

## ASPECTOS GENERALES DEL DIMENSIONADO DE ACUEDUCTOS

Como sistemas de abastecimiento de agua nos referimos a las obras necesarias para proveer de agua a poblaciones, industrias, eventualmente riego, o combinaciones de éstas que planteen satisfacer una demanda para lo cual la obra principal resulte un acueducto más todos las obras accesorias que se requieran para cubrir las condiciones operativas.

Las fuentes de agua pueden ser diversas, un río es una fuente común de abastecimiento de agua, otras fuentes suelen ser los grandes lagos, aguas subterráneas, etc.

El río como fuente de agua puede resultar de abastecimiento directo, esto en general se refiere a caudales de provisión menores o igual al mínimo del río, ya que es el que puede ser satisfecho durante un porcentaje importante del tiempo ( $Q \leq Q_{\text{mín}} 100\%$  de garantía). Estos caudales se pueden proveer con la sola interposición de una obra de toma lateral o flotante.

Si se pretende garantizar un caudal mayor que el mínimo, el río deberá ser regularizado, es decir, contar con un embalse que permita garantizar un caudal mayor que el mínimo con una garantía preestablecida.

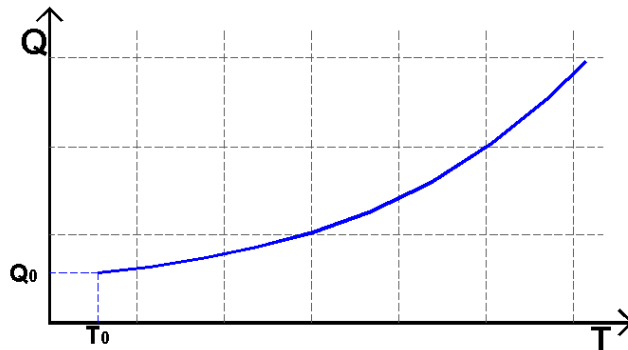
Esto en lo que se refiere a la fuente de provisión de agua. Por otro lado se deberán conocer los consumos. Estos variarán según sea abastecimiento de agua potable para uso humano, abastecimiento para industrias -y en este caso según qué tipo de industrias-, riego, etc. Los requerimientos podrán ser uno de los mencionados o varios simultáneamente conformando un requerimiento múltiple.

En general las demandas de agua para consumo humano son las que justifican y requieren de grandes acueductos, por tal motivo estas notas se orientan a dicho consumo. Las otras demandas presentan algunos condicionamientos que le son propios pero pueden ser resueltos siguiendo los lineamientos generales que aquí se aplican.

Los consumos de agua potable para poblaciones cuyo comportamiento demográfico se encuentra en expansión siguen una evolución equivalente con el transcurso de los años.

Es usual que el caudal medio diario del consumo vaya incrementándose como muestra el gráfico adjunto.

Si analizamos consumos de riego o los industriales, su variabilidad es mas indeterminada, pues ambos se encuentran ligados a parámetros de difícil predicción.



El agua para uso industrial que representa como consumo global de agua un alto porcentaje en los países desarrollados, pero considerablemente menor en los países en vías de desarrollo, manifiesta un crecimiento incierto con el tiempo. Básicamente su evolución está ligada al aumento de la producción del producto de la industria.

Para determinar el caudal de diseño de un acueducto se puede considerar que el mismo debe operar con el caudal máximo de la demanda que deba abastecer.

Cuando los acueductos deben funcionar con caudales con demandas variables en el tiempo y que presenten valores diferenciales importantes se deben realizar verificaciones o adaptaciones en los modos de operación para caudales intermedios.

Definido un caudal de diseño se deberán estudiar las dimensiones de la obra conducción (Acueducto), excluyendo de este análisis la fuente de provisión de agua, que supera las notas referidas al diseño del acueducto.

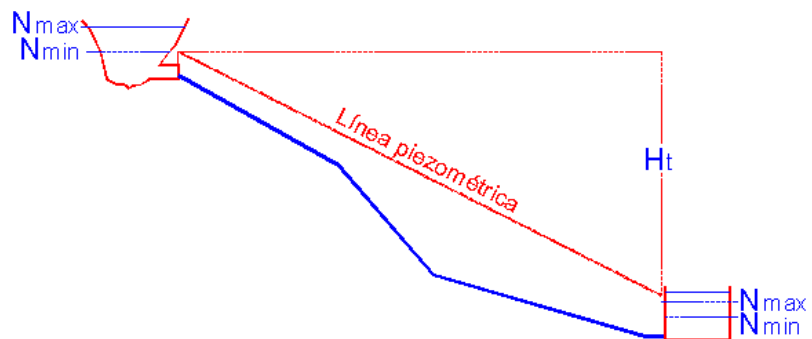
La dimensión principal de un acueducto es el diámetro de la conducción y el espesor de la misma.

Para su determinación se debe separar el análisis en dos grandes grupos claramente diferenciados:

1. Que el acueducto (o el tramo considerado) realice la conducción del agua por gravedad.
2. Que el caudal sea impulsado por una bomba o un sistema de bombeo

En el primer caso, el agua en su fuente de provisión se encuentra a una cota superior a la que le corresponde al lugar de entrega y la misma se puede conducir sin la incorporación de energía adicional.

En este caso la diferencia topográfica entre el nivel mínimo disponible en la toma de agua y el nivel máximo del cuerpo receptor,  $H_T$ , dan la mínima energía por unidad de peso disponible para trasladar el agua en el acueducto. En general el proyectista se podrá tomar una revancha en la cota de llegada, la que se descontará de  $H_T$ .



Es decir para el cálculo  $H_T$  es la energía total disponible.

Dicha energía será disipada en su totalidad por lo que la ecuación elemental a proponer es :

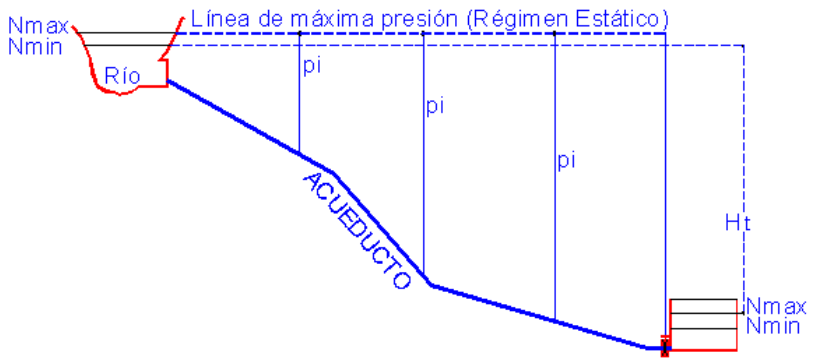
$$J = \left[ k_e + k_d + f \frac{L}{D} \right] \frac{U^2}{2g}$$

Teniendo en cuenta que:  $J = H_T$  ;  $U = \frac{Q}{\Omega}$  y  $\Omega = \frac{\pi D^2}{4}$  se tiene:

$$D = 2 \sqrt[4]{\frac{Q}{\pi} \sqrt{\frac{k_e + k_d + fL/D}{2g H_T}}}$$

Con este diámetro queda determinada la conducción hasta el centro de consumo, (esto se cumple mientras el acueducto mantenga el diámetro).

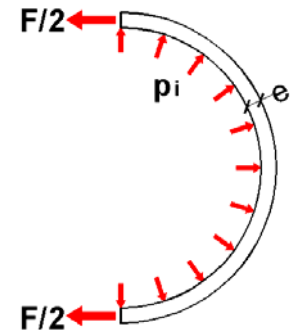
Por cuestiones vinculadas a los transitorios hidráulicos y a los problemas que genera el aire dentro de la tubería en este tipo de conducciones, lo indicado es que la variación del caudal, ya sea para un cambio de operación o para un cierre del mismo, se realice mediante una válvula ubicada en su extremo de aguas abajo.



En estas condiciones, cuando el acueducto esté en régimen estático se darán los mayores esfuerzos sobre las secciones de la tubería, por lo que inicialmente este es el estado que se debe considerar para dimensionar los espesores del material de la tubería que deberá soportar la carga estructural de la presión interna que le ejerce el agua.

Si aislamos una sección cualquiera del acueducto, tendremos la siguiente configuración de esfuerzos:

En esta sección, el acueducto cuya sección tiene un diámetro  $D$  se encontrará sometido a una presión interna  $p_i$ , por lo tanto se tendrá el siguiente esquema de fuerzas, donde la fuerza  $F$  genera una tensión de tracción  $\sigma$  tal que:



$$\frac{F}{2} \left[ \frac{kg}{m} \right] = \sigma [kg / cm^2] \Omega [cm^2]$$

Donde el área por unidad de longitud es el espesor;

$$\Omega = e$$

La fuerza  $F$  que actúa en el cilindro superior, calculada por unidad de longitud del acueducto, es:  
 $F = p_i D$

Igualando las fuerzas y despejando el espesor, obtenemos:  $e = \frac{p_i D}{2\sigma}$

Con esta expresión podemos determinar el espesor de la tubería para cada tipo de material ( $\sigma$ , define la tensión admisible de tracción para cada tipo de material).

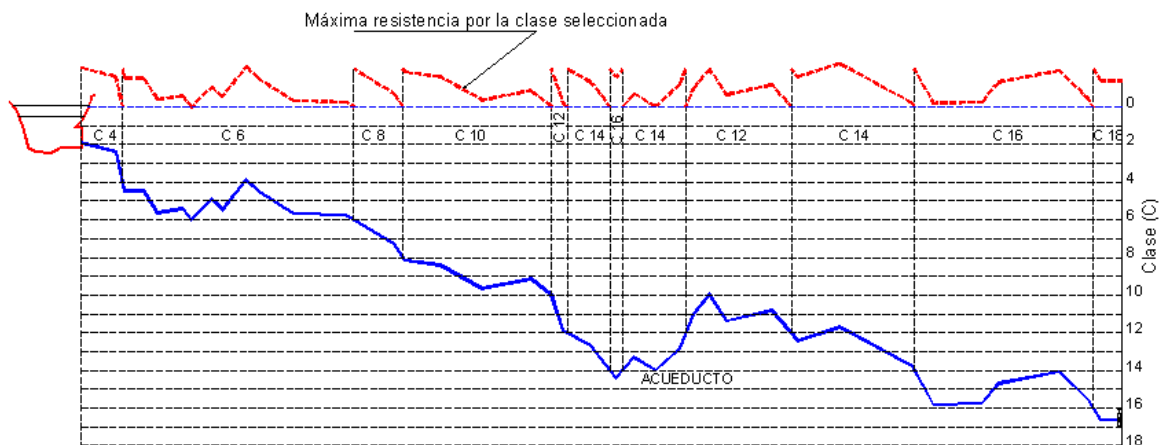
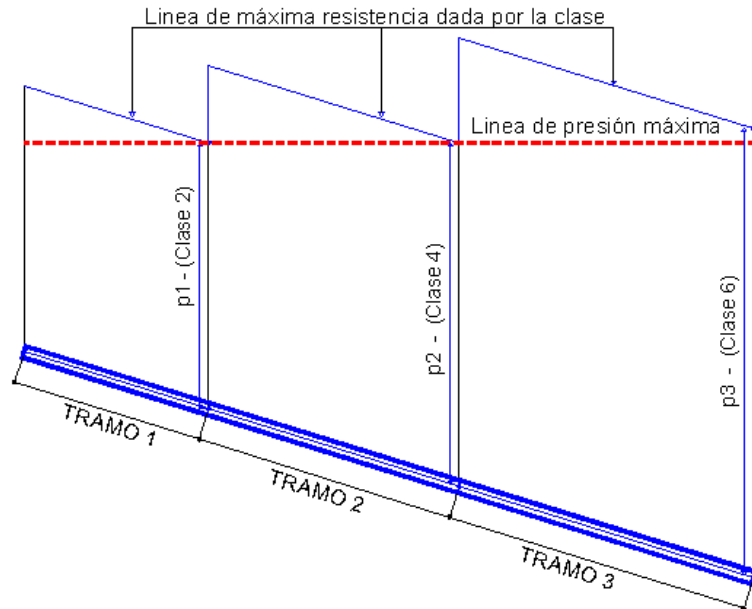
Como el espesor cambia con la presión, si la tubería tiene una cierta inclinación el espesor sería variable en cada punto. El espesor variable punto a punto resulta impracticable para cualquier tipo de material, por lo tanto el problema se trata saltos discretos de la resistencia. Para esto se utiliza el concepto de **clase** de la tubería que define la presión de trabajo a que puede ser sometido el acueducto.

La clase de las tuberías dependen de las normas que se utilicen, y estas a su vez de del tipo de material.

En general **clase 2** significa que la tubería puede trabajar con una presión interna de hasta 2 kg/cm<sup>2</sup>. Así se definen, clase 4 ( 4 kg/cm<sup>2</sup>), clase 6 (6 kg/cm<sup>2</sup>), etc. Las normas, tendientes a optimizar toda la construcción de las tuberías, indican clases con números discretos, por ejemplo 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, etc.

Con esta discretización se subdivide la tubería en tramos donde cada uno de ellos queda definido por la clase. Esto se muestra en el gráfico adjunto.

En general (y por problemas que se verán más adelante), los acueductos tienen trazas con quiebres en el plano vertical, por lo tanto las clases se deberán seleccionar teniendo algún algoritmo que permita identificar las presión de trabajo, quedando soluciones como las indicadas en el siguiente esquema:

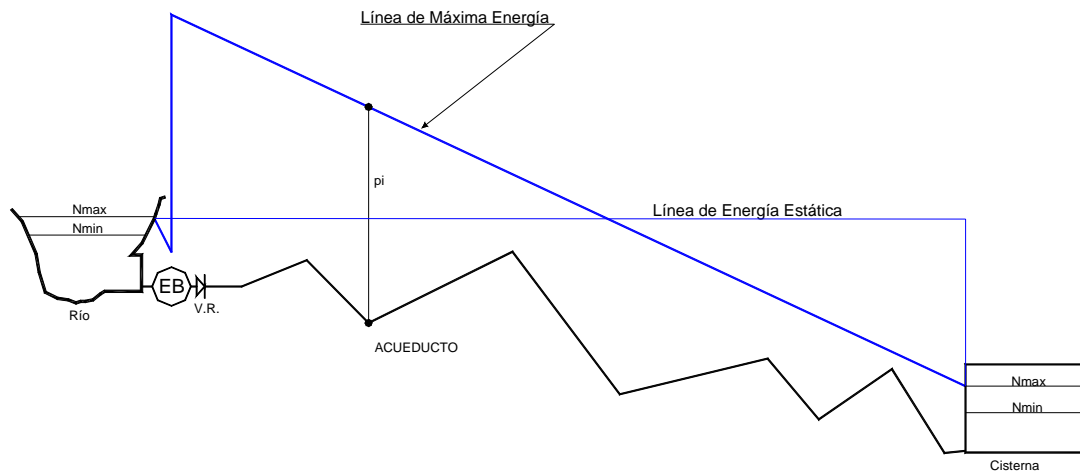
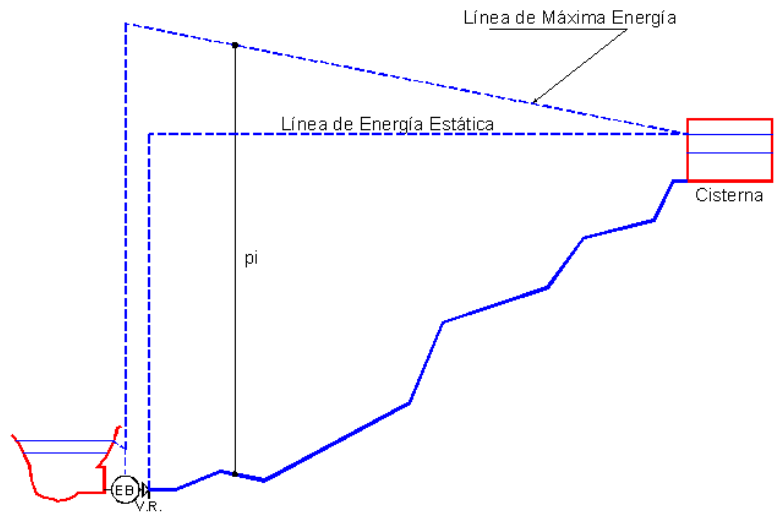


En los acueductos (o tramos de estos), donde opera una estación de bombeo, las mayores solicitaciones se producen cuando las bombas impulsan el máximo caudal de bombeo, ya que esto significa la mayor pérdida de energía a vencer. Esto es así aún en los casos en que el acueducto tenga un bombeo con el fin de incrementar el caudal máximo que escurre por gravedad por la tubería.

En estos casos se combinan la línea de energía debida al bombeo del caudal máximo con la línea de energía estática, que en algunos tramos, presenta la mayor sollicitación. Para el trazado de la línea de presión estática, o de reposo, se debe siempre recordar que los órganos de cierre deben asegurar que el acueducto no se vacíe.

Como se puede apreciar en la definición de las clases de las tuberías, la topografía del lugar es de influencia determinante ya que define los estados posibles de operación del acueducto además del valor de la altura.

Cuando se trata de acueductos con impulsión por bombeo, la clase, (que define el espesor en tramos discretos), y el diámetro, resultan contrapuestos a la hora de su selección.



Por una parte el aumento del diámetro disminuye las pérdidas de carga. Por otra parte, el aumento del diámetro tiene dos implicancias, el cambio el espesor y el volumen de material de la tubería. Este cambio en principio sería de mayor costo pues está aumentando no solo la cantidad de material sino a su vez el ancho de excavación de la zanja donde se va a colocar. El aumento del diámetro significa menores pérdidas de energía y por lo tanto la bomba debe impulsar el agua a una presión menor traduciéndose esto en una presión interna menor y consecuentemente menor espesor.

La altura de impulsión y el caudal a bombear por el acueducto permiten obtener la potencia de la bomba.

$$P = \frac{g H_u Q}{\eta}$$

siendo  $H_u$  [m] el salto útil de la bomba,  $Q$  el caudal expresado en [m<sup>3</sup>/s],  $g$  la aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>] y  $\eta$  [-] el rendimiento de la bomba conjuntamente con el del motor. Con estas unidades la potencia eléctrica se expresa en kW. Esta potencia por unidad de tiempo nos permite calcular la energía eléctrica que debe consumir el sistema de bombeo.

$$E [kWh] = \sum P [kW] \text{ Tiempo [hs]}$$

La energía que hay que suministrarle a la bomba tiene una tarifa (\$/kWh), de manera que cuanto mayor es la energía que consume, mayor es el costo de operación del sistema. Por lo tanto el aumento de diámetro trae implícita una disminución en el costo de operación del sistema.

El costo de operación, en un año será:

$$\text{Costo}_1 = P [kW] \times 24h \times 365 \times Fu \times \text{Tarifa} \left[ \frac{\$}{kWh} \right]$$

donde  $Fu$  es el factor de utilización del sistema de bombeo.

Si escribimos esto en función del diámetro, tenemos:

$$H_u = H_T + J \quad \text{donde:} \quad J = f \frac{L}{D} \frac{Q^2}{\Omega^2 2g} \quad \text{y por lo tanto:} \quad J = f \frac{L}{D} \frac{Q^2 16}{D^4 \pi^2 2g} \quad \text{resultando:}$$

$$J = K \frac{Q^2}{D^5} \quad \text{pudiéndose expresar la potencia como:} \quad P = \frac{g}{\eta} Q \left( H_T + K \frac{Q^2}{D^5} \right)$$

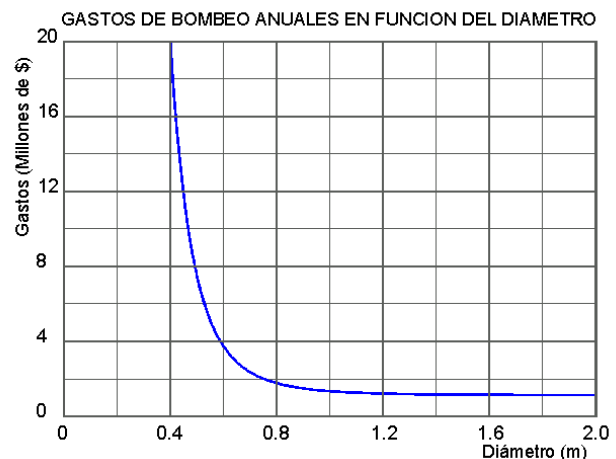
Con lo cual el costo anual de operación del sistema solamente por el gasto de energía, en función del diámetro seleccionado, es:

$$\text{Costo}_1 = \frac{g}{\eta} Q \left( H_T + K \frac{Q^2}{D^5} \right) [kW] \times Fu \times 24 [h / dia] \times 365 [días / año] \times \text{Tarifa} [\$ / kWh]$$

Para un caudal dado, la variación del costo anual de bombeo según el diámetro de tubería seleccionado, tendrá una variación como la mostrada en el gráfico adjunto.

Este costo actuará en todos los años que el acueducto opere. Si suponemos que operará

con el mismo caudal y tiempo de utilización el valor de los costos de los años siguientes se deberán llevar al tiempo cero, (o al que elijamos como comparación), que se obtiene de la siguiente manera:



$$\text{Costo}_{\text{ACTUALIZADO DE OPERACION}} = \text{Costo}_1 \frac{(1+i)^E - 1}{(1+i)^{C+E} \times i}$$

donde  $i$  es el interés del capital,  $E$  el número de años de operación del acueducto (por ej 20 años),  $C$  es el periodo de construcción de la obra, y el  $\text{Costo}_1$  el costo de operación anual del sistema.

Si en los años de operación el caudal va cambiando, o se modifica el tiempo de utilización, esto se tendrá en cuenta considerando distintos **Costos** que se pueden expresar como:

$$\text{Costo}_{\text{ACTUALIZADO DE OPERACION}} = \sum_{i=1}^n \text{Costo}_i \frac{(1+i)^{E_i} - 1}{(1+i)^{C+\sum E_i} \times i}$$

El otro costo que se debe tener en cuenta es el de inversión inicial que básicamente está compuesto por los siguientes elementos:

- Costo de la tubería ( $C_T$ ) (función del diámetro, espesor, material).
- Costo de instalación de la tubería ( $C_I$ ) (estos costos están referidos a la excavación de la zanja y al relleno de la misma).
- Costo de la instalación de bombeo ( $C_B$ ) (fundamentalmente función de la potencia total instalada, algunos autores lo dan como función de la altura).

Para observar la forma en que están relacionadas estas variables supondremos que la tubería es diseñada para una misma presión en toda su longitud.

Con respecto al costo de la tubería,  $C_T$ , en general todos los materiales tienen un precio en función del peso de material que deben utilizar para resistir a la presión a que son sometidos. Por lo tanto tendremos:

$$C_T = \text{Peso} \times \text{Costo} [\$ / \text{kg}] \text{ es decir: } C_T = \text{Volumen} \gamma \text{ Costo} [\$ / \text{kg}]$$

En forma aproximada el volumen será :  $V = D \pi e L$

Recordando la expresión del espesor, en función del diámetro y la presión:

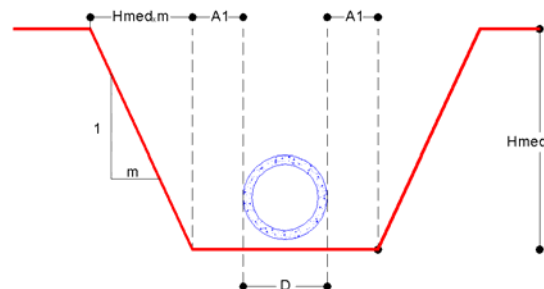
$$V = \frac{\pi D}{2 \sigma} \pi D L [m^3]$$

Por lo tanto  $C_T$  será:

$$C_T = \left( \frac{\pi^2 D^2}{2 \sigma} L \gamma \right) [kg] \text{ Costo} [\$ / \text{kg}]$$

Con las hipótesis realizadas, el costo de la tubería varía con el diámetro al cuadrado de la misma:

$$C_T = K_T D^2$$



El costo del zanjeo para colocación del conducto cuando se trata de diámetros pequeños varía poco entre sí y es, en general, función del ancho del equipo de excavación. No obstante en las cotizaciones (o en forma general) se considera un ancho de excavación igual al diámetro del conducto más un sobre ancho fijo de cada lado de la tubería que permita su correcta instalación y relleno. Planteado así el volumen de suelo a excavar por unidad de longitud será:

$$V_{\text{suelo}} = (D + 2 \times A1 + H_{\text{med}} \times m) \times H_{\text{med}}$$

Luego el costo de este ítem será:

$$C_I = (D + 2 \times A1 + H_{\text{med}} \times m) \times H_{\text{med}} \times \text{Costo} [ \$ / m^3 ]$$

El costo del equipamiento electromecánico se compone fundamentalmente por las bombas, sus motores y tableros eléctricos, costo este que se asocia directamente a la potencia eléctrica que consume la bomba. Será:  $C_B = P [kW] \times \text{Costo} [ \$ / kW ]$

Siendo la potencia:  $P = \frac{g}{\eta} Q \left( H_T + K \frac{Q^2}{D^5} \right)$  queda como costo de los equipos de bombeo:

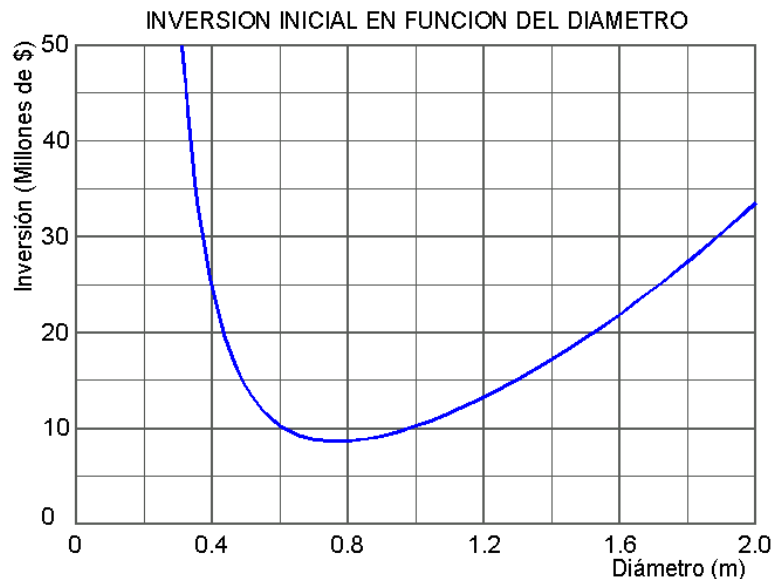
$$C_B = \frac{g}{\eta} Q \left( H_T + K \frac{Q^2}{D^5} \right) [kW] \times \text{Costo} [ \$ / kW ]$$

Si sumamos los tres costos iniciales, es decir la inversión inicial del acueducto, tenemos:

$$C_{\text{INVERSION}} = C_T + C_I + C_B$$

Seleccionado el caudal, el material para las tuberías y las características del suelo, los tres costo de inversión inicial quedan en función del diámetro, que graficados quedan como lo muestra el gráfico adjunto.

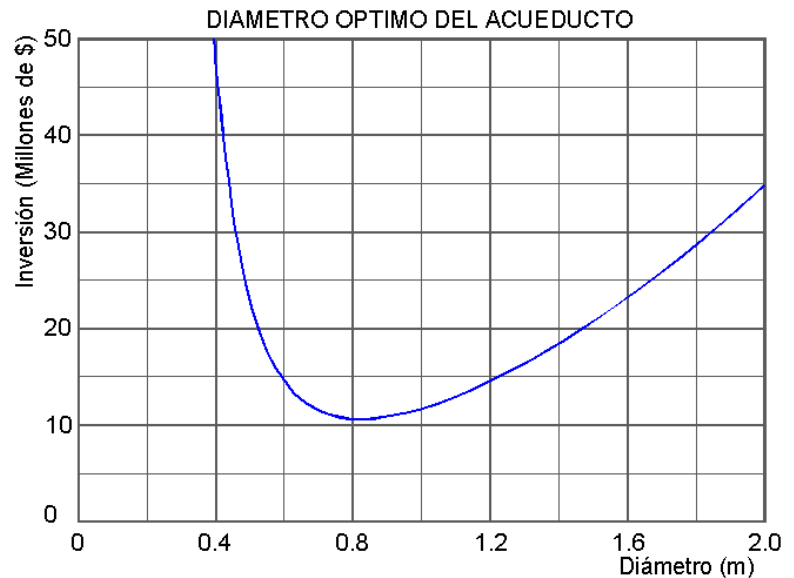
Si se busca el mínimo costo total, se deben tener en cuenta ambos: la inversión inicial y el costo de operación por la energía consumida por bombeo:





Graficando la suma de dichas ecuaciones se tendrá un costo mínimo resultante que permite obtener el diámetro óptimo de la conducción.

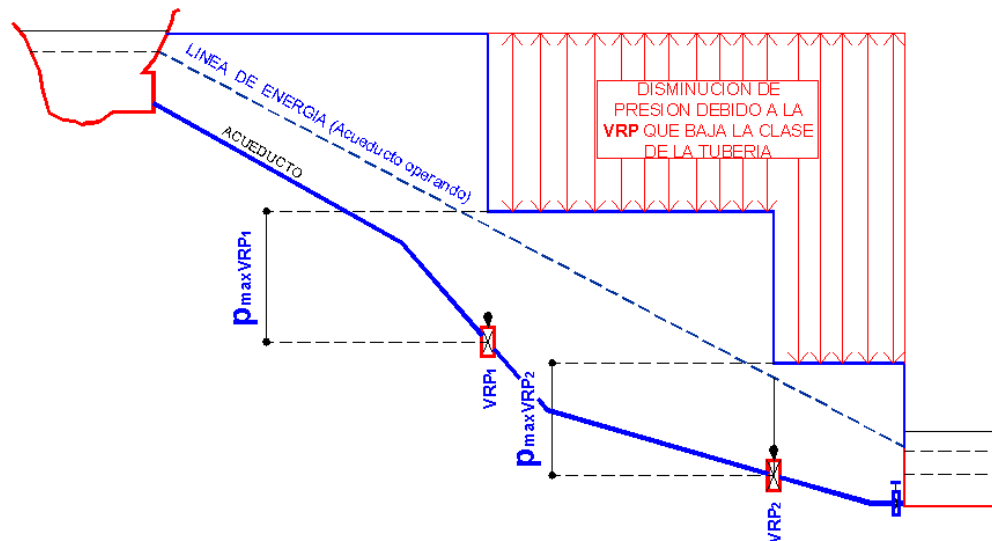
Lo anterior se ha desarrollado suponiendo un único diámetro cuyo espesor variar en forma continua según las ecuaciones vistas. En la práctica se deberán adoptar tramos discretos para los cuales se seleccionan las clases según se ha explicado. El acueducto quedará discretizado en tramos de espesores constantes.



## ORGANOS ESPECIALES

### Válvulas Regulatoras de presión.

Las válvulas reguladoras de presión (**VRP**), son elementos, (válvulas o sistema de ellas), que se pueden colocar en el acueducto con la finalidad de asegurar que la presión aguas abajo de su



posición no supere un valor prefijado. Estas válvulas operan en general hidráulicamente y comparan la presión aguas abajo con la referencia, si ésta supera el valor fijado, (valor de seteo), cierra introduciendo una pérdida de carga hasta llegar, si es necesario, a caudal nulo.

Es así que en régimen estático,  $Q = 0$ , aguas debajo de la válvula la presión queda igualada al valor de seteo. Con esta disposición la máxima carga que el acueducto debe soportar aguas abajo de las **VRP** puede ser considerablemente menor que la que actuaría si ella no estuviese. Se reducen así las clases de la tubería. Esta economía lograda en el costo de la tubería deberá justificar el costo de la instalación de la **VRP** y el mantenimiento de la misma. Además, deben ser tenidos en cuenta otros costos adicionales, como son los correspondientes a válvulas complementarias que resultan necesarias para el correcto funcionamiento de las **VRP**, como son las válvulas de seguridad y de aislamiento para eventuales reparaciones.

Una vez definidos los diámetros del acueducto deben dimensionarse los cuerpos receptores que en general son cisternas. Las cisternas reciben un caudal del acueducto y desde allí se puede alimentar un nuevo tramo de acueducto o entregar un caudal ya para su consumo.

El caudal a entregar podrá ser directamente el de consumo o ser un valor constante, de manera que la regulación a la red se realice mediante elementos intercalados antes de llegar a los usuarios. En cualquiera de estos casos mencionados, estamos en presencia de un volumen que recibe una curva de caudal y eroga otra curva de caudal de características diferentes.

Si lo que recibe viene de un acueducto que funciona por gravedad, el caudal variará en función de la válvula que se encuentra aguas arriba de la cisterna, debiendo reducir el caudal recibido en caso que la cisterna se encuentre en su nivel máximo, o aumentarlo si se alcanza un nivel mínimo de referencia.