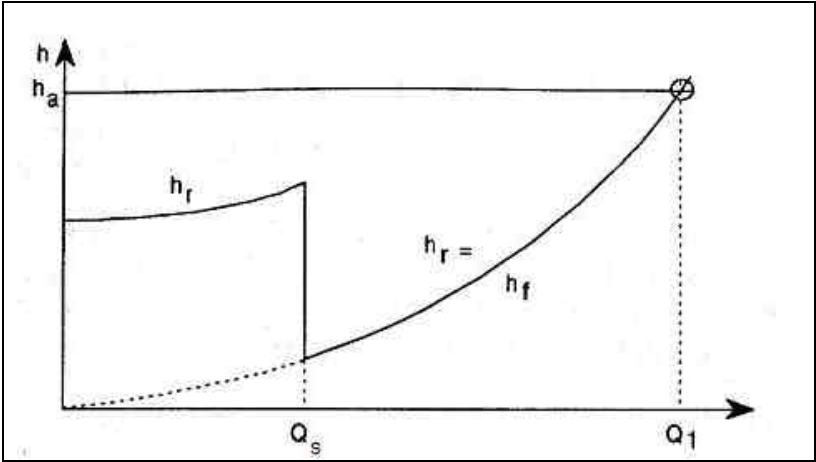


Figure I-5a

El valor más bajo de Q en el cual la línea cruza la curva de carga requerida corresponde al caudal máximo que puede suministrar la tubería.

Si, como sucede en la Figura I-5a, la línea horizontal h_a yace más arriba de la curva h_r para los valores bajos de Q , y la cruza sólo una vez, la situación será simple: la tubería suministrará el caudal procedente del manantial entre $Q=0$ y Q_1 , el punto de cruce, y si la producción del manantial es mayor que Q_1 , el excedente rebalsará en el manantial.

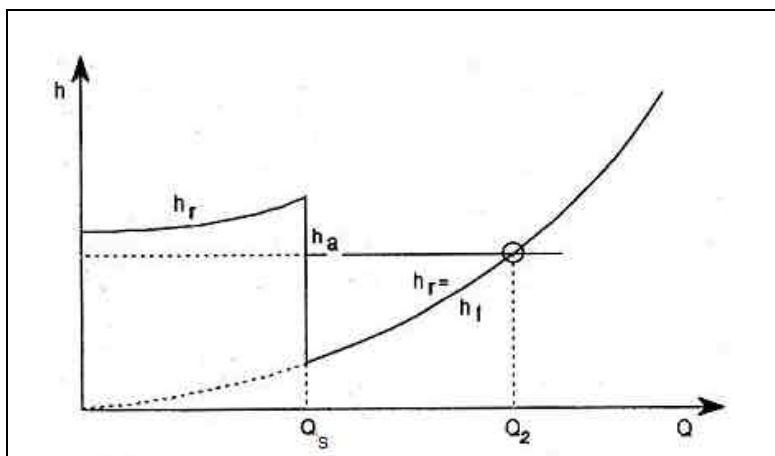


Figure I-5b

Si, como sucede en la Figura I-5b, la línea horizontal h_a está más abajo de h_r , aun en $Q = 0$, el agua no fluirá en absoluto, **a menos que primero se sangre suficiente aire de los soquetes para que la curva h_r termine más abajo de h_a** . Si sangra el aire, podrá tener un gasto supercrítico hasta Q_2 , siempre y cuando, por supuesto, la producción del manantial sea lo suficientemente grande.

Estas son solamente dos situaciones posibles que se han usado para explicar el significado de estas curvas. En el Capítulo II, usted aprenderá que existen varios casos distintos que llevan a diseños diferentes. Ayuda poder clasificar estos casos. Dependen esencialmente del tamaño relativo de la carga disponible, h_a , de la altura de escurrimiento, h_f y de pérdida de carga por fricción cuando $Q = Q_s$ que llamaremos h_{f1} .

Aquí nos topamos con una dificultad que quizás ya le está empezando a causar confusión: Tanto h_f como Q_s dependen del diámetro de la tubería, y éste no puede ser seleccionado antes de clasificar el caso. Así que, ¿cómo vamos a proceder? ¡Aquí va!

La capacidad de una tubería a funcionar de manera supercrítica es casi solamente una cuestión de pendiente promedio

Hemos visto que cuando el flujo es subcrítico en las zonas de soquetes no puede evacuar el aire ahí atascada y que cuando es supercrítico sí puede. Ahora bien, para que un flujo llegue a ser supercrítico necesita tener suficiente carga disponible para vencer la fricción generada cuando el caudal crítico fluye por la tubería. Haremos dos simplificaciones que nos permitirán traducir aproximadamente esta condición en una mucho más simple:

- La primera simplificación es de imaginar que el diámetro de la tubería es idéntico sobre su larga entera, dejamos de lado por ahora el control obtenido escogiendo un diámetro para las zonas de soquete y otro diferente para las zonas donde la tubería está llena. Esa opción se utilizará más tarde para pasar de una categoría a otra.
- La segunda simplificación es una aproximación: la pérdida de carga por unidad de distancia se escribe a menudo de la forma siguiente:

$$h_f/L = 0.0826 Q^2 f / d^5 \quad (1e)$$

donde Q es el caudal en m^3/sec , d el diámetro interior de la tubería en metros, h_f/L la pérdida de carga por unidad de distancia (sin dimensiones) y (1e) define f como un coeficiente de fricción sin dimensiones cuyo valor depende del número de Reynolds y de la aspereza de la tubería.

Para tubos de PVC la aspereza es muy pequeña y f varía poco a través de un largo espectro de diámetros y caudales.

Para tubos lisos la aproximación consiste en utilizar un valor promedio de f , 0.026. Bajo estas condiciones visto que

$$Q_s = 1.57 d^{5/2}$$

Obtenemos sencillamente para $Q = Q_s$:

$$h_{f1}/L \cong 0.0053 \quad (1f)$$

donde h_{f1}/L es la pérdida de carga mínima por unidad de distancia incurrido para un lograr un flujo supercrítico. En otras palabras, dadas nuestras aproximaciones, si la pendiente promedio de la tubería es del orden de 0.5 % y que el diámetro de la tubería es escogido (como se debe) para que la pérdida de carga por fricción por unidad de distancia sea igual a la carga disponible, el flujo puede ser supercrítico si llega a ese caudal (o sea si las pérdidas de carga debidas a bolsones de aire no impiden que alcance la velocidad crítica).

De otro lado para:

$$\begin{aligned} Q &= Q_c = 1.19 d^{5/2} \\ h_{f2}/L &= 0.0030 \end{aligned} \quad (1g)$$

donde h_{f2}/L es la pérdida de carga máxima por unidad de distancia requerida para asegurar un flujo subcrítico. De esa manera, para pendientes más pequeñas de 0.003

no hay modo dadas nuestras aproximaciones de lograr una línea de conducción supercrítica.

Observe que si el caudal es más pequeño que lo que las pérdidas por unidad de distancia son iguales a la pendiente media, una pendiente de 0.0053 no garantice que un flujo supercrítico puede ser mantenido.

Clasificaremos una línea de conducción donde $h_a/L > 0.0053$ como **un caso A o caso potencialmente supercrítico**, y una línea de conducción donde $h_a/L < 0.0030$ como **un caso B o caso subcrítico**. En el programa de computadora que sigue los pasos indicados en este manual un cálculo de fricción mas preciso es utilizado para clasificar la línea de conducción.

Tener en cuenta

- 1) como el factor de fricción no es realmente constante, como lo asumimos, sino que varía en practica para un caudal critico de hasta +/- 20%, los limites de la zona entre pendientes promedios supercriticos y subcriticos variarán con las mimas proporciones.
 - 2) La noción de caudal subcritico solo tiene sentido físico cuando el agua se escurre debajo de bolsas de agua. Así que, escogiendo con cuidado los diámetros de la tubería en las zonas de soquetes (es decir suficientemente grandes) y ajustándolos en el resto de la tubería de manera que la pérdida de carga sea la que busca, siempre puede asegurar un caudal subcritico en las zonas de soquetes si eso quiere. Este punto es estudiado con más detalle en el Capítulo II.
 - 3) En el método aproximado para determinar la perdida de carga por fricción para el caudal crítico descrito aquí, así como en los cálculos mas precisos del programa informático la larga de tubería utilizada para obtener h_{r2} de h_{r2}/L es la parte de la tubería aguas arriba del soquete considerado que está llena de agua. La parte ocupada por los soquetes previos no contribuye a h_{r2} pero sus diferencias de nivel contribuyen a h_t .
 - 4) Si $0.003 < h_a/L < 0.0053$ puede probar si posible trabajar de manera supercritica escogiendo tubos de diámetros mas pequeños aguas abajo de los puntos altos (ver la discusión del caso A2 en el Capítulo II).
- En practica estos casos marginales son mejor resueltos de manera subcritica.

CAPITULO II

DISEÑANDO CON AIRE

A) Datos requeridos para el diseño :

- El caudal máximo que se desea en la línea de conducción Q_{max} , y el caudal mínimo observado que produce el manantial Q_{min} si este dato existe.
- HS y HT así como la elevación relativa y la distancia de la fuente siguiendo el suelo de todos los puntos bajos y altos locales (A, B, C', D, E'etc., T). Se necesita también conocer estos datos para suficientes puntos a lo largo de la línea para poder determinar con precisión satisfactoria la altura de cada punto en función de su distancia para, por ejemplo, conocer los cambios de pendiente.
- Cuando se lleva a cabo la topografía es útil marcar los puntos altos con una estaca. También es útil afinar el paso de la topografía alrededor del punto alto de manera a determinar a que distancia de cada lado la pendiente del suelo llega por ejemplo al 1 %. Esto evitará equivocarse sobre la posición del punto alto, cosa que puede ser un grave error. Los coordenados horizontales (Norte - Sur, Este - Oeste) no son utilizados directamente en el diseño pero a menudo tienen su utilidad.

B) Tiene dos opciones :

Puede seguir el método descrito adelante o puede utilizar el programa de APLV *Air in Pipes* que puede descargar de nuestro sitio web www.aplv.org . Este programa hará todas estas etapas descritas. Sin embargo, le aconsejamos examinar atentamente el material contenido en este manual, sin ello no entenderá la lógica detrás de las soluciones propuestas. Una prueba de su comprensión sería que diseñe a la mano algunas líneas de conducción sencillas y que compare sus resultados con los que da el programa

C) Diseño:

Este es el diseño que permite que el sistema distribuya en forma automática un gasto variable del manantial. Evita sistemáticamente los problemas con el aire durante el curso de la operación del sistema. Este tipo de diseño (en alguna de sus versiones) siempre es posible si el estanque del manantial está más alto que cualquier otra parte de la tubería.

Para la misma topografía y los mismos caudales puede que mas de una solución sea posible. En ese caso conocer el costo y la disponibilidad de válvulas automáticas purgadoras de aire ayudara a tomar la decisión.

¿Se puede evitar el problema?

- Si no hay ningún punto alto intermedio, no habrá ninguna obstrucción de aire, y cualquiera que sea el caudal entregado

por el manantial, podrá proseguir como si la tubería estuviera siempre llena.

Deberá usar Q_{max} como Q , L_{ST} como L y h_f en las tablas de roce A1.

¡Tenga cuidado con la ejecución! Este atento en las zonas llanas donde la instalación mal hecha de tubería puede resultar en un punto livianamente mas alto que el resto del perfil, lo que daría resultados muy diferentes (vea el ejemplo 5b, Capítulo III).

- **Hay puntos altos intermediarios**

Si el punto abierto T está más bajo que algún punto local alto, podrá eliminar el soquete aguas abajo de ese punto alto, si así lo desea, abriendo un respiradero en la tubería en ese punto, mediante la colocación de un pequeño estanque ventilado. Al hacer eso, se traslada el punto S a ese punto alto. Sin embargo, esta solución puede salir más cara que otras soluciones alternativas así que no se quede en eso. Tenga en mente también que un tanque rompe presión y un respiradero no son equivalentes a una válvula purgadora de aire: los dos primeros imponen la presión atmosférica en ese punto, la tercera solo comunica con el exterior cuando hay aire en ese punto de la tubería.

En todos los casos donde haya puntos altos intermediarios, las etapas siguientes son estas:

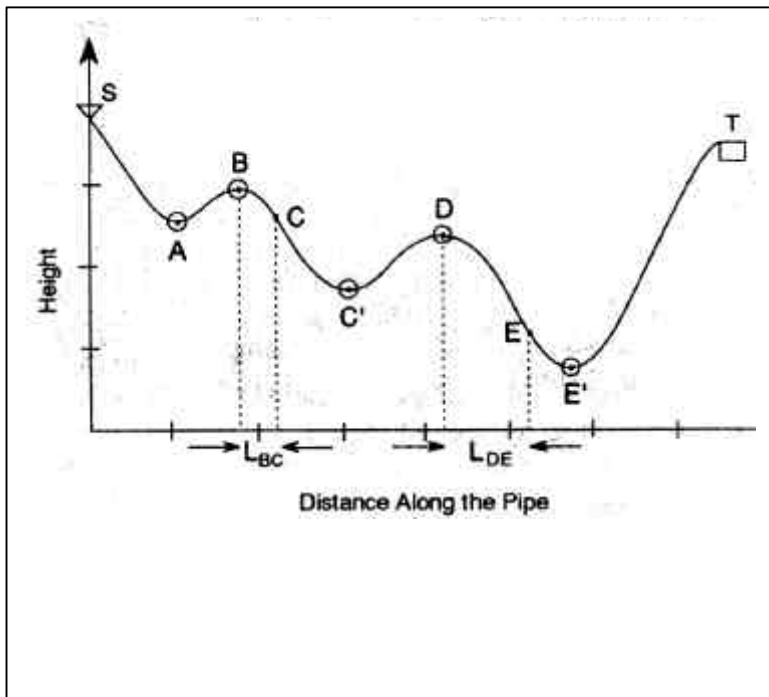


Figura II-1

1) Calcule la carga disponible, h_a con

$$h_a = H_S - H_T$$

2) Calcule la altura de escurrimiento, h_t (para caudales supercríticos) :

La altura de escurrimiento es la mayor pérdida de carga causada por la mayor cantidad posible de aire atrapado en la tubería cuando el caudal alcanza el caudal crítico Q_c . En general no es precisamente igual (es algo mayor) a la carga que tendrá que llevar para que el agua empiece a fluir cuando la tubería está llena de aire porque cuando el caudal es igual a Q_c , la fricción en las partes llenas de la tubería disminuye la presión en los soquetes de manera que se expanden ligeramente. Pero es la pérdida de carga que importa para nuestros diseños. El proceso calcula la altura de cada soquete y las suma.

Dibuje la línea de conducción a escala. La única manera conveniente es de utilizar la larga de la tubería como eje horizontal y de exagerar la escala vertical. Escoja un punto cero de altitud y con esta referencia apunte las alturas de S, T, A, B, C' etc. Mida la distancia siguiendo la tubería de cada uno de estos puntos. Llame L_{SB} la larga de tubería entre S y B, etc.

Para obtener la altura de escurrimiento asuma que:

- el volumen inicial de aire es el que esta contenido en secciones tales BC', DE', etc. (como cuando se empieza con una tubería vacía). Esta es una hipótesis conservadora pero es la sola enteramente segura.
- toda la carga disponible se podrá utilizar para calcular la presión dentro de los soquetes (lo que significa que el tramo entre S y B esta lleno de agua).

Primera etapa:

anote las cantidades $(H_B - H_{C'})$, $(H_D - H_{E'})$, ... y las distancias asociadas a estas cantidades: $L_{BC'}$, $L_{DE'}$, ...

Segunda etapa:

calcule la carga máxima sobre el primer soquete, esta es a menudo casi

$$h_1 = (H_S - H_B) - 0.0053L_{SB}$$

Tome nota que esta formula asume que la pérdida de carga en el primer tramo de la tubería es debida a un flujo crítico. Si el caudal es supercrítico esta es carga que se debe tomar en cuenta, sin embargo, si el caudal es subcrítico esta hipótesis llevará a subestimar la presión en el primer soquete, h_1 . Veremos más adelante que este error no tiene gran consecuencia.

Tercera etapa:

calcule el cambio de volumen debido a la compresión del soquete por la presión h_1 . Se hace la hipótesis de que la temperatura del aire es la misma antes y después de la compresión (véase en el apéndice B1). La relación entre el volumen v_1 después de la compresión y v_1' antes de ella se escribe de la manera siguiente:

$$v_1/v_1' = 10.4 / (10.4 + h_1)$$

con h_1 escrito en metros.

A condición de que el diámetro de la tubería no cambie entre B y C' la larga del soquete se comprime siguiendo la misma proporción.

$$L_{BC} = L_{BC'} \times 10.4 / (10.4 + h_1)$$

Una vez calculado l_1 puede dibujar el tramo BC en el perfil del sistema y así hallar la altura del punto C.

Cuarta etapa:

La carga en el punto C es la misma que en el punto B, o sea h_1 . La carga sobre el soquete siguiente (D-E) será entonces:

$$h_2 = h_1 + (H_C - H_D) - 0.0053 \times L_{CD}$$

Si h_2 es un número positivo pase a la quinta etapa

Si h_2 es negativo, sin embargo, pase a la etapa Cuarta etapa bis.

Cuarta etapa bis :

Puede ser que h_2 (y o h_3 , h_4 , etc.) sea negativo, es decir una presión inferior a la presión atmosférica. En este caso debe parar su cálculo de la altura de escurrimiento: debe modificar su sistema porque puede ser que cavite – lo que significa que el sistema producirá vapor de agua en los puntos de presión baja y que esto puede provocar una falla de la línea de conducción por gravedad.

De todos modos se deben evitar sistemáticamente las presiones negativas. Hay dos soluciones:

1 – instalar una válvula saca aire automática en uno o mas de los puntos altos anteriores (véase el apéndice A-III sobre como colocar correctamente estas válvulas)

2 – si el punto alto precedente es más alto que el tanque instalar allí un tanque rompe-presión.

Si se escoge la primera solución se vuelven a calcular las cargas como si no hubiera soquete entre la válvula y el siguiente punto bajo. Por ejemplo, si h_2 es negativo y que se instala una válvula en B, la presión en D sería, después de eso, sencillamente $H_S - H_D$.

Si se escoge la segunda solución, empezara desde cada tanque rompe presión como si fuera una fuente. Siguiendo con el mismo ejemplo que anteriormente: si h_2 es negativo y que se instala una válvula en B, la presión en D sería, después de eso, sencillamente $H_B - H_D$.

Quinta etapa :

La larga del segundo soquete se determina de la misma manera que la del primero:

$$L_{DE} = L_{DE'} \times 10.4 / (10.4 + h_2)$$

La altura H_E del punto E al final de esa larga se haya otra vez dibujando el segmento L_{DE} desde D sobre el dibujo a escala del perfil de la tubería.

Sexta etapa :

Si hubieran mas soquetes repetiría el procedimiento utilizado para el segundo soquete para ellos.

Séptima etapa :

Adicione el tamaño vertical de cada soquete, esta es la altura de escurrimiento:

$$h_t = \{H_B - H_C\} + \{H_D - H_E\} + \dots \text{etc.}$$

Octava etapa :

Apunte no solo h_t sino también el número de válvulas saca aire automáticas y el número de tanques rompe presión que ha usado, son parte del diseño final.

Note :

• **Obtener presiones negativas en un punto alto puede ser inevitable en terreno especialmente difícil. Pero obtener varios puntos altos con presión negativa a menudo significa que trazado de la línea de conducción ha sido mal escogido. Probablemente será mejor que lo vuelva a examinar. Vea el apéndice B-VII para consejos sobre como escoger el trazado de la mejor manera.**

• **Para dibujar una línea de gradiente hidráulico con un soquete vea el apéndice A-II.**

3) Ha calculado h_a y h_t , puede ahora evaluar h_{fl} aproximadamente como :

$$h_{fl} = 0.0053 \times \{L_{ST} - L_{BC} - L_{DE} - \text{etc} \dots\} \quad (2a)$$

{ todos los tramos llenos de agua }

Puede ahora hacer una **primera** clasificación de su problema

- Si $h_a/L > 0.0053$ tiene un caso A (o potencialmente supercrítico)
- Si $h_a/L < 0.0030$ tiene un caso B (o subcrítico)
- Si $0.003 < h_a/L < 0.0053$ tiene un caso intermediario que siempre puede ser transformado en un caso B pero que a veces también puede ser transformado en un caso A: vea la discusión del caso A2 mas adelante.

El caso A se puede volver a dividir como sigue:

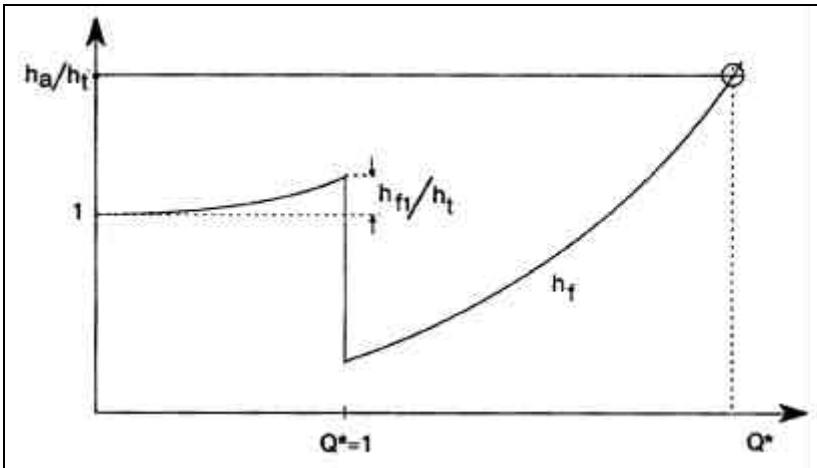


Figura II-2: Caso A1

Si $h_a > (h_t + h_{fl})$ es un caso A1

Caso A1

Para las líneas de conducción aquí clasificadas la carga disponible la carga disponible es suficiente para vencer la pérdida de carga por fricción al caudal crítico y la altura de escurrimiento máxima posible, el flujo puede entonces acelerar hasta la zona supercrítica donde la pérdida de carga causada por la altura de escurrimiento desaparece. Para flujos del tipo A1, no es necesario hacer nada con respecto al aire, sean cuantos sean los puntos altos sin válvulas purgadoras de aire que haya.

Su diseño es entonces el siguiente:

Encuentre la combinación de diámetros de y de largas que le dará que provocará una pérdida de carga de $h_f = h_a$ al caudal máximo que espera.

Así se hace:

En los relativamente escasos casos donde en el transcurrir de sus cálculos de altura de escurrimiento ha debido instalar válvulas saca aire automáticas para evitar presiones negativas tendrá que instalar en los alrededores inmediatos de la válvula una tubería con un diámetro suficientemente grande,

$$d > 0.933 Q_{\max}^{2/5} \quad (2b)$$

de manera a asegurar un caudal subcrítico en el lugar donde está ubicada la válvula (vea el apéndice A para mas detalles). Esto es necesario para evitar que la válvula se abra y se cierre abruptamente y continuamente con el pasaje de bolsas de aire. Calculará entonces la pérdida de carga a través de ese tramo de caudal subcrítico con la ayuda de las tablas o de las ecuaciones en el apéndice A.

A través de toda la larga (desde el punto alto hasta el siguiente punto bajo) de los soquetes que quedan (los que no tengan válvulas saca aire puestas) escogerá entre la tubería disponible la que tenga diámetros tales que:

$$d > 0.835 Q_{\max}^{2/5} \quad (2c)$$

Este diámetro según la tabla A-2, será lo suficientemente pequeño para mantener un caudal supercrítico en ese tramo. Calcule después la pérdida de carga generada en esos tramos por el caudal máximo.

Finalmente determine a partir de las tablas el diámetro de lo que queda de tubería, usando como h_f , h_a – (la suma de las dos pérdidas de carga calculadas precedentemente). El caudal que debe usar es Q_{\max} .

Puede preguntarse porque será que las zonas de soquetes si válvulas purgadoras de aire se trataron de una manera diferente al resto de la tubería visto que nuestra clasificación nos enseñó que el flujo era siempre supercrítico. Viene del hecho de que solo existen un número finito de diámetros comerciales y que esto implica que pueda ser necesario dividir una larga en dos segmentos de diámetros diferentes. Cuando el caso es solo ligeramente supercrítico puede ser que el diámetro comercial más grande usado dé un flujo subcrítico. Ese diámetro tendrá que ser reservado a aquellos segmentos que estén siempre llenos de agua.

En este Caso A1 el caudal atravesando la línea de conducción será siempre igual a la producción del manantial cualquiera sea hasta el flujo máximo que habrá elegido. En otras palabras: **en un Caso A1 no necesita estar inquieto por aire en la tubería**, sea cuando la llene o durante el funcionamiento ulterior no importa como varíe el caudal de la fuente.

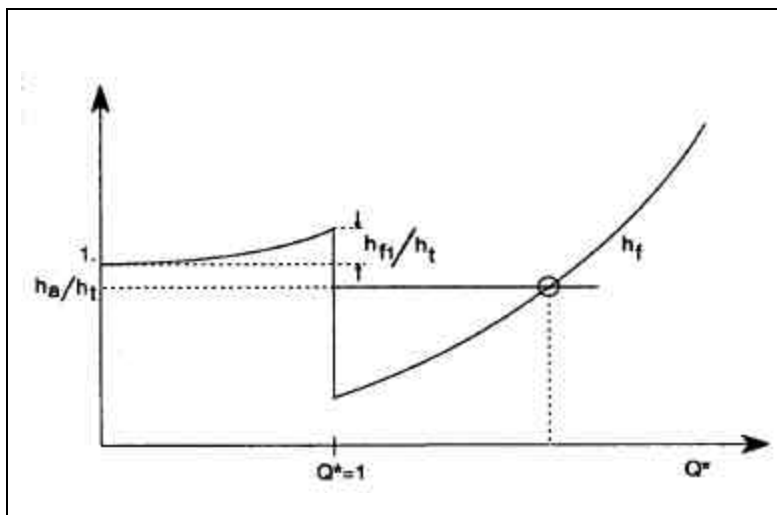


Figure II- 3: Case A2

Si $h_{f1} < h_a < (h_{f1} + h_t)$ es un caso A2

Caso A2:

En este caso (ver la Figura II-3), si logra llegar al caudal supercrítico podrá deshacerse de las bolsas de aire.

Sin embargo, puede ser que se haya acumulado suficiente aire en la tubería para impedir que llegue el caudal a un nivel supercrítico. Recuerde también que en la estación seca el caudal de su fuente puede disminuir de manera que el caudal quede subcrítico. En ese caso una cantidad desconocida de aire quedará dentro de la tubería, posiblemente suficiente aire para impedir cualquier flujo.

Tiene en entonces la posibilidad de escoger entre tres tipos de soluciones:

1) Si sabe si lugar a duda que el caudal del manantial no caerá debajo de cierto nivel Q_{min} , puede instalar donde puedan desarrollarse bolsas de aire tubería suficientemente pequeña para que el flujo sea supercrítico al caudal Q_{min} . **Será necesario también instalar válvulas manuales en los puntos altos para sangrar el aire de la tubería al poner en funcionamiento el sistema de manera a llegar a las velocidades supercríticas.** El diámetro supercrítico se tiene que usar desde el punto alto hasta el punto bajo siguiente. Necesita calcular la pérdida de carga generada en estos tramos para el caudal máximo Q_{max} . Puede ser que se de cuenta que esta pérdida de carga es mayor que la carga disponible. Si esto ocurre, obviamente esta no es la solución adecuada. Si la pérdida de carga en estos tramos al caudal Q_{max} es inferior a la carga disponible la diferencia es la carga todavía disponible para ser gastada por fricción en el resto de la tubería cuyo diámetro puede ahora calcular.

2) Otra opción es de instalar válvulas automáticas saca aire con tramos subcriticos a sus alrededores de manera a disminuir h_t hasta que $h_a > (h_{f1} + h_t)$. Esto nos hace pasar de un Caso A2 a un Caso A1. Tendrá que experimentar un poco en que puntos altos decide instalar las válvulas saca aire de manera a reducir la altura de escurrimiento con el número mínimo de válvulas.

3) Si h_a es solamente ligeramente inferior a $(h_{f1} + h_t)$ y mucho mas grande que h_{f1} puede tratar el caso como si fuera un caso A1 salvo que tendrá que instalar algunas válvulas manuales cercanas a los puntos altos. Esto es posible porque una vez que el aire a sido expulsado de la tubería es poco probable que tanto aire como estaba presente al iniciar el funcionamiento del sistema vuelva a entrar. Digamos para poner un numero a esta estimación que esta solución se puede escoger si:

$$h_a > h_{f1} + 0.8h_t \quad (2d)$$

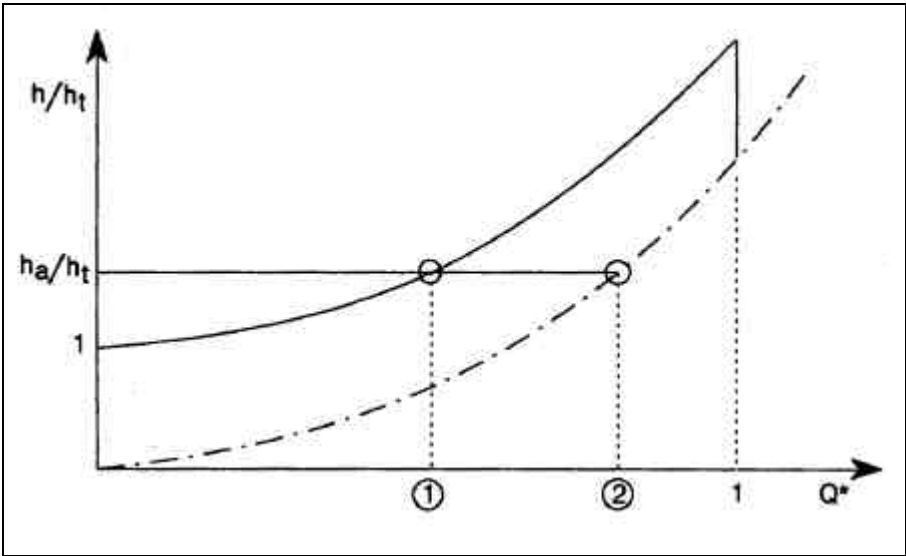
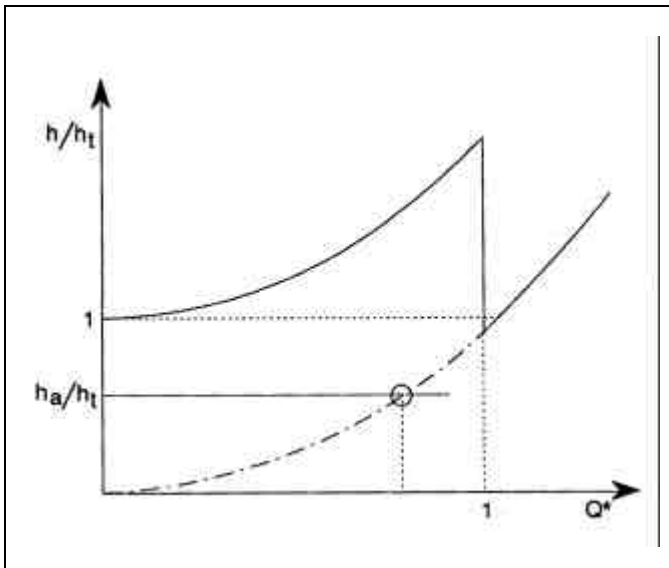


Figura II- 4: Case B with some flow without air valves

Si $h_a < h_{f1}$ es un Caso B

Caso B

En un caso B la pérdida de carga por fricción a la velocidad crítica es mayor que la carga disponible. En este caso, si válvulas puede o no que algo de caudal llegue al tanque, dependiendo de h_i . La solución es idéntica que llegue o no caudal. En un Caso B hay que aceptar de funcionar de manera subcrítica. Como las bolsas de aire no podrán ser evacuadas por la velocidad del agua, cada bolsa de aire genera su propia perdida de carga. Significa que o el caudal esta completamente parado por las bolsas de aire o que se necesita tubería de mayor diámetro para equilibrar las perdidas de carga causadas por el aire. Es entonces casi siempre aconsejado **instalar válvulas automáticas saca aire en cada punto alto**. Los diámetros se escogen entonces equilibrando las perdidas de carga por la tubería cuando el caudal es Q_{max} y la carga disponible. Cuando Q_{max} es solamente ligeramente inferior al caudal crítico es importante asegurarse que en los tramos cercanos a los puntos altos el caudal será subcrítico.



**Figura II- 5: Another version of case B:
There is no flow without air valves.**

CAPITULO III

EJEMPLOS

Los ejemplos siguientes fueron escogidos para ilustrar ciertos puntos del manual. Ejemplos que necesitan cálculos más largos se proponen en la Guía del programa Aire En Tuberías

Nota: en estos ejemplos la topografía completa de las líneas de conducción no se da para simplificar los problemas. Así la altura del punto mas bajo de una bolsa de aire comprimida de cierta cantidad se asume en vez de calcularse como en el programa.

Ejemplo 1 : $h_a > (h_t + h_{f1})$

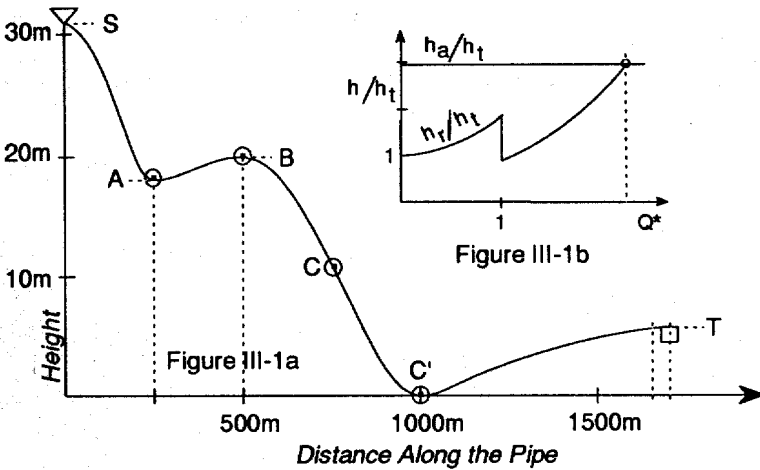


Figura III-1a Caso A1

$L_{ST} = 1700\text{m}$	$L_{SB} = 480\text{m}$	$L_{BC} = 475\text{m}$
$H_S = 31\text{m}$	$H_A = 18\text{m}$	$H_B = 20\text{m}$
$H_C = 0$	$H_T = 6\text{m}$	$Q_{\max} = 0.3 \text{ lit. /sec.}$

Por lo tanto : $h_a = H_S - H_T = 25\text{m}$ y $H_{SB} = 11\text{m}$

Existe un punto local alto en B, así que habrá un soquete con una altura de escurrimiento. Este punto alto está más alto que el siguiente punto con respiradero (Tanque T), así que si quisiera se podría eliminar el soquete diseñando un pequeño estanque para aliviar la presión en B. Siempre debe verificar si es posible hacer esto. Sin embargo, en el caso de este ejemplo, descubrirá que no gana nada al hacerlo.

Calcule la altura de escurrimiento.

Cuando la tubería aguas arriba de B está llena hasta S, la carga estática en B es $H_S - H_B = 11$ m.

Por lo tanto (véase el Apéndice A-II):

$$h_1 = H_S - H_B - 0.0053L_{SB} = 11 - (0.0053 \times 480) = 8.46 \text{ m}$$

Así que el volumen del soquete después de la compresión es

$$10.4 / (10.4 + 8.46) = 0.551$$

veces el volumen antes de la compresión. Si el diámetro de la tubería a lo largo del soquete es uniforme, el largo de éste después de la compresión también será 0,551 veces el largo original. Supongamos que después de descontar el largo $L_{BC} = L_{BC'} \times 0.551 = 262$ m (aguas abajo de B) usted comprueba en el perfil de la tubería que la altura H_C es 11 m. Luego:

$$h_t = H_B - H_C = 9 \text{ m}$$

Observe que h_a es mayor que h_t , así que el agua fluirá cuando llene la tubería por primera vez.

Luego calcule $h_{f1} + h_t$ en forma aproximada :

$$h_{f1} = 0.0053 \times (\text{la larga de la parte de la tubería que está llena}) = 0.0053 \times (1700 - 262) = 7.62 \text{ m}$$

$$\text{de modo que } h_{f1} + h_t = 7.62 + 9 = 16.62 \text{ m.}$$

Así que $h_a = 25$ es mayor que $h_{f1} + h_t = 16.62$.

Así que se trata de un Caso A1. (Figura III-1b).

En este caso usamos la Tabla 1A para determinar d después de haber determinado h_f/L . Calculamos $h_f/L = (h_a/L_{ST})$ donde $h_a = 25$ m, y $L = L_{ST} = 1700$:

$$h_f/L = 25/1700 = 0.0147$$

Ingresamos este valor y el caudal máximo = 0.30 lt/seg. en la Tabla. Comprobamos que para un diámetro de 1" y $Q = 0.30$ lt/seg., $h_f/L = 0.0091$ (menos que la fricción que podemos vencer), pero para $d = 3/4"$ y $Q = 0.30$ lt/seg., $h_f/L = 0.124$ (mucho más que lo que podemos aceptar). Por lo tanto seleccionamos $D = 1"$ y verificamos que esto nos permitirá sacar casi 0.40 lt/seg., si la producción del manantial es suficiente.

Otra opción es usar una combinación de tuberías de $3/4"$ y $1"$ para lograr que el sistema limite el caudal exactamente al máximo especificado. Se debe proceder tal como se indica en el Apéndice A sección 3 :

Con L_1 = largo de tubería de 1" y L_s = largo de tubería de $3/4"$ en la fórmula del apéndice, y $(h_f/L)_s = 0,124$ (el valor para $d = 3/4"$ y $Q = 0.30$ lt/seg. tomado de la tabla), mientras que $(h_f/L)_1 = 0,00909$ (el valor para $d = 1"$ y el mismo Q):

$$L_1 = \{(0.0315 \times 1700) - 25\} / \{0.0315 - 0.00909\} = 1617 \text{ m}$$

$$l_{3/4} = 1700 \text{ m} - 1617 \text{ m} = 83 \text{ m.}$$

Ahora verificamos nuestro cálculo averiguando la pérdida total de carga para un gasto máximo que debería corresponder a la carga disponible:

$$h_f = (83 \text{ m} \times 0.124) + (1617 \text{ m} \times 0.00909) = 24.99 \text{ m}$$

lo que corresponde a nuestro $h_a = 25$ m. Los 83 m de tubería de diámetro más pequeño estarán mejor ubicados aguas abajo de C' para mantener la línea piezométrica lo suficientemente alta hasta el punto B.

En resumen :

Ahora el sistema está diseñado para entregar con seguridad el caudal de agua suministrado por el manantial hasta un máximo de 0.30 lt/seg. No es necesario sangrar las tuberías para evacuar el aire cuando se da el paso al agua inicial en las tuberías vacías.

Ejemplo 2 $h_{f1} < h_a < (h_{f1} + h_t)$

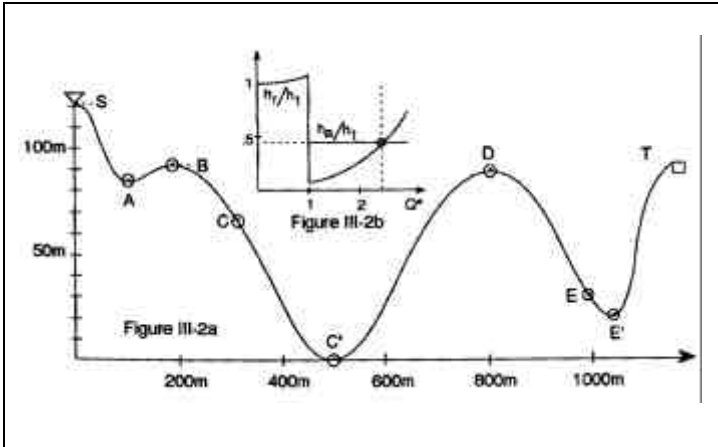


Figura III-2 Caso A-2

$H_S = 121\text{m}$	$H_T = 93$	$H_A = 85\text{m}$
$H_B = 91\text{m}$	$H_{C'} = 0$	$H_D = 89\text{m}$
$H_{E'} = 21\text{m}$	$L_{ST} = 1150\text{m}$	$L_{SB} = 150\text{m}$
$L_{C'D} = 265\text{m}$	$L_{BC'} = 383\text{m}$	$L_{DE'} = 241\text{m}$
$Q_{\min} = 0.14 \text{ lit./sec}$	$Q_{\max} = 0.28 \text{ lit./s.}$	

Por lo tanto :

$$H_a = H_S - H_T = 28\text{m} \quad H_{BC'} = 91\text{m} \quad H_{DE'} = 68\text{m}$$

Lo primero que notamos es que hay dos puntos altos en la línea y que no se pueden eliminar ninguno de los dos instalando un tanque rompe presión visto de los dos están mas bajo que T.

Calculamos entonces la altura de escurrimiento h_t .

Para el soquete entre B y C', la carga en B es:

$$h_1 = H_S - H_B - (0.0053 \times 150\text{m}) = 29.21\text{m}$$

Siguiendo el Apéndice A-II, el ratio de compresión es de:

$$L_{BC} / L_{BC'} = 10.4 / \{10.4 + 29.21\} = 0.263$$

De ahí

$$L_{BC} = 383 \times 0.263 = 100.7\text{m}$$

Sobre el perfil el punto 100.7 m aguas abajo de B se halla a una altura de $H_C = 67$ m

De manera que

$$H_{BC} = (91 - 67) = 24 \text{ m.}$$

Y

$$\begin{aligned} L_{CD} &= L_{CC'} + L_{C'D} = L_{BC'} - L_{BC} + L_{CD} \\ L_{CD} &= (383 - 100.7 + 265) = 547 \text{ m} \end{aligned}$$

Podemos ahora calcular la carga en el siguiente punto, el punto D:

$$\begin{aligned} h_2 &= h_1 + H_C - H_D - 0.0053 L_{CD} \\ h_2 &= (29.1 + 67 - 89 - (0.0053 \times 547)) = 4.2 \text{ m} \end{aligned}$$

El ratio de compresión del volumen en el segundo soquete es entonces:

$$V_{DE} / V_{DE'} = L_{DE} / L_{DE'} = 10.4 / \{10.4 + 4.2\} = 0.712$$

Entonces

$$L_{DE} = 241 \times 0.712 = 172 \text{ m}$$

En el perfil el punto 172 m de D se encuentra a la $H_E = 30$ m

Y

$$H_{DE} = 38 \text{ m, the es la altura del segundo soquete.}$$

La altura de escurrimiento se puede ahora calcular

$$h_t = H_{BC} + H_{DE} = (24 + 38) = 62 \text{ m}$$

Calculemos aproximadamente $h_{fl} + h_t$:

$$\begin{aligned} h_{fl} &= 0.0053 \times (\text{larga de la tubería que está llena}) \\ h_{fl} &= 0.0053 \times (1150 - (100.7 + 172)) = 4.65 \end{aligned}$$

Lo que implica:

$$h_{fl} + h_t = 4.65 + 62 = 66.65 \text{ m}$$

Y

$$(h_{fl} = 4.65) < (h_a = 28) < ((h_t + h_a) = 66.65)$$

Este caso es un caso A2 (ver la Figura III-2b mas arriba).

Comparemos las soluciones mencionadas en el Capitulo II.

a) La solución supercrítica

Seleccionamos primero un diámetro de tubería entre los puntos altos y los puntos bajos siguientes de manera que Q_{\min} quede supercrítico en esos tramos. Usando la ecuación (1c) o la Tabla A-2 vemos que una tubería de 3/4" tiene un caudal critico de $Q_s = 0.133$ lt/seg, un poco menor que nuestro Q_{\min} , y, si confiamos en nuestro Q_{\min} , conveniente en teoría.

Ahora evaluamos la perdida de carga al caudal Q_{\max} por estos tramos de 3/4"

Su larga total es de:

$$L_{BC'} + L_{DE'} = (383 + 241) = 624 \text{ m}$$

Con $d = 0.0235$ m y $Q_{\max} = 0.28$ lt/seg, de la Tabla A-1 de Apéndice A, $h_f/L = 0.0257$ la pérdida de carga en el tramo supercrítico impuesto es de:

$$h_f = 0.0257 \times 624 \text{ m} = 16.0 \text{ m}$$

Esto nos deja la carga siguiente que gastar en el resto de la línea: $h_a - 16.0 = (28 - 16.0) = 12.0$ m

El resto de la línea mide $L_{ST} - 624 = (1150 - 624) = 526$ m.

De ahí la pérdida de carga por metro admisible: $12.0 / 526 = 0.0228$

Como lo acabamos de ver es una carga algo más importante que causa una tubería de 3/4" al caudal máximo.

Usamos el Apéndice A-IV (las ecuaciones A6 y A7) para hallar la combinación correcta de tubería de 3/4" y de 1" que cubra 526 m con una pérdida de carga de precisamente 12 m al caudal Q_{\max} .

Con $Q_{\max} = 0.280$ lt/seg, $h_f/L = 0.0257$ para $d = 0.0235$ m y $h_f/L = 0.00757$ para $d = 0.0304$ m.

Esto implica:

$$L_{1''} = \{526 (0.0257) - 12.0\} / (0.0257 - 0.00757) = 83.7 \text{ m}$$

$$L_{3/4''} = (526 - 83.7) = 442.3 \text{ m}$$

Sin pensarlo, el tramo de diámetro mayor, aquí 1" se debe instalar aguas arriba, justo después del manantial si posible.

Crítica: Esta es una buena solución si:

- No olvida instalar válvulas saca aire manuales en los dos puntos altos para vaciar el aire de la tubería al abrir el flujo.
- Está absolutamente seguro que el caudal no bajará debajo de Q_{\min} .

b) Se convierte a un caso A1 instalando una válvula saca aire automática

No es claro de inmediato si se debe instalar en el primer o en el segundo punto alto, imaginemos que se instala en el primer:

La presión en D es:

$$H_S - H_D - (0.0053 \times (150 + 383 + 265)) = 27.8 \text{ m}$$

Entonces

$$L_{DE}/L_{DE'} = 10.4 / (10.4 + 27.8) = 0.27$$

Y

$$L_{DE} = 65 \text{ m}$$

En el perfil esto pone el punto E en 13.6 m debajo de D. Esta es entonces la nueva altura de escurrimiento h_k . Como $h_k < h_a$ hemos convertido con éxito el caso A2 en un **Caso A1**.

También notamos que si habíamos puesto la válvula saca aire automática en el segundo punto alto D, la altura de escurrimiento hubiera sido de 24 m lo que hubiera permitido la conversión a un caso A2 pero menos confortablemente. Escogemos entonces de instalar la válvula en el punto B.

En caso de no estar seguro de su caudal mínimo la segunda solución se debe escoger.

Ejemplo 3: ¿Y que pasa si no se inquieta uno del aire?

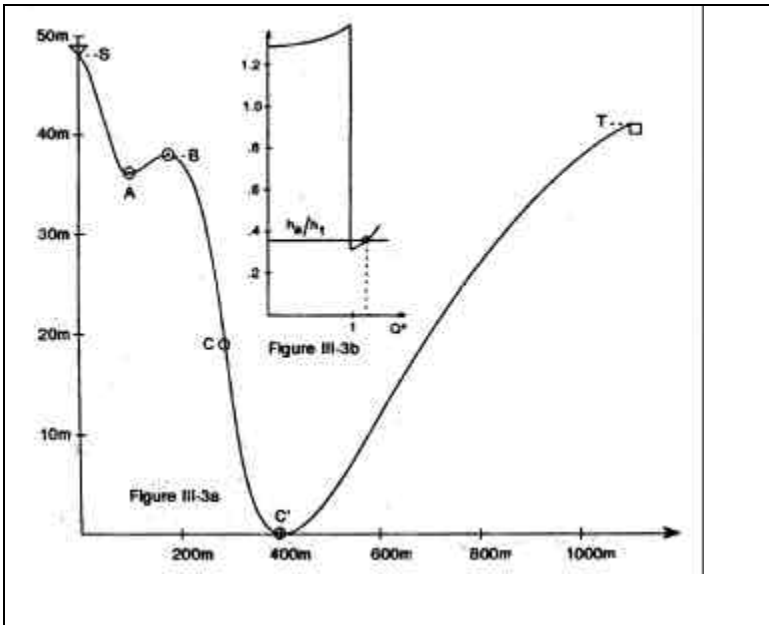


Figura III-3

$H_S = 48\text{m}$	$H_{C'} = 0$	$H_A = 36\text{m}$
$H_B = 38\text{m}$	$H_T = 41\text{m};$	$L_{ST} = 1100\text{m}.$
$L_{SB} = 145\text{m}$	$L_{BC'} = 267\text{m}$	

El caudal necesario y disponible se estima en 15 lt/min.

Aquí primero ignoraremos lo que hemos aprendido mas arriba y diseñaremos sin tomar en cuenta potenciales problemas de aire.

Diseño clásico en base a la fricción: la carga disponible, h_a vale:

$$h_a = H_S - H_T = (48 - 41) = 7 \text{ m}$$

Calculamos la pendiente promedia, h_a / L :

$$h_a / L = 7 / 1100 = 0.00636$$

Este valor es muy cercano al de la pendiente de fricción al caudal deseado (0.25 lt/sec) para un tubo de PVC de 1" SDR 26 (vea la Tabla A1 o haga los cálculos detallados en el apéndice A para una tubería de diámetro de 0.0304m). Si usamos una tubería de 1" de S hasta T y que esta tubería esta llena de agua deberemos poder obtener el caudal que queremos. Además la presión máxima es de 43 m bastante mas baja que la limite de una tubería SDR 26 y no hay presión negativa en ningún lado, una tubería de un solo diámetro parece adecuada.

¿Que tan bien funcionará? Ahora vamos a ver que es lo que pasa si el caudal de la fuente baja debajo de los 15 lt/sec.

Al ver el perfil, notamos que hay un solo punto alto, y que entonces solo podrá haber un soquete de aire. También vemos que no se puede poner un tanque rompe presión en B porque B está mas bajo que el tanque.

Calculamos ahora la altura de escurrimiento, h_t , es decir la altura del soquete de aire cuando se llena la tubería hasta S.

En este caso la carga en B es de:

$$h_1 = H_S - H_B - 0.0053 L_{SB} = 9.23 \text{ m}$$

De ahí

$$L_{BC} / L_{BC} = 10.4 / (10.4 + 9.2) = 0.531$$

Y

$$L_{BC} = 267 \times 0.531 = 142 \text{ m}$$

Medimos en el perfil de la tubería dibujada a escala la distancia BC del soquete después de compresión y obtenemos la altura del punto C. Podría ser $H_C = 19\text{m}$ de manera que:

$$h_t = H_B - H_C = (38 - 19) = 19 \text{ m}$$

Esta altura de escurrimiento potencial es muy grande visto que la carga disponible es de solamente 7 m. Esto causa dos problemas:

Al iniciar la operación del sistema : como h_t es más grande que h_a , probablemente tendrá que sacar el aire del soquete para que agua llegue al punto T. Eso se puede hacer instalando una válvula o un T justo aguas debajo de B. Si se sangra todo el aire el sistema podrá transportar el caudal de diseño siempre que la fuente lo de.

Al operar el sistema: ahora supongamos que el caudal de la fuente baja durante la estación seca. Imaginemos que pasa hasta 13.5 lt/min, o menos. Esta disminución es muy pequeña, de 10% del caudal estimado. Sin embargo esta cantidad es también inferior al caudal crítico Q_s para una tubería de este tamaño visto que $Q_s = 15.2$ l/min para una tubería de 1" (ver la Tabla A-2, Apéndice A). Con un caudal de la fuente inferior tanto al caudal crítico como al caudal de fricción de esa tubería aire en burbujas pequeñas y medianas viajarán desde la captación del manantial hasta el soquete donde se acumulará el aire. Esto es un problema serio.

Por ejemplo, cuando la altura del soquete llega a 1/3 de su altura máxima solo nos queda 0.65 m de carga para vencer la fricción generada por la tubería lo que reduciría el flujo a 0.018 lt/sec (1.00 lt/min) en vez de 15 lt/min. En la realidad si la disminución del caudal ocurre bastante rápidamente se acumulara aire suficiente para completamente bloquear el flujo dentro de la tubería.

Cura (clásica) : puede instalar una válvula saca aire aguas abajo del punto B, esto no es una buena idea para caudales que son supercríticos como se explicó en el Capítulo II, porque este tipo de flujo tiene la tendencia de hacer funcionar el mecanismo de la válvula saca aire de manera muy repetida, lo causa su usura prematura.

Una mejor idea es de :

¡seguir el método descrito en este manual!

La primera etapa, como hemos calculado h_t , es de clasificar el caso.

Siguiendo el método descrito en el Capítulo II y usado en el primer ejemplo, calcularemos h_{f1} :

$$h_{f1} = (1100-142) \times 0.0053 = 5.1 \text{ m}$$

y

$$h_{f1} < h_a < h_{f1} + h_t$$

Reconocemos que este es un **Caso A2** (aunque este muy cercano a un Caso B), vea la figura III-3. La figura pone muy claro, como lo hemos visto, que una pequeña disminución del caudal del manantial puede crear un soquete de aire. Además no conocemos el caudal mínimo de la fuente así que no podemos seguir el consejo dado en el Capítulo II que sugiere imponer $Q_s < Q_{\min}$. Tampoco conocemos Q_{\max} , ¡Así es la vida! Aremos lo mejor que podamos.

Como hemos explicado en la sección del Capítulo II que trata del Caso A2, podríamos escoger un tramo de tubería asegurando un flujo supercrítico en la zona del soquete para un caudal inferior a los 15 l/min deseados. Ya sabemos que una tubería de 1" no nos da margen suficiente. Con un tramo de 3/4" (SDR17 o $d = 0.0235$) podríamos tener un flujo supercrítico hasta

$$Q = 1.57 \times 0.0235^{5/2} = 1.33E-4 \text{ m}^3/\text{sec} = 8.0 \text{ lit/min}$$

aproximadamente la mitad del caudal deseado (ver Ecuación 1d). No sabemos si será suficiente como no conocemos el caudal mínimo del manantial. Si estima que es suficiente (o sea, si de alguna manera esta seguro que el caudal del manantial no caerá debajo de esta cifra) hace lo siguiente:

Se reserva un tramo de ¾" entre B y C' (nota: no C), es decir un tramo de 267 m. Esto consume al caudal deseado de 0.25 lt/sec, (vea la Tabla A-1) una carga de

$$0.0211 \times 267 = 5.63 \text{ m.}$$

Lo que nos deja

$$h_a - 5.63 = (7 - 5.63) = 1.34 \text{ m de carga}$$

a utilizar en los $(1100 - 267) = 833 \text{ m}$ que quedan.

Así que para este tramo:

$$h_f / L = 1.34 / 833 = 0.00164$$

Lo que, siguiendo la tabla, se puede obtener mezclando tubería de 1" y de 1 ½" (ver las ecuaciones A6 y A7).

En resumen : 1100 m de tubería de 1" pipe genera la misma fricción con un caudal de 15 lit/sec que 267 m de tubería de ¾", 97.5 m de 1" y 735.5m de 1.5" así que la nueva combinación nos dará el mismo caudal cuando la tubería esta llena que el diseño original. Sin embargo el nuevo diseño no tendrá problemas con aire hasta que el caudal haya caído debajo de 53% del valor del caudal esperado si los tubos se hallan en los lugares donde se pueden encontrar soquetes de aire.

Todavía es necesario sangrar la tubería cuando se llena, pero una T sencilla que se taponea una vez la tubería llena puede ser suficiente. Los tramos de 1" y de 1.5 " se pueden instalar en cualquier lugar excepto entre B y C'.

El costo adicional de esta modificación es bastante importante.

Solucion alterna y preferida :

En este caso particular (sin conocer el caudal mínimo del manantial) es mas seguro usar una válvula saca aire automática en el punto alto y de forzar un flujo subcritico al inicio del soquete. Para un caudal máximo de 15 lit/min (0.25 lit/sec), la ecuación 2a nos da:

$$d > (Q / 1.19)^{2/5} = 0.0338 \text{ m} \quad (1c)$$

una tubería de 1 ¼" (SDR 26, $d = 0.0389$) seria entonces adecuada. Se instalaría algo antes del punto alto hasta un punto más debajo de la válvula saca aire. Esta se debe instalar en un punto suficientemente más abajo del punto alto para que un error en su localización no haga que se instale la válvula aguas arriba del punto alto (la válvula seria entonces inútil). Recomendaciones para instalar estas y las precauciones que se deben tomar son descritas en el apéndice A-III.

De acuerdo con el Apéndice A-III, vamos a asumir que la larga del tramo de 1-1/4" es de 70 metros. La carga perdida en este tramo al caudal máximo es entonces de (Ecuación A2a):

$$h_f = 70 \times 7.76 \times 10^{-4} (2.5 \times 10^{-4})^{7/4} / 0.0389^{19/4} = 0.13 \text{ m}$$

La carga que queda para el resto de la tubería ($1100 - 70 = 1030$ m) es de

$$(7 - 0.13) = 6.87 \text{ m o } h_f / L = 0.00667,$$

Lo que es casi exactamente la pendiente de fricción de una tubería de 1", SDR26.

Esta solución no es solamente mas segura sino que es también mas barata (no hace falta mucha tubería de 1.5"), pero si necesita una válvula saca aire automática.

Ejemplo 4 :

Este ejemplo se adapto de una situación encontrada cerca de Quolga Khoya, en la región de Cochabamba, Bolivia. Una comunidad de 16 familias tiene agua para lavar y dar de beber al ganado de un canal, pero esta agua no se puede usar para tomar. A un kilómetro de distancia y 4 m encima de un lugar donde se podría instalar un tanque hay una fuente pequeña que nace entre rocas quebradas en una pendiente fuerte. Un canal de tierra con una pendiente muy débil traía el agua hasta en pueblo (cuando la fuente daba mas agua sin duda). Los campesinos han excavado más hondamente el canal y quieren instalar una tubería de PVC en el fondo de la zanja y enterrarlo para proteger el agua y evitar perdidas por infiltración.

Ilustra una consideración practica importante en la construcción de sistemas de agua por gravedad: es fácil sin quererlo introducir puntos altos locales que causan perdidas de carga por aire no previstas. Es un peligro mas presente aún cuando el perfil deseado es casi horizontal y que la carga disponible es pequeña: en este caso los puntos altos locales pueden llegar a ser mas altos que el nivel del manantial...

El caudal del manantial es de aproximadamente 1.5 lit/min. ¿Funcionará el sistema?

En el caso presente empezaremos por calcular la perdida por fricción obtenida con un caudal tan bajo. Incluso con la tubería de PVC la más pequeña fácil de encontrar (la de 1/2") esta perdida es pequeña:

Para un caudal tan bajo la tabla A-1 da para $d = 0.0182$ m, $h_f/L = 0.00126$ o $h_f = 1.2$ m, así que la carga disponible, 4 m, es mas que suficiente para transportarlo.

Pero incluso con ese diámetro pequeño el flujo será siempre subcritico (véase la tabla A-2). Como la zanja sigue un canal, no debe haber puntos altos en el perfil.

Al instalar y enterrar la tubería es probable que los trabajadores no la instalen perfectamente llana. Esto es particularmente cierto para tubería de polietileno que viene en rollos, pero incluso con PVC la tubería puede subir y bajar de 2 o 3 cm en cada tubo. Cada una de estas variaciones, si mayor que el diámetro interno de la tubería (1/2") causará una pequeña altura de escurrimiento, si la acumulación de estas alturas es mayor que 4 m puede ser que no haya flujo por la tubería. El remedio es fastidioso: los trabajadores tienen que asegurarse que en cada lugar la tubería tiene una pendiente cuesta abajo. Esto se puede hacer con un nivel de carpintero o probando la tubería antes de enterrarla. El llenado de la zanja en este caso se tendrá que hacer con mucho cuidado.

Ejemplo 5 :

Asimismo en la construcción misma del sistema, una pequeña desviación del perfil propuesto puede ocasionalmente causar serios problemas. Considere el perfil propuesto (III-5a) y el perfil real (III-5b) inspirados por un caso cerca de Río Blanco, Nicaragua, que se presentan a continuación:

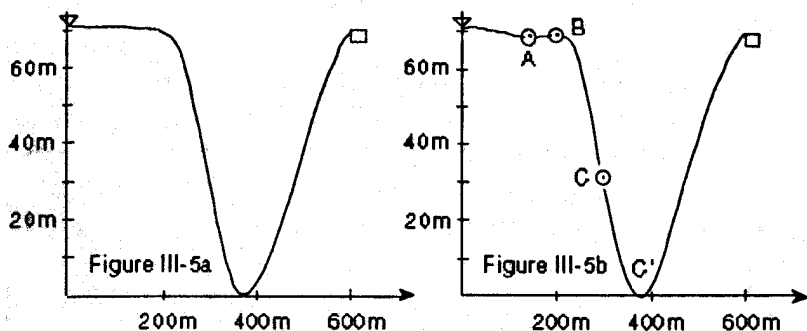


Figura III-5

$$H_S - H_T = 6m$$

$$H_B - H_A = 0.30m$$

$$Q \text{ entre } 8 \text{ y } 18 \text{ lit./min}$$

$$H_S - H_B = 7m$$

$$L = 600m$$

$$H_B - H_{C'} = 70m$$

En el diseño no existe absolutamente ninguna altura de escurrimiento y se ha seleccionado el diámetro de la tubería basado en las pérdidas por fricción. La altura disponible permite una $h_f/L = 6/600 = 0.01$. Para un gasto máximo de $18 \text{ lt/min} = 0.3 \text{ lt/seg.}$, una tubería de 1" (SDR 26) tiene una $h_f/L = 0.00853$. Es, por lo tanto, apropiado y si la construcción se conforma a la figura III-5a, todo saldrá bien. Sin embargo, si el perfil resulta ser como en la figura III-5b (una variación de altura muy pequeña pero difícil de evitar especialmente cuando el manantial está dentro de una quebrada), habrá una altura de escurrimiento considerable; habría que calcular el valor máximo de esta altura de escurrimiento para un perfil especificado entre B y C', pero probablemente sería unos 40 metros - mucho más que la altura de carga disponible. Habiendo esta altura de escurrimiento se puede esperar un bloqueo total, algo que obviamente hay que evitar. En este caso es mucho mejor deshacerse del punto bajo en A que añadir una válvula de aire del tipo flotador más allá de B, porque el sistema opera supercríticamente la mayor parte del tiempo ($Q_c = 15.2 \text{ lt/min}$).

En todo caso, **procure siempre la instalación más sencilla, aquella que requiere la cantidad mínima de partes móviles.**

Ejemplo 6:

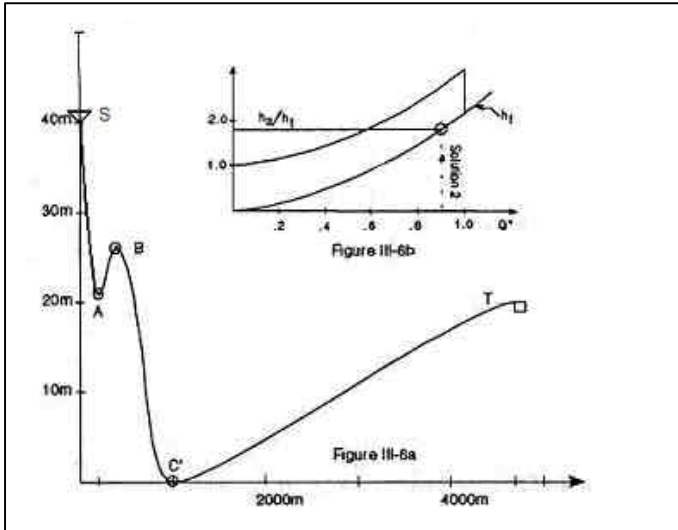


Figura III-6

$H_S = 40\text{m}$	$H_A = 21\text{m}$	$H_{C'} = 0$
$H_T = 20\text{m}$	$H_B = 26\text{m}$	$L_{ST} = 4700\text{m}$
$L_{SB} = 200\text{m}$	$L_{BC'} = 786\text{m}$	
$Q_{\min} = 0.10 \text{ lit./s.}$	$Q_{\max} = 0.217 \text{ lit./s.}$	

This an example for which there are two possible solutions. We will explore them both.

Solución 1: Existe un punto alto (una posibilidad de un soquete) en B. Puesto que B está más alto que el estanque en T podemos deshacernos del problema del soquete colocando un pequeño estanque respiradero. Luego podemos acomodar cualquier gasto hasta el caudal máximo, igualando la altura de carga disponible entre S y B a la pérdida de carga por roce entre estos dos puntos en Q_{\max} , y luego hacer lo mismo para la sección BT.

En el caso de SB, la altura de carga disponible es $H_S - H_B = 14 \text{ m.}$ y la larga es $L_{SB} = 200 \text{ m.}$ Así que la relación de pérdida por fricción máxima es $h_f/L = 14 / 200 = 0,070$. La Tabla A1 da $h_f/L = 0,055$ para $Q = 0,217 \text{ lt/seg.}$ y $d = 1/2"$. Por lo tanto usaremos una tubería de $1/2"$ para esta primera sección.

En el caso de la sección BT, $L_{BT} = 4700 \text{ m} - 200 \text{ m} = 4500 \text{ m}$. y $H_B - H_T = 6 \text{ m}$. Así que la relación de fricción máxima admisible para esta sección es $6 \text{ m} / 4500 \text{ m} = 0.00133$. Según la Tabla A1, para una $Q = 0.217 \text{ lt/seg}$ una tubería de 1" tiene una $h_f/L = 0.0048$ y una tubería de 1.5" tiene una $h_f/L = 0.000898$. Así que necesitamos una mezcla de estos dos diámetros de tubería. Al ir a la Sección A-III averiguamos que:

$$L_{1.5''} = L_t = \{ (0.0048 \times 4500) - 6 \} / (0.00270 - 0.000898) = 3998 \text{ m}$$

$$L_{1''} = L_s = 4500 \text{ m} - 3998 \text{ m} = 502 \text{ m}$$

$$\text{Verificación: } (2697 \times 0.000898) + (1803 \times 0.0048) = 5.999 \text{ m}$$

Resumen de la solución 1: Desde S hasta B, 200 m de tubería de 1/2". Desde B hasta T, en primer lugar 3998 m de tubería de 1.5" y luego 502 m. de tubería de 1". Un tanque rompe presión en B.

La solución 2: Si no se inserta un tanque rompe-presión en B, habrá que tomar en cuenta un soquete después de B.

Calculo de h_t :

$$h_t = H_S - H_B - 0.00568 L_{SB} = 14 - (0.00568 \times 200) = 12.9 \text{ m}$$

$$L_{BC}/L_{BC'} = 10.4/(10.4+12.9) = 0.446$$

así que,

$$L_{BC} = 0.446 \times 786 \text{ m} = 350 \text{ m}.$$

Descubrirá en el perfil de la tubería que la altura del punto C es 14.9 m., de modo que $h_t = 11.1 \text{ m}$.

$$h_a = H_S - H_T = 20 \text{ m}$$

y de la ecuación 2a:

$$h_{f1} = 0.0053 \times (4700 - 350) = 23.05 \text{ m}.$$

De esto obtenemos:

$$h_a/h_t = 1.80$$

$$h_{f1}/h_t = 2.08$$

Así que, h_a es menor que h_{f1} . Se trata de un **Caso B** (Figura III-6b). La pendiente promedio es insuficiente para permitir un flujo supercritico. Es cierto que aun con las perdidas por aire las mas importantes algo de agua fluirá ($h_a > h_t$ lo que significa que h_a es mayor que la perdida de carga por aire con caudales mas pequeños) pero es una mala idea diseñar su sistema sin sacarle el aire por dos razones :

- 1) como no sabe cuanto aire estará en el sistema en un momento dado no puede disenar de manera que sepa el caudal maximo que permite la tuberia.
- 2) para equilibrar la perdida de carga por aire se tendrían que utilizar tubos de diámetro mayor, implicando un costo mas importante.

Al menos de que no tenga la posibilidad de instalar una válvula saca-aire automática, instalará una en B, escogerá una tubería de diámetro tal que asegure un flujo subcritico en los alrededores de la válvula saca-aire, y diseñará a partir de las perdidas de carga con Q_{max} .

Digamos que se determina por la ecuación 2b que el diámetro subcritico es :

$$d > 0.933 Q_{\max}^{2/5}$$

$$d > 0.933(0.000217^{2/5}) = 0.0342 \text{ m}$$

queda esta condición satisfecha con una tubería de 1.5" (0.0446). Si determina a partir del apéndice A-III que este tramo de tubería mide 60 m de largo, consumirá en Q_{\max} , según la tabla A-1 la carga siguiente :

$$h_f = 0.000898 \times 60 = 0.05 \text{ m}$$

Esto nos deja un h_a de $(20.0 - 0.05 =) 19.95 \text{ m}$ sobre una distancia de $(4700 - 60 =) 4640 \text{ m}$. O sea

$$h_a / L = 19.95 / 4640$$

$$h_a / L = 0.00430$$

Lo que se logra con una combinación de tubería de 1" y de 1.5".

Con $Q_{\max} = 0.217 \text{ lit./sec}$, como hemos visto, h_f / L es de 0.0048 para una tubería de 1" y es de 0.000898 para una tubería de 1.5". La buena combinación de estas tuberías sería entonces, siguiendo el Apéndice A-IV:

$$L_I = L_{1.5"} = ((0.0048 \times 4640) - 19.95) / (0.0048 - 0.000898) = 595 \text{ m}$$

$$L_S = L_{1"} = (4640 - 595) = 4045 \text{ m}$$

$$\text{Verificación: } (4045 \times 0.0048) + (595 \times 0.000898) = 19.95 \text{ m.}$$

Resumen de la solución 2 : con una válvula saca aire en el punto B el flujo máximo requerido se obtiene con 60 m de tubería de 1.5" alrededor de la válvula, 595 m mas de tubería de 1.5" y 4045 m de tubería de 1". Con la excepción de los 60 m de tubería de 1.5" alrededor de la válvula saca-aire el orden de la instalación de la tubería no es importante en este caso particular porque la línea de gradiente hidráulico queda siempre por encima del perfil de la tubería. Habitualmente se instala la tubería de mayor diámetro aguas arriba.

Las dos soluciones están resumidas mas abajo :

Diámetro	Solución 1	Solución 2
1/2'	200m	0
1"	502m	4045m
1.5"	3998m	655m
Accesorio necesario	Tanque rompe presión	A Válvula saca-aire

De este resumen se ve que la solución 2 sería la más barata: combina un costo en tubería mucho más pequeño con el costo de una válvula saca-aire, generalmente inferior al de un tanque rompe-presión. Su desventaja es que necesita un accesorio con partes móviles.

Ejemplo 7: Para nuestro último ejemplo usamos el mismo perfil que en el Ejemplo 6, pero elevamos la altura del tanque final T a 31 m. Al hacer esto sólo cambia h_a . Nos quedamos con :

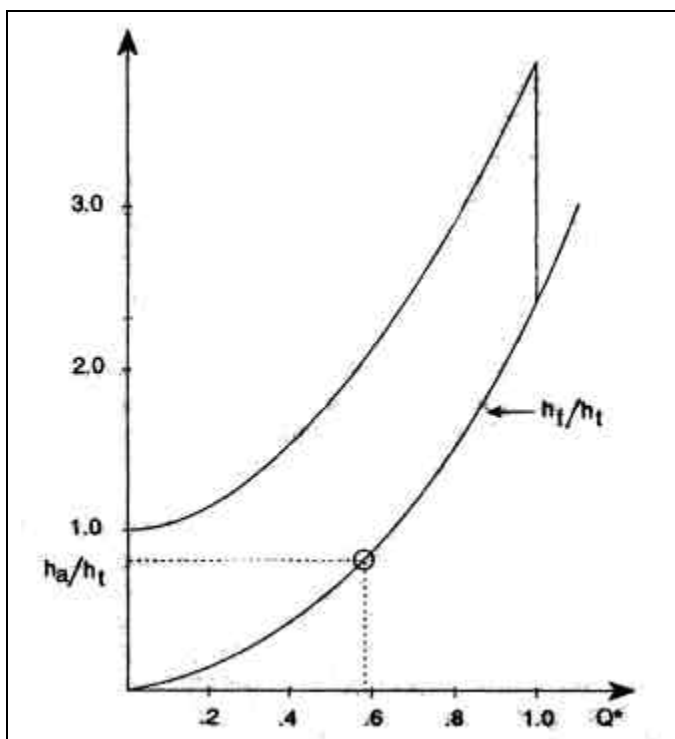


Figura III-7

$$h_a = 9\text{m} \quad h_t = 12.9\text{m} \quad h_{f1} = 24.71\text{m}$$

Observe que ahora T está más alto que B, de modo que ya no se puede usar la solución 1 del ejemplo anterior. Puesto que h_a es menor que h_t y también menor que h_{f1} , se trata de un Caso B (Figura III-7). Esto significa que tenemos que usar una válvula saca-aire para sangrar el aire en B y que evaluamos:

$$h_f/L = h_a / L_{ST} = 9 / 4700 = 0.00191$$

Para $Q = Q_{\max} = 0.15 \text{ lt/seg.}$, la Tabla A1 nos da:

$$h_f/L = 0.00254 \text{ para } d = 1'' \text{ y } h_f/L = 0.00041 \text{ para } d = 1,5''$$

Así que, según el Apéndice A-IV:

$$L_{1.5''} = L_1 = \{(0.00254 \times 4700) - 9\} / (0.00254 - 0.00041) = 1379 \text{ m}$$

$$L_{1''} = L_S = 4700 - 1379 = 3321 \text{ m}$$

$$\text{Verificación: } 1379 \times 0.00041 + (3321 \times 0.00254) = 9 \text{ m}$$

APENDICE A

A-I: RESUMEN DE FORMULAS Y TABLAS PARA CALCULOS HIDRAULICOS CONVENCIONALES (Tubería Llena) EN TUBERIAS

Se pueden aplicar donde no existen soquetes de aire estacionarios. No se producirán soquetes de aire estacionarios si:

- No existe ningún punto máximo local sin respiradero en el perfil de la tubería
- O la tubería funciona llena
- O la tubería funciona con un gasto Q mayor que el caudal critico Q_c

Una excepción: Si la línea piezométrica localmente esta ubicada lo suficientemente por debajo de la cota de la tubería como para causar cavitación (8 a 9 metros), no habrá aire allí si no vapor de agua y además una gran cantidad de cheques y golpes causados por la desintegración y deformación de las burbujas de vapor. Esto dañara la tubería y debe evitarse. La ecuación básica para una tubería simple (sin bifurcaciones) entre un punto 1 aguas arriba y un punto 2 aguas abajo es:

$$.0826Q^2/d_1^4 + h_1 + H_1 = .0826Q^2/d_2^4 + h_2 + H_2 + h_{f12} \quad (A1)$$

En esta ecuación, h corresponde a la carga de presión en unidades de metro; (la carga de presión es la presión sobre la presión atmosférica dividida por el peso de un metro cúbico de agua), H corresponde a la altura de la tubería en un punto determinado (con referencia a un plano de referencia fijo), y h_{f12} corresponde a la perdida de carga por fricción entre un punto 1 y un punto 2. El caudal Q esta en m^3 y el diámetro d en metros.

Una línea piezométrica es una línea que plotea la altura de la suma ($h + H$) como una función de posición a lo largo de la tubería. Normalmente también se plotea la altura H de la tubería en el mismo grafico. En principio debería haber una línea mas, la línea de energía, cuya altura representa la suma de los tres términos de la ecuación. Sin embargo, para los efectos de diseños de agua potable, el primer termino a la izquierda de cada lado de la ecuación es bastante pequeño comparado con los otros, de manera que la línea piezométrica y la línea de energía son casi iguales. Esto se debe a que la velocidad recomendada para sistemas de agua potable no supera los 3 m/s. Esto se traduce en una diferencia maxima entre los niveles de la línea piezométrica y la línea de energía de 50 CMS. Esto dista mucho de ser verdad en el caso de tuberías hacia y desde bombas y turbinas, así como también en el caso de tubos en carga, y en esos casos siempre se debe mostrar la línea de energía.

Puesto que la altura de la tubería es H , el espaciamiento vertical entre la línea piezométrica y la altura de la tubería corresponde a la carga de presión h . Si la línea piezométrica cae por debajo de la altura de la tubería, la carga de presión será negativa (es decir, menos que la presión atmosférica).

Donde el tubo esta ventilado (manantial, estanque ventilado, estanque de distribución), la línea piezométrica y el perfil de la tubería tendrán la misma altura.

La línea de energía, así como también en nuestro caso la línea piezométrica, siempre disminuyen en dirección aguas abajo porque h_f siempre corresponde a una perdida de carga.

Se empieza a calcular la línea piezométrica en el estanque del manantial. En ese punto, debido a que el manantial se encuentra desventada (presión manométrica = 0), la altura de la línea piezométrica corresponde a la altura del estanque. Aguas abajo del manantial su **pendiente es** la h_f pertinente al caudal el tamaño de la tubería en la sección bajo consideración (véase las tablas de perdida de carga por fricción que se presentan a continuación). Así que, en el caso de un gasto determinado y una tubería sin bifurcaciones, la pendiente no cambiara a menos que cambie el diámetro de la tubería. El caudal que usted escoge para dibujar la línea piezométrica depende por supuesto del uso que usted le va a dar. Por ejemplo, si va a verificar presiones manométricas negativas, usara el valor mas alto de Q que espera encontrar.

Perdidas por fricción: En vez de la Tabla A1, usted puede usar la siguiente ecuación para calcular h_f o para determinar la línea piezométrica, dados los valores de d & Q y no existiendo ningún soquete de aire:

$$h_f/L = 7,76 \times 10^{-4} Q^{7/4} / d^{19/4} \quad (A2a)$$

Si en cambio sabe los valores de Q y h_a , puede obtener d de:

$$d = 0,222 Q^{7/19} (h_f/L)^{-4/19} \quad (A2b)$$

Y si sabe los valores de h_a y d, puede obtener Q de:

$$Q = 59,9 (h_f/L)^{4/7} d^{19/7} \quad (A2c)$$

Donde Q esta en $m^3/\text{seg.}$ y d en metros.

Se uso la ecuación (A2a) para calcular h_f/L en las tablas A1 que se encuentran en las paginas a continuación.

Para su conveniencia se reproducen a continuación las ecuaciones 3 y 4 del Capitulo II, las ecuaciones aproximativas que se usaron para clasificar los casos:

$$h_f/h_t = 0,00568 Q^{*2} (L/h_t) \quad (A3)$$

$$h_n/h_t = 0,00568 L/h_t \quad (A4)$$

El largo L aquí no incluye el largo de los soquetes.

Nota: Los diámetros interiores presumidos en el Capítulo III y en las tablas son los siguientes:

d nominal	SDR	Diámetro (m)
1/2"	13	0.0182
3/4"	17	0.0235
1,0"	26	0.0304
2,0"	26	0.0557
2,5"	26	0.0674
3,0"	26	0.0821

La Tabla A-1 fue preparada usando la ecuación A-2. Se puede usar en vez de A-2.

TABLA A-1: PERDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN

d = 1/2" = 0.0173m		d = 3/4" = 0.0231m		d = 1" = 0.0300m	
Q, l/s	h_f/L	Q, l/s	h_f/L	Q, l/s	h_f/L
0.010	.000323	0.01	.000082	0.03	.00016
0.015	.000657	0.02	.000275	0.05	.00040
0.020	.00109	0.03	.00056	0.075	.00080
0.025	.00161	0.05	.00137	0.10	.00133
0.030	.00221	0.075	.00278	0.125	.00196
0.040	.00365	0.10	.00460	0.150	.00270
0.050	.00540	0.125	.00680	0.175	.00353
0.075	.0101	0.150	.00936	0.200	.00447
0.100	.0182	0.175	.0122	0.225	.00550
0.125	.0268	0.20	.0158	0.250	.00661
0.150	.0309	0.225	.0190	0.275	.00780
0.175	.0483	0.250	.0229	0.300	.00909
0.200	.0611	0.275	.0270	0.325	.0105
0.225	.0751	0.300	.0315	0.350	.0119
0.250	.0903	0.325	.0362	0.375	.0134
0.275	.106	0.350	.0412	0.400	.0150
0.300	.124	0.375	.0465	0.425	.0167
0.325	.143	0.400	.0521	0.450	.0185
0.350	.163	0.425	.0579	0.475	.0203
0.375	.184	0.450	.0640	0.500	.0222
0.400	.205	0.475	.0703	0.525	.0242
0.425	.228	0.500	.0769	0.550	.0263
0.450	.252	0.525	.0837	0.575	.0284
0.475	.278	0.550	.0909	0.600	.0306
0.500	.303	0.575	.0982	0.625	.0328
0.525	.330	0.600	.106	0.650	.0352
0.550	.359	0.625	.114	0.675	.0376
0.575	.388	0.650	.122	0.700	.0400
0.600	.418	0.675	.130	0.725	.0426
		0.700	.139	0.750	.0452
		0.725	.147	0.775	.0478
		0.750	.156	0.800	.0506
		0.800	.175	0.825	.0534
		0.825	.185	0.850	.0562
		0.850	.195	0.875	.0592

TABLA A-1: PERDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN
(continuación)

d = 1" = 0.0300m (cont.)		d = 1.5" = 0.0444m		d = 1.5" = 0.0444m	
Q, l/sec	h_f/L	Q, l/sec	h_f/L	Q, l/sec	h_f/L
0.900	.0622	0.10	.00021	1.90	.0357
0.925	.0652	0.15	.00042	1.95	.0374
0.950	.0684	0.20	.00069	2.00	.0390
0.975	.0715	0.25	.00102	2.05	.0408
1.000	.0748	0.30	.00141	2.10	.0425
1.025	.0780	0.35	.00185	2.15	.0443
1.050	.0814	0.40	.00234	2.20	.0461
1.075	.0848	0.45	.00287	2.30	.0499
1.10	.0883	0.50	.00345	2.40	.0537
1.125	.0918	0.55	.00408	2.50	.0577
1.15	.0954	0.60	.00475	2.60	.0618
1.175	.0991	0.65	.00546	2.70	.0660
1.20	.103	0.70	.00621	2.80	.0704
1.25	.110	0.75	.00702	2.90	.0748
1.30	.118	0.80	.00786	3.00	.0794
1.35	.126	0.85	.00873	3.10	.0841
1.40	.134	0.90	.00965	3.20	.0889
1.45	.143	0.95	.0106	3.30	.0938
1.50	.152	1.00	.0116	3.40	.0988
1.55	.161	1.05	.0126	3.50	.104
1.60	.170	1.10	.0137	3.60	.109
1.65	.180	1.15	.0148	3.70	.115
1.70	.189	1.20	.0160	3.80	.120
1.75	.199	1.25	.0172	4.00	.131
1.80	.209	1.30	.0184	4.20	.143
1.85	.219	1.35	.0196	4.40	.155
1.90	.230	1.40	.0209	4.60	.168
1.95	.240	1.45	.0222	4.80	.181
2.0	.251	1.50	.0236	5.00	.194
2.1	.274	1.55	.0250	5.20	.208
2.2	.297	1.60	.0264	5.40	.222
2.3	.321	1.65	.0279	5.60	.237
2.4	.346	1.70	.0294	5.80	.252
2.5	.371	1.75	.0309	6.00	.267
2.6	.398	1.80	.0324	6.20	.283
2.7	.425	1.85	.0341	6.40	.299

TABLA A-1: PERDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN
(continuación)

d = 2.0" = .0557m		d = 2.0" = .0557m		d = 2.5" = .0674m	
Q, l/sec	h _f /L	Q, l/sec	h _f /L	Q, l/sec	h _f /L
0.2	.000236	2.90	.0255	0.40	.000322
0.25	.000300	3.00	.0270	0.50	.000475
0.30	.000481	3.20	.0303	0.60	.000654
0.35	.000630	3.40	.0337	0.70	.000856
0.40	.000796	3.60	.0372	0.80	.00108
0.45	.000978	3.80	.0409	0.90	.00133
0.50	.00118	4.00	.0447	1.00	.00160
0.55	.00139	4.20	.0487	1.10	.00189
0.60	.00162	4.40	.0529	1.20	.00220
0.65	.00186	4.60	.0571	1.30	.00253
0.70	.00212	4.80	.0615	1.40	.00288
0.75	.00239	5.00	.0661	1.50	.00325
0.80	.00268	5.20	.0708	1.60	.00364
0.85	.00298			1.70	.00404
0.90	.00329			1.80	.00447
.0.95	.00361			1.90	.00492
1.00	.00395			2.00	.00538
1.10	.00467			2.10	.00586
1.20	.00544			2.20	.00635
1.30	.00626			2.30	.00687
1.40	.00712			2.40	.00740
1.50	.00804			2.50	.00794
1.60	.00900			2.60	.00851
1.70	.0100			2.70	.00909
1.80	.0111			2.80	.00969
1.90	.0122			2.90	.0103
2.00	.0133			3.00	.0109
2.10	.0145			3.20	.0122
2.20	.0157			3.40	.0136
2.30	.0170			3.60	.0150
2.40	.0183			3.80	.0165
2.50	.0196			4.00	.0180
2.60	.0210			4.20	.0197
2.70	.0225			4.40	.0214
2.80	.0240			4.60	.0231
				4.80	.0249

TABLA A-1: PERDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN
(continuación)

d = 2.5" = .0674m.		d = 2.5" = .0674m		d = 3.0" = .0820m	
Q, l/sec	h _f /L	Q, l/sec	h _f /L	Q, l/sec.	h _f /L
5.0	.0267	9.8	.0868	0.50	.000187
5.2	.0286	10.0	.0899	0.75	.000380
5.4	.0305	10.5	.0979	1.00	.000628
5.6	.0326	11.0	.106	1.25	.000930
5.8	.0347	11.5	.115	1.50	.00128
6.0	.0368	12.0	.124	1.75	.00167
6.2	.0389	12.5	.133	2.00	.00211
6.4	.0412	13.0	.142	2.25	.00260
6.6	.0434	13.5	.152	2.50	.00312
6.8	.0458	14.0	.162	2.75	.00369
7.0	.0482	15.0	.183	3.00	.00430
7.2	.0506	16.0	.205	3.25	.00494
7.4.	.0531	17.0	.228	3.50	.00563
7.6	.0556	18.0	.251	3.75	.00635
7.8	.0582	19.0	.276	4.00	.00711
8.0	.0608	20.0	.302	4.25	.00791
8.2	.0636	21.0	.329	4.50	.00874
8.4.	.0662	22.0	.357	4.75	.00960
8.6	.0690			5.00	.0105
8.8	.0719			5.25	.0114
9.0	.0748			5.50	.0124
9.2	.0777			5.75	.0134
9.4	.0807			6.00	.0145
9.6	.0837			6.25	.0155

TABLA A-1: PERDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN
(continuación)

d = 3" = .0821m		d = 3" = .0821m		d = 3" = .0821m	
Q, l/sec	h _f /L	Q, l/sec	h _f /L	Q, l/sec	h _f /L
6.50	.0166	12.00	.0486	18.00	.0988
6.75	.0178	12.50	.0522	18.50	.103
7.00	.0189	13.00	.0559	19.00	.109
7.50	.0214	13.50	.0597	20.00	.119
8.00	.0239	14.00	.0637	21.00	.129
8.50	.0266	14.50	.0677	22.00	.140
9.00	.0293	15.00	.0718	23.00	.152
9.50	.0323	15.50	.0761	24.00	.164
10.00	.0353	16.00	.0804	25.00	.176
10.50	.0385	16.50	.0849	26.00	.188
11.00	.0418	17.00	.0894	27.00	.201
11.50	.0451	17.50	.0941	28.00	.214

Corrección en el caso de diámetros de tuberías levemente diferentes.

Las pérdidas de carga por fricción varían considerablemente según el diámetro de la tubería. Por ejemplo, en el caso de la tubería de 1", si se hubiera usado su diámetro nominal, 1" = 0,0254m, en vez del diámetro S.D.R. 26 de 0,0300m, con, digamos, $Q = 0,8 \text{ lt/seg.}$, la ecuación A2 nos enseña que h_f/L habría sido 0,111 en vez de 0,0506 (¡el doble!). Así que, hasta las tuberías del mismo diámetro nominal pero de diferentes grosores tienen diferentes pérdidas de carga por fricción, y de vez en cuando quizás querrá hacer la corrección necesaria. Obviamente puede usar el diámetro correcto en la ecuación A2a. Pero, si no cuenta con la calculadora de bolsillo apropiada para eso, podrá corregir la Tabla A1 de la siguiente manera: Digamos que d_t corresponde al diámetro de la tubería que se da en la tabla y h_{ft} a la pérdida de carga correspondiente a un gasto determinado. Para un diámetro real d al mismo caudal, la pérdida de carga corregida se obtiene mediante:

$$h_f = (h_{ft}) \times \{1 + 4,75(d_t - d)/d_t\} \quad (A5)$$

Observe que la tubería de diámetro mas pequeño produce la mayor pérdida de carga. No debe usar esta formula para diámetros de tubería que varían en mas del 10% comparados con los de las tablas. En el caso de una variación de 5% en el diámetro, se da la corrección con un 3% de exactitud, y en el caso de una variación de 10% en el diámetro, la corrección se da con un 11 % de exactitud.

La Línea Piezométrica con un Soquete. La línea piezométrica se ve diferente cuando hay un soquete estacionario (véase la figura A-2). Esto se debe al hecho de que la presión no cambia a lo largo del soquete. Desde el punto alto donde comienza el soquete hasta el final del soquete, la línea piezométrica corre paralela **al perfil del tubo**, permaneciendo a una altura sobre el punto alto cuyo valor en metros es igual al valor de h en ese punto. La distancia vertical entre la línea piezométrica y el perfil de la tubería permanece invariable hasta llegar a la sección donde nuevamente se encuentra llena la tubería. Aguas abajo del soquete, donde la tubería esta llena, la pendiente de la línea piezométrica vuelve a ser igual que el valor local de h_f/L .

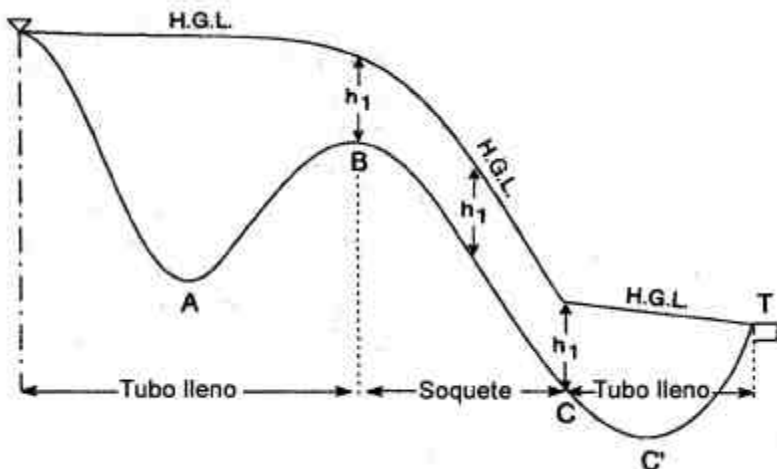


Figura A-2

A-II Como combinar diámetros de tuberías para obtener una pérdida de carga por fricción determinada para un largo determinado y con un caudal determinado.

Que la pérdida requerida sea h_a y que el largo sea L . Divida la una por la otra para obtener h_g/L . Digamos que por alguna razón usted ya ha seleccionado uno de los diámetros de la tubería, pero que es demasiado pequeño como para ser usado para todo el largo L de la tubería. Llamemos ese diámetro d_s y la pérdida por fricción correspondiente por largo unitario $(h_f/L)_s$. Para el valor requerido de Q , busque en la tabla A-1 un diámetro d , que produce una h_f/L que sea menor que h_g/L . Llamemos ese valor de la tabla $(h_f/L)_l$. Los dos largos de tubería que juntos serán igual a L y producirán una pérdida de carga por fricción igual a h_g se averiguan por medio de:

$$L_l = \{L(h_f/L)_s - h_a\} / \{(h_f/L)_s - (h_f/L)_l\} \quad (A\ 4)$$

$$L_s = L - L_l \quad (A\ 5)$$

donde L , es el largo de la tubería de diámetro mas grande y menor roce y L_s es el largo del tubo de diámetro mas pequeño y mayor roce.

Nota: El diámetro mas grande de tubería no necesariamente debe ser el tamaño inmediatamente superior al diámetro mas pequeño. Por ejemplo, si $d_s = 3/4"$, d_l puede ser 1,5" en vez de 1".

A-III: Válvulas saca-aire y selección de tubería cerca de los puntos altos

1) Forzar el flujo a ser subcritico cerca de una válvula

Cuando se decide instalar una válvula saca-aire "en" un punto alto de una línea de conducción las consideraciones siguientes se deben tomar en cuenta:

- a) La válvula debe operara en una zona de flujo subcritico de manera a sangrar el aire que acumula lentamente si las reacciones bruscas

a burbujas de aire llevadas aguas abajo por un flujo que sería supercrítico. El diámetro de la tubería en la que se instala la válvula debe ser entonces suficiente para permitir un flujo subcrítico al caudal máximo Q_{\max} . Prácticamente significa que este tramo debe empezar aguas arriba de la válvula y terminar aguas abajo: un par de largas de tubo es probablemente suficiente.

- b) La válvula debe estar imperativamente aguas abajo del punto alto (PA). Si esta aguas arriba como el soquete de aire para a mas o menos un diámetro del PA la válvula no sangrará nada de aire.
- c) La formación continua de una bolsa de aire en un flujo de aire – el soquete – es posible únicamente aguas abajo pero iniciando desde una sección horizontal de tubería. Si el tramo de tubería “subcrítica” esta aguas abajo del PA no habrá tramo horizontal de tubería de este diámetro, el soquete será estable y puede ser que no llegue a la válvula. Es entonces necesario que el tramo subcrítico de tubería atravesie el PA.
- d) Finalmente si precauciones particulares es fácil hacer un error sobre la localización del punto alto de la tubería enterrada que es diferente del punto alto del terreno superficial medido. Primeramente las variaciones en la altura de un punto alto son por definición de segundo orden con respecto a la distancia desde el punto alto así que una variación de altura errónea equivalente a un diámetro de tubería puede ocurrir en un tramo de 12 m o mas de línea. Segundo el perfil de la tubería en el fondo de la zanja puede ser diferente del perfil del terreno superficial de suficientes centímetros para inducir importantes errores en la localización del PA.

Las precauciones particulares incluyen:

- 1) Al hacer la topografía de la línea varios puntos deben ser medidos cercanos al punto alto para que se pueda establecer este con una precisión suficiente (digamos con un error de altura inferior a 7 cm). El punto alto debe ser marcado en ese momento con una estaca permanente y mencionado de manera especial en el cuaderno de medidas.
- 2) Cuando se excava la zanja el técnico encargado del trabajo debe saber de que tipo de punto alto se necesita en el diseño (subcrítico o supercrítico). Para casos subcriticos debe obligar al equipo de excavación de marcar una distancia de 10 m de cada lado del punto alto y de excavar la zanja de manera a dejar el punto alto sin ambigüedades (empezando con una zanja de 1 m de profundidad, llevándola a 60 cm de profundidad en el punto alto para luego llevarla de nuevo a 1 m de profundidad, por ejemplo.

Así que vistos los puntos a), b) y c) el inicio del tramo subcrítico debe ser a un tubo de distancia del PA (6 m), la válvula se debe instalar 3 m aguas abajo del PA y el final del tramo subcrítico debe estar a de 6 a 12 m mas abajo aun

2) Forzar un flujo supercrítico aguas abajo de un punto alto

Si se necesita forzar un flujo supercritico aguas abajo de u punto alto para impedir la presencia de un soquete de aire estático menos precauciones se deben tomar. Como no se instalarán válvulas saca-aire no importa si el tramo supercritico empieza aguas arriba o aguas abajo del punto alto. En el segundo caso solo una pequeña bolsa de aire de mínima altura podrá existir. Por otro lado, el final aguas abajo del tramo supercritico no debe coincidir con el final del potencial soquete de aire, debe extenderse hasta el punto bajo siguiente. La razón se da en el Apendice B-III.

APENDICE B

B-I: Por que esta el volumen del soquete en proporción inversa a su presión absoluta?

Esto no sucede de inmediato. A medida que la presión en el soquete aumenta, el volumen disminuye, sin embargo, al principio menos de lo que predice la formula porque la temperatura del aire aumenta (inicialmente la compresión es casi **isentrópica**). Después de un tiempo el aire en la tubería se enfría al sufrir una perdida de calor por la tubería y la tierra en la zanja, de modo que a la larga su temperatura llega a ser la misma que antes de la compresión. Es solo entonces que el volumen de aire se comporta conforme a la ley que se presenta en el Apéndice A-II. Así, con aquellos casos 1 y 3 que se acercan a los casos 2 y 4, quizás tenga que esperar un poco para que saiga agua por la boca de salida de la tubería.

B-II: Una Alternativa para Las Válvulas de Alivio Automáticas:

No se puede sacar el aire de un soquete en forma permanente perforando un pequeño agujero en el tapón de una T?

A falta de una válvula de alivio automática, es una tentación perforar un agujero en el tapón plástico de una T, por ejemplo, porque dicho agujero permitirá escapar mucho mas aire que agua. Sin duda que esta solución simplificaría las cosas. El problema que tiene, sin embargo, es que, en una instalación típica, el agujero debe ser bastante pequeño para no desperdiciar una cantidad excesiva de agua. Así que hay que hacerlo con cuidado, y el agujero tiende a taparse.

La relación entre el diámetro d , el caudal Q de agua por el agujero y la carga h_1 en la tubería en el lugar del agujero es aproximadamente (esta formula no es muy exacta en el caso de agujeros muy pequeños):

$$d = 0.56 Q^{1/2} / h^{1/4}$$

donde el diámetro del agujero esta en metros, el caudal en m^3/s y la carga en metros. Un agujero del mismo tamaño dejara pasar un volumen de aire aproximadamente 28 veces mas grande. No influye mucho si se hace el agujero en la parte inferior o superior de la tubería.

Ahora bien, si por ejemplo queremos que se derrame no mas que el 3% del caudal de agua por la tubería, la tubería traslada 15 l/min. de agua y la carga en el soquete es 10 metros, obtendremos lo siguiente para el diámetro del agujero:

$$d = 0,56 \times \{15 \times 0,03 / 60 \times 10^{-3}\}^{1/2} \times 10^{-1/4} = 0,00086m = 0,86mm$$

Este valor corresponde a dos tercios del grosor de un clip o de una punta de 1", y un agujero con un diámetro el doble de grande desperdiciara cuatro veces la cantidad de agua.

Así que, puede ser que esta solución sea útil de vez en cuando pero me preocupa la tierra o la materia vegetal que pueden llegar a tapar el agujero. Por lo general no he tenido mucha fortuna en cuanto a que los

pequeños agujeros dejen pasar una cantidad fiable de agua y no se tapen por completo.

B-III: Mas acerca de cambiar el diámetro en la zona del soquete.

a) Cuando el diseño requiere que se instale en el soquete una tubería de diámetro mas pequeño que en otras partes, este manual recomienda que la tubería de diámetro mas pequeño se extienda al punto bajo mas bien que solamente hasta el final del soquete. Por que?

A medida que Q aumenta y supera a Q_c , la parte superior del soquete se mueve por la sección en declive aguas abajo del punto alto. Pero no es expulsada de la sección en declive repentinamente. Esto se debe a que, en el caso de ángulos moderados de la tubería, el caudal que se requiere para expulsar el bolsón de aire en dirección aguas abajo, primero aumenta con la pendiente (desde el plano horizontal hasta aproximadamente 35 grados) y luego disminuye. Para expulsar el soquete de una tubería horizontal se necesita el mismo gasto que se necesita para expulsarlo de una tubería que tiene una pendiente en declive de unos 65 grados. Como consecuencia, si se aumenta el diámetro de la tubería entre C y C' para un gasto que es supercrítico en relación al diámetro mas pequeño, pero subcrítico en relación al diámetro mas grande, es de esperar que el soquete quede atrapado en la sección donde el diámetro cambia, a menos que esa sección este ubicada en el fondo de la tubería.

b) Puesta en marcha: Observe que se puede ayudar con los problemas de la puesta en marcha escogiendo en las partes mas bajas de las secciones como BC' un diámetro **mas pequeño** que en las partes mas altas, porque, al hacerlo, la carga de compresión h_1 acorta el soquete inicial más que cuando existe un diámetro uniforme (l/l' entonces será más pequeño que v/v' en el calculo de la altura de escurrimiento. Sin embargo, también se debe tomar en cuenta el efecto que puede tener este cambio de diámetro en la operación constante y regular del sistema después de la puesta en marcha, así que es muy raro que se pueda usar este truco. En todo caso, realmente no se necesita.

B-IV: En el Calculo de la Altura de Escurrimiento, la Presión es Negativa en el Segundo (o Tercer) Punto Alto:

Esto puede suceder si dichos puntos están muy altos. Si la presión negativa que se calcula supera los 9m., el agua no fluirá porque la presión baja convertirá el agua en vapor de agua. En el caso de presiones negativas pequeñas (digamos que menos de 5 metros), la aspiración en la tubería no detendrá necesariamente el flujo del agua. El largo del soquete siguiente no aumentara (lo que quizás se supondría al llevar a cabo el paso 5) porque todo el aire mas allá del soquete, es decir aguas abajo del punto bajo, escapara hasta el siguiente soquete o hasta la boca de salida. Así que E y E' son el mismo punto. Sin embargo, no recomiendo el diseño de un caso tan marginal: **Evite presiones manométricas negativas en todas partes.**

B-V: Como Controlo la Velocidad de Agua en la Tubería?

Normalmente se aconseja mantener la velocidad de agua entre 0,7 m/s y 3,0 m/s. La razón es que si la velocidad es demasiado baja la tierra será depositada en la tubería, especialmente en los puntos bajos, y finalmente

terminara" tapando la tubería, y si la velocidad es demasiado alto esa misma tierra correrá la tubería. Normalmente es fácil impedir que el agua supere el límite superior recomendado. Pero, para mantenerla sobre el límite inferior, a menudo tendrá que renunciara otros aspectos, normalmente mas cruciales. Por ejemplo, puede suceder que no tenga carga suficiente para mantener dicha velocidad. [Observe en la Tabla A-3 que en el caso de tuberías de diámetros hasta 3" **todos** los gastos subcríticos caen por debajo del límite inferior recomendado]. La situación se parece un poco a aquella con la cual nos enfrentamos en los Diez Mandamientos: hacemos lo mejor que podemos, pero a veces pecamos; luego expíanoslo. Por ejemplo, si una sección corta de la tubería pasa por debajo de un riachuelo, normalmente usted puede darse el lujo de poner una tubería de diámetro lo suficientemente pequeño para mantener una velocidad alta en ese tramo corto. Sin embargo, si luego una sección bastante larga de la tubería sube, tendrá que expiar de nuevo: tendrá que asegurar que antes de llegar a la pila de captación el agua de la fuente pase por un filtro de grava extra grueso.

B-VI: No se puede operar con la tubería llena todo el tiempo simplemente añadiendo una válvula reguladora a la entrada del tanque de distribución?

Luego simplemente habría que purgar el aire en forma manual y ajustar la válvula a la producción de la fuente.

¡Esto suena fabuloso y haría innecesaria la lectura de este manual tan complicado! Sin embargo, si hace la prueba, comprobara que toma **días** dar con el ajuste correcto para la válvula. Así que el campesino simplemente cerrara la válvula lo suficiente como para salir de apuros y la fuente rebalsara la mayor parte del tiempo.

B-VII: De donde proviene la ecuación (1) en la pagina 12?

Se trata de un resultado experimental que es lo suficientemente preciso para ser usado en la practica y con algo de apoyo teórico. Puede ser que su origen solo sea de interés para expertos hidráulicos, pero sin embargo se presenta a continuación.

A) Obviamente se puede aplicar la ecuación a los bolsones de aire que son **largos** en comparación con la sección horizontal de la tubería, y no a burbujas como las que se encuentran en los niveles de agua. En estos últimos casos, $Q_c = 0$, pero h_t es insignificante así que no son importantes.

B) En términos completamente generales debemos escribir: donde el numero a depende de:

- la tensión superficial del agua (el numero Weber $16Q^2/\pi^2 d^3 \gamma$), y posiblemente el ángulo de contacto.
- el perfil de velocidad (el numero Reynolds, $4Q/\pi \nu$), donde γ = la tensión superficial y ν = la viscosidad cinemática.
- la distribución de la pendiente de la tubería en la boca del soquete.

Ahora bien:

1) En el caso de un flujo de líquido no viscoso con una tensión superficial insignificante y una tubería horizontal, teóricamente se puede calcular la velocidad de la propagación del frente de un soquete semi-infinito en una tubería redonda llena de agua (estando estancada el agua delante del soquete).

Esto produce lo siguiente (véase Brook Benjamin, Journal of Fluid Mechanics, 1968, vol. 31, paginas 209-248):

$$Q_c = 0,426d^{5/2}g^{1/2}$$

2) El caso real por supuesto es diferente porque:

- es el agua la que fluye y el soquete no se mueve.
- el agua es un líquido viscoso y su velocidad aguas arriba del soquete no es uniforme por todo el ancho de la tubería. Existe cierta (pequeña) tensión superficial entre el agua y el aire en el límite agua-aire cerca del frente del soquete.
- Se quiere expulsar el soquete no solamente de los puntos altos sino también más allá de los siguientes puntos bajos; así que, la carga del soquete deberá pasar por secciones inclinadas de la tubería.

3) Experimentalmente, pero siempre tratándose de una sección horizontal de la tubería con números Weber y Reynolds típicos y con el agua fluyendo, el caudal critico (el caudal para el cual un soquete permanece estacionario) es aproximadamente:

$$Q_c = 0,38d^{5/2}g^{1/2}$$

Si Q es menor, el soquete se moverá aguas arriba (sin embargo, esto nunca sucederá si la sección de tubería aguas arriba está a una altura más baja), y si Q es mayor, se moverá aguas abajo (pero no necesariamente si la tubería aguas abajo está a una altura más baja).

4) Por último, también experimentalmente, Q_c empieza a aumentar primero a medida que la pendiente en declive de la tubería aumenta desde el plano horizontal a un punto máximo de aproximadamente 35 grados, y luego disminuye a medida que la pendiente sigue aumentando más allá de los 35 grados. (Véase también B-III). El valor de la constante que se escogió, $a = 0,5$, es un poco mayor que el valor que se necesita en la ecuación (1) para expulsar el soquete de una tubería con la peor pendiente (35 grados) en algún lugar del soquete. Si la pendiente máxima aguas abajo del punto alto es pequeña (digamos 5610 grados), esta constante S es un poco grande.

Los resultados experimentales a los que se hace referencia más arriba son todos míos.

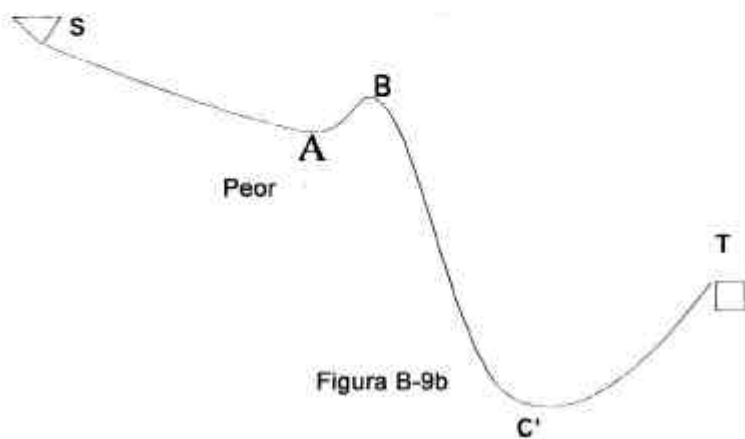
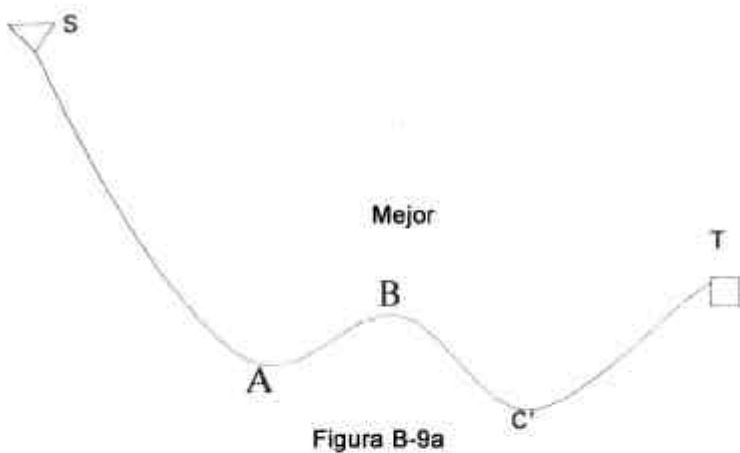
B-VIII: Hay modos sencillos de escoger un perfil que empeequeñezca las perdidas por soquetes?

Por supuesto. Además, a menudo estas alternativas son variaciones menores de un perfil ya seleccionado.

Hay cuatro reglas, aun que la primera casi nunca se puede seguir.

1) Primero, busque un perfil de zanja que no tiene ningún punto alto.

2) Si no puede, empezando con el manantial, el primero punto alto (siguiendo el primero punto bajo) tiene que ubicarse lo mas bajo que pueda ser. Por ejemplo el perfil de la figura B-9-a es mucho mejor que el de la figura B-9-b aun que los niveles del manantial S, del estanque T y del segundo punto bajo C' son igual en las do figuras. El nivel del primero punto bajo, A, no importa.



3) Siguiendo, aguas abajo del segundo punto bajo, (después del primero punto alto) el perfil debería subir lo menos que pueda ser. Véase figura B-9-c.

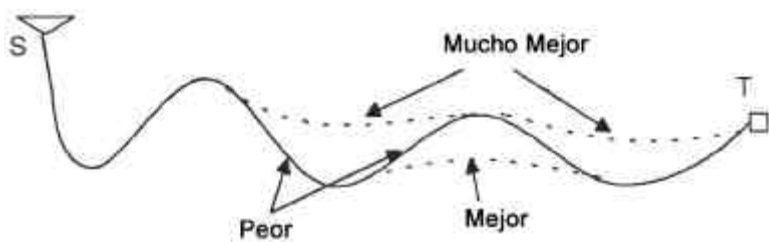


Figura B-9c

4) Entre un punto alto y el próximo punto bajo escoja un perfil en que la altura se pierda lo mas cerca del punto bajo que pueda ser: Véase Figura B-9-d, donde perfil 1 es mucho mejor que perfil 2 si punto B es bastante mas bajo que S.

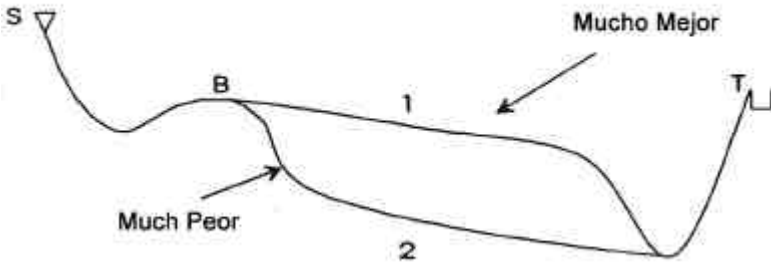


Figura B-9d