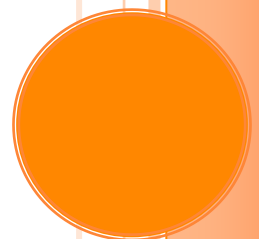


AGUA Y DESARROLLO HUMANO

MÓDULO 3: TPDH EN PROYECTOS DE COOPERACIÓN DE AGUA

TEMA 3: CÁLCULOS HIDRÁULICOS BÁSICOS



ÍNDICE

Tema 3. Cálculos Hidráulicos Básicos	2
3.1. HIDRÁULICA	2
3.1.1 Ámbito de aplicación	2
3.1.2 Flujo a presión	2
3.1.3 Flujo en lámina libre	5
3.2. DISEÑO DE LA DISTRIBUCIÓN	7
3.2.1 Determinación de los caudales de diseño.....	8
3.2.2. Montaje y accesorios.....	9
3.2.3. Cálculo de redes mediante Epanet	10
3.2.4. Criterios de cálculo	12
3.3. BIBLIOGRAFÍA.....	12

TEMA 3. CÁLCULOS HIDRÁULICOS BÁSICOS

3.1. HIDRÁULICA

3.1.1 Ámbito de aplicación

Desde el punto de vista técnico, es imprescindible tener los conocimientos necesarios de hidráulica para poder plantear las mejores soluciones técnicas en cada caso y su implicación con el medio ambiente.

Ejemplos:

El cálculo de un sistema de bombeo, la elección de la bomba o el diámetro de la tubería se basa en la ecuación de flujo en presión.

La definición geométrica de una cuneta está basada en el cálculo del caudal máximo circulante por ella. Este cálculo requiere conocer la ecuación de flujo en lámina libre.

En el ámbito de la Hidráulica, las secciones más importantes son:

- Flujo en presión
- Flujo en lámina libre

La energía, motor del movimiento

Tanto la Hidráulica de flujo en presión como la del flujo en lámina libre se basan en el **principio de conservación de la energía**, de forma que el movimiento del agua se produce de los puntos con mayor energía a los de menor energía.

3.1.2 Flujo a presión

Trinomio de Bernoulli

Al aplicar las leyes de conversión de masa y energía a los fluidos, Daniel Bernoulli (1700-1782) formuló la ecuación para el flujo de fluidos que describe la relación entre presión, velocidad y elevación de cualquier punto en un fluido. Si entre dos puntos cualesquiera conectados hidráulicamente, por ejemplo con una tubería, existe una diferencia de energías, esa diferencia corresponde a las pérdidas producidas en ese tramo de tubería.

Teoría

Trinomio de Bernoulli

$$H = z + P/\gamma + v^2/2g$$

Dónde,

z = energía potencial

P/γ = energía de presión

$v^2/2g$ = energía cinética

Ecuación básica del flujo a presión

$$H_A = H_B + \Delta H_{AB}$$



Aplicación

Trinomio Bernoulli

$$H_B = z_B + P_B/\gamma + v_B^2/2g$$

$$H_A = z_A + P_A/\gamma + v_A^2/2g$$

Condiciones de contorno

$$v_B = v_A = 0$$

$$P_B = P_A = 0$$

Ecuación final a resolver

$$z_A = z_B + \Delta H_{AB}$$

Gráfico 1. Trinomio de Bernoulli y Ecuación básica del flujo a presión

Pérdidas longitudinales

Son aquellas pérdidas energéticas producidas en una tubería por el rozamiento de la masa de agua con las paredes de la tubería. Para expresar las pérdidas longitudinales existen multitud de formulaciones, con una serie de criterios comunes:

- A mayor caudal circulante por la tubería, mayores son las pérdidas.
- A mayor rugosidad en la tubería (debido a los distintos materiales con los que se pueden construir), mayores son las pérdidas.
- A menor diámetro de la tubería, mayores son las pérdidas.

Puede verse cómo todos ellos son evidentes si se piensa que las pérdidas longitudinales son debidas al rozamiento.

Manning

$$h_c = \frac{10.3 \cdot n^2}{D^{5.33}} \cdot Q^2 \cdot L$$

Hazen-Williams

$$h_c = \frac{10.7}{c^{1.85} \cdot D^{4.87}} \cdot Q^{1.85} \cdot L$$

Material	n	Material	c
Plástico (PE)	0.006 – 0.007	plástico nuevas	150
Plástico (PVC)	0.007 – 0.009	fibrocemento	140
Fibrocemento	0.011 – 0.012	hierro nuevas y pulidas	130
Fundición	0.012 – 0.013	hormigón armado	128
Hormigón	0.013 – 0.014	acero nuevas	120
Acero comercial	0.015	acero usadas	110
		fundición nuevas	100
		fundición usadas	90-80

Unidades

h_c : pérdidas, mca
 Q : caudal, m³/s
 L : longitud, m
 D : diámetro, m

Gráfico 2. Algunas fórmulas para el cálculo de las pérdidas longitudinales en flujo a presión.

Pérdidas puntuales

Son aquellas pérdidas energéticas producidas en una tubería por cambios bruscos en el flujo (válvulas, codos, entradas a depósitos, etc). Las pérdidas localizadas se expresan mediante un coeficiente que multiplica la aportación de la velocidad en el trinomio de Bernoulli. Así pues, su expresión más general es la siguiente:

$$\Delta H_P = \sum \lambda \frac{v^2}{2g}$$

Caso	λ
Válvula de Globo, totalmente abierta	10.0
Válvula de Ángulo, totalmente abierta	5.0
Válvula de Retención de Clapeta, totalmente abierta	2.5
Válvula de Compuerta, totalmente abierta	0.2
Codo de Radio Pequeño	0.9
Codo de Radio Mediano	0.8
Codo de Radio Grande	0.6
Codo a 45°	0.4
Codo de Retorno (180°)	2.2
'T' estándar (flujo recto)	0.6
'T' estándar (flujo desviado)	1.8
Entrada brusca	0.5
Salida brusca	1.0

Gráfico 3. Pérdidas localizadas en flujo a presión

Bombas

La introducción de una bomba en un tramo de flujo a presión se contabiliza no como pérdida sino como ganancia energética. El fabricante suministra para cada bomba la **curva característica de la bomba**. Esta curva relaciona el caudal bombeado y la altura de bombeo o altura piezométrica introducida en el sistema. Se suele complementar con la curva que relaciona rendimiento y altura piezométrica.

Por otro lado, tal como ya se ha visto, las pérdidas de carga de conducciones son proporcionales en orden de magnitud al cuadrado del caudal. Por tanto, para una tubería de un diámetro dado, la **curva característica de la instalación** viene dada por una parábola aproximada (H1-A en la figura), que parte del punto H1. La ordenada OH1 representa el desnivel geométrico.

Así pues el punto M, que representa la intersección de la curva característica de la bomba con la curva resistente de la instalación, es el punto de funcionamiento de la bomba. Naturalmente conviene que este punto corresponda al de máximo rendimiento de la misma.

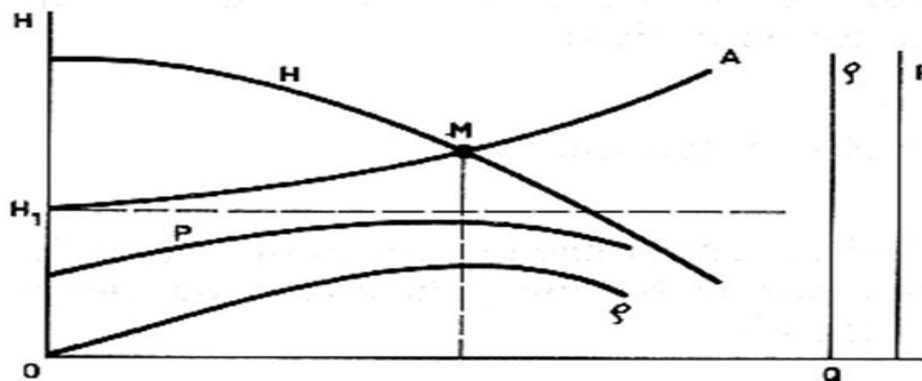


Gráfico 4. Punto de funcionamiento de una bomba en una instalación.

3.1.3 Flujo en lámina libre

Trinomio de Bernoulli y tipos de flujo

Al igual que en el flujo a presión, se analiza el valor del trinomio de Bernoulli en dos puntos cualesquiera de la superficie de agua:

- La presión es la misma a lo largo de todo el canal y coincide con la atmosférica.
- Si la sección del canal no varía a lo largo del canal y el caudal es constante, entonces la velocidad es constante.
- La cota es distinta entre un punto y el otro.

En el flujo en lámina libre, las pérdidas de energía se producen principalmente por pérdida de cota.

En flujo en lámina libre, el trinomio de Bernouilli se puede expresar de la siguiente manera:

$$H = z + y + v^2/2g \quad \text{Donde:}$$

- H = energía por unidad de peso
- z = cota de la solera del canal
- y = calado o altura de agua en la sección
- v = velocidad media del flujo
- g = aceleración de la gravedad

Las ecuaciones que describen el flujo en lámina libre son distintas según las características del canal y el caudal que circule. Para delimitar los distintos tipos de flujo se utilizan los siguientes parámetros o números adimensionales:

- Número de **Reynolds**
- Número de **Froude**

	Reynolds	Froude
<i>Sentido</i>	Da cuenta de la importancia relativa de las fuerzas de inercia respecto a las fuerzas viscosas.	Representa el doble de la relación entre la energía cinética y la energía potencial del flujo.
<i>Fórmula</i>	$Re = \frac{4 \cdot V \cdot R_h}{\nu}$	$Fr = \frac{V^2}{g \cdot h}$
<i>Límites</i>	< 2300. Movimiento laminar > 2300. Movimiento turbulento	> 1. Flujo rápido < 1. Flujo lento 1. Flujo crítico
Dónde, Re = número de Reynolds. V = velocidad media del flujo. Rh = radio hidráulico (cociente entre sección de agua S, y perímetro mojado P). ν = coeficiente de viscosidad cinemática del agua; varía con la presión y la temperatura, pero puede tomarse un valor de 10 ⁻⁶ m ² /s. Fr = número de Froude. g = aceleración de la gravedad. h = profundidad o altura máxima del agua en el canal o conducto.		

Gráfico 5. Definición de los números de Froude y Reynolds

En general, el movimiento existente en canales es claramente turbulento, y también suele asumirse régimen permanente y uniforme en toda la longitud analizada. El rozamiento suele evaluarse a través de la fórmula de Manning ya comentada, que en flujo en lámina libre también se presenta de la siguiente forma:

$$I = \frac{n^2 \cdot v^2}{R_h^{4/3}}$$

Donde:

- i = pendiente media del canal, en tanto por uno
- v = velocidad media del flujo (m/s)
- R_h = radio hidráulico (m). Representa el cociente entre la sección del canal y el perímetro mojado de canal o tubería
- n = coeficiente de rozamiento o coeficiente de Manning

El coeficiente de Manning está ampliamente tabulado. En la siguiente tabla se presentan algunos valores:

Tipo de conducto	n, coeficiente de Manning
Revestimiento de hormigón burdo	0,017-0,018
Revestimiento de hormigón liso	0,012-0,016
Canal viejo con depósitos y vegetación	0,019-0,028
Canal en tierra	0,025-0,033
Canal en grava gruesa	0,028
Canal en grava fina	0,022
Canal en arena	0,020
Canal en mampostería	0,018

Gráfico 6. Ejemplos de valores del coeficiente de Manning

3.2. DISEÑO DE LA DISTRIBUCIÓN

Para llevar a cabo el diseño de una red de distribución es necesario realizar los siguientes pasos:

- Determinación de los caudales de diseño.
- Estimación de diámetros de las tuberías.
- Comprobación de presiones y velocidades en la red.

- Calcular de nuevo, en caso de no verificarse el último paso.

A efectos de cálculo, la red de abastecimiento se representa mediante un conjunto de **puntos o nodos** conectados mediante **cuerdas o arcos**, que representan en este caso los tramos de tubería. Debe tenerse claro que, en el momento de realizar los cálculos, se utilizarán las siguientes hipótesis:

- Únicamente se admite entrada o salida de agua en la red a través de los nodos.
- El arco que une dos nodos representa un único tipo de tubería. Por ello no se puede variar la sección de la misma. (Si se quisiera variar, se debería introducir un nuevo nodo, de forma que no se tuviera ya una cuerda y dos nodos, sino dos cuerdas y tres nodos).

Normalmente se suele abstraer la red a partir de los tramos más importantes y concentrando ciertos consumos en un mismo nodo, de forma que se reduzca el número de nodos y tramos; aunque nada impide realizar los cálculos con toda la información si se quiere.

3.2.1 Determinación de los caudales de diseño

La red de abastecimiento no funciona siempre en el mismo régimen. Por ello para diseñar la infraestructura se requiere de los denominados caudales de diseño.

Debe tenerse claro qué consumos afectan a qué nodo; es decir, antes de los cálculos es bueno realizar un pequeño mapa de viviendas o industrias afectadas por cada uno de los nodos. Así se evita olvidar o, por el contrario, duplicar consumos con el consiguiente error de diseño.

Un factor determinante para este diseño es el tipo de distribución por puntos de consumo, si se realiza por fuentes públicas en cada punto de consumo el caudal será mayor que si se realiza por acometidas en cada casa.

El caudal de diseño agrupa las demandas de las viviendas, las industrias y otros usos, como por ejemplo el riego o el aprovechamiento para proyectos productivos agrícolas, etc.

Consumo doméstico

La fórmula más comúnmente utilizada es la siguiente:

$$Q \text{ (l/s)} = K_p \cdot D \cdot P / 86400$$

Donde,

- K_p = coeficiente de simultaneidad, depende de la población servida en total, no la servida por ese nodo; adimensional.
- D = dotación media diaria, l/hab.día
- P = población servida por ese nodo (teniendo en cuenta el crecimiento de dicha población en el periodo de vida útil de la obra; normalmente 20 años), hab.
- El valor 86.400 resulta de la transformación de días en segundos.

El consumo por nodo se reduce a medida que aumenta la población. Su significado es claro: es menos probable que todo el mundo este consumiendo a la vez en una población con 500.000 habitantes que en una con 1.000.

Si la red es **ramificada**, los **cálculos son inmediatos** puesto que se conocen los caudales en cada uno de los tramos (sumando las demandas aguas abajo de dicho tramo) y, por consiguiente, las pérdidas, las presiones, las velocidades, etc.

Si la **red es mallada**, los cálculos son un tanto más complejos, puesto que no se conocen *a priori* los caudales en cada uno de los tramos. La solución más fácil es utilizar un **programa de cálculo** de tuberías, como por ejemplo EPANET (<http://www.instagua.upv.es/Epanet/>).

Dejando aparte el posible bombeo en el sistema, la red de distribución cuenta con los siguientes elementos:

- Depósitos
- Tubería de distribución
- Válvulas
- Puntos de consumo de agua

3.2.2. Montaje y accesorios

En los métodos constructivos para una red de tubería es necesario tener en cuenta el material de la tubería. Normalmente en impulsiones o aducciones a gran presión se utilizan materiales altamente resistentes como el hierro galvanizado. En cambio en los ramales de distribución, con multitud de accesorios y desvíos se utilizan materiales plásticos, como por ejemplo el polietileno de alta densidad.

La instalación de tuberías plásticas debe ser enterrada para evitar damnificación ya sea por saqueo como por la exposición al sol y a elementos erosivos. Las tuberías se colocan en zanjas de profundidad entre 70 y 100 cm, es necesario colocar un lecho de arena para evitar el contacto de la tubería con posibles piedras que la podrían perforar.

Al diseñar en detalle la red de distribución es necesario hacer los perfiles topográficos del terreno por donde pasará la tubería. En los puntos altos deben instalarse válvulas de aire o ventosas para evitar la acumulación de burbujas que puede llegar a obturar el paso del agua. En los puntos bajos deben colocarse purgas de lodos para limpiar los posibles depósitos de materiales disueltos que arrastre el agua.

Otro tipo de válvula que conviene instalar son las válvulas de seccionamiento que permiten cortar el flujo del agua para hacer reparaciones en determinados puntos de la red.

Todos los accesorios, tanto las válvulas como las derivaciones o té y los contadores, deben ir acompañados de uniones universales para facilitar desmontar los elementos, cuando sea necesario cambiarlos, sin tener que cortar la tubería.

Conviene colocar contadores en los puntos de consumo, tanto si son fuentes públicas como, especialmente, en las acometidas domiciliarias. Los contadores son un elemento imprescindible del control del funcionamiento de la red, sobre todo para la gestión del sistema, pero también para detectar posibles averías.

Es imprescindible realizar pruebas de presión, llenando las tuberías con agua, antes de taparlas con arena, para detectar posibles fugas o disfuncionalidades y repararlas a tiempo.

3.2.3. Cálculo de redes mediante Epanet

Epanet es un programa de cálculo de redes de distribución, sencillo de presentación y de fácil utilización, fue creado y difundido por la Agencia Norteamericana de Medioambiente (EPA). Se puede descargar gratuitamente en inglés de su página de creación o en español, la traducción hecha por la Universidad Politécnica de Valencia.

Los pasos a seguir para calcular una red de distribución en Epanet son:

- Diseñar el trazado de la red.
- Definir las características de sus elementos.
- Hacer correr el programa, realizar los cálculos.
- Rediseñar para cumplir ciertos parámetros.

Así pues, funciona de una manera iterativa, donde a partir de los resultados obtenidos se pueden modificar las características de la red, de una manera rápida, para mejorar su funcionamiento.

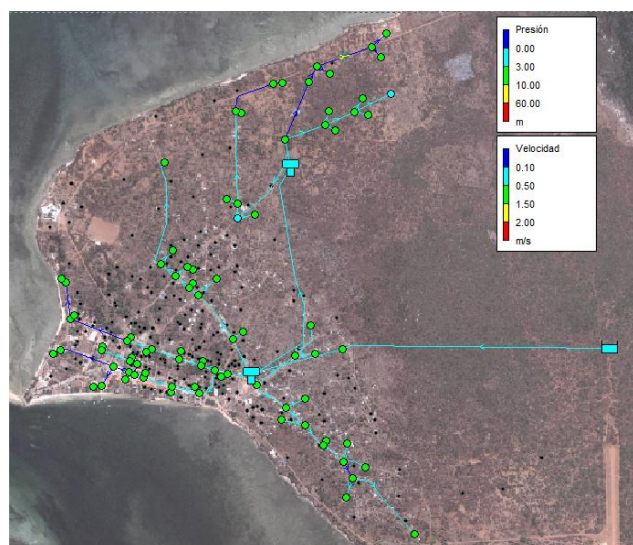


Gráfico 6. Ejemplo de red calculada con Epanet.

Elementos en Epanet

Los elementos por los que están compuestas las redes en el programa son: nodos, embalses, depósitos, tuberías, bombas y válvulas.

Los nudos se definen principalmente por su cota topográfica y por su demanda, existirán puntos de consumo y puntos de unión entre elementos que no tendrán consumo. Los embalse se utilizan como fuente de agua ilimitada a una determinada cota, normalmente se coloca un embalse allí donde existe la fuente de abastecimiento de agua o bien, por ejemplo, un depósito de distribución cuya dimensión se ha calculado anteriormente.

Los depósitos vienen definidos por su tamaño y por su cota. Las tuberías se caracterizan a partir de su rugosidad, que depende del material, de su longitud, que depende de la geometría existente, y de su diámetro. En las tuberías, el valor del diámetro es el que se suele iterar para hacer conseguir que el sistema funcione correctamente. Hay que tener en cuenta cuales son los diámetros de las tuberías comerciales (diámetro interior) para diseñar una red que se pueda construir.

El cálculo de las bombas y la colocación de las válvulas muchas veces no es aconsejable realizarlo en Epanet.

En todo caso, la propia ayuda del programa es bastante intuitiva y puede resolver las dudas más comunes.

Algunos aspectos a tener en cuenta

Antes de empezar a usar el programa es importante definir bien las unidades en las que se va a trabajar y colocar los valores de manera consecuente.

Epanet permite colocar una imagen raster de fondo, añadiendo las dimensiones de la imagen es posible dibujar las tuberías sin tener que introducir su longitud una por una, el programa calcula las longitudes haciendo la proporción a partir de las dimensiones de la imagen.

Igualmente es posible abrir una red en Autocad o dibujar los puntos a partir de la imagen de Google Earth.

En el momento de colocar los nodos es importante conocer los puntos altos por los que deberá pasar la tubería y asignar a estos un nudo, de manera que el programa calculará su presión y podremos ver si será posible la circulación del agua. En caso de no dibujar el punto por estar situado entre dos puntos de demanda se puede obviar el punto alto y luego tener problema de presión.

En las tuberías es necesario incluir un coeficiente para las pérdidas localizadas que equivale a la suma de todas las λ (gráfico 3) de los elementos que se encuentran en la tubería descrita.

Estos y otros aspectos relevantes para el uso de epanet en el cálculo de redes de abastecimiento de agua, especialmente en proyectos de cooperación, pueden encontrarse en el libro Epanet y Cooperación de Arnalich, 2007.

3.2.4. Criterios de cálculo

Los criterios de cálculo son aquellos parámetros en los que fijarse para saber si una red está bien diseñada y, por lo tanto, funciona correctamente. Aquí se describen los más básicos, para quien quiera diseñar una red para ser construida se recomienda la lectura de bibliografía más detallada.

3.2.4.1 Presión

En primer lugar es necesario fijarse en la presión del agua. La presión del agua en movimiento es la que garantizará que el agua salga por los grifos, normalmente se diseña para que esta presión esté situada entre 10 y 30 mca (metros cúbicos de agua). Aunque realmente el mínimo de presión para que salga agua correctamente por el grifo es de unos 3 mca, en caso de necesidad de ajuste económico puede considerarse una presión mínima de 5 o 7 mca. Siempre teniendo en cuenta la altura donde se sitúa el grifo respecto al suelo y si las construcciones son de una única planta o en alzado, si las viviendas tienen más de un piso hay que tener en cuenta la cota de encima para calcular la presión.

Presiones más altas de 30 mca facilitan las fugas y que se estropee la red. Es especialmente necesario calcular la presión hidrostática para ver que los grifos aguantan la columna de agua en cuanto están cerrados. En caso de encontrarse presiones superiores a 30 mca se aconseja diseñar un tanque rompe presión en un punto intermedio.

3.2.4.2 Velocidad

La velocidad en tuberías aconsejable está situada entre 0,5 m/s y 2 m/s. Velocidades más bajas facilita la precipitación de materiales que pueden acabar obturando las tuberías. Velocidades más altas indican que la tubería es demasiado pequeña y puede dar problemas de estropearse las propias tuberías.

En caso de agua sin material disuelto y de tuberías muy pequeñas, con movimiento diario, se pueden aceptar velocidades entre 0 y 0,5 m/s.

Existen otros parámetros a tener en cuenta a la hora de diseñar, pero estos son los más significativos. El Epanet tiene también herramientas para el cálculo del cloro residual para verificar la calidad del agua en los puntos de consumo.

3.3. BIBLIOGRAFÍA

Arnalich, S. (2007), *Agua y Cooperación*, UMAN, Ingeniería para las personas.