

Síntesis del análisis del flujo de fluidos en tuberías ramificadas.

Ing. Yanán Camaraza Medina^{1, 2},
Dr. Ing. Osvaldo Fidel García Morales².

1. Empresa Eléctrica Matanzas
Calle Contreras # 70 e/n Santa Teresa y Ayuntamiento, Matanzas, Cuba.
(Teléfono 41-39-94) Email: operunion@elecmtz.une.cu

2. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”
Carretera a Varadero, km 3^{1/2}, Matanzas, Cuba.
(Teléfono 261432) Email: osvaldo.garcia@umcc.cu

PROLOGO

En este trabajo se exponen en forma resumida los fundamentos del análisis del flujo de fluidos en tuberías ramificadas, haciéndose especial énfasis en la aplicación en específico del conocido método de Hardy Cross a la solución de este tipo de problemas. Los autores no han tenido la intención de dar una opinión autorizada sobre el tema, acerca del cual existen innumerables trabajos de alto rigor y valor científico, sino que han pretendido de una forma amena y sencilla introducir los conceptos básicos de esta complejo, pero fascinante temática para que los interesados en el tema posean una información básica a partir de la cual logren comprender mejor la información brindada en los manuales especializados.

Si se cumple este objetivo, los autores se sentirán satisfechos en ver su meta cumplida.

1. Problemas sobre líneas de tuberías. Tubos múltiples.

Algunos de los problemas más complejos del diseño de tuberías, implican el flujo de fluidos por tubos que se intersecan. Los principios aplicables a problemas de este tipo se pueden dividir en dos grupos fundamentales:

- 1- Tuberías cuyas líneas de corriente se separan y posteriormente se vuelven a unir
- 2- Tuberías cuyas líneas de flujo conducen desde regiones de presión y elevación conocidas y se encuentran en un punto común.

Por lo general en estos tipos de problemas se desprecian las cargas de velocidad, las pérdidas menores y las variaciones del factor de fricción con los valores de Re , mientras que los cálculos se efectúan sobre la coincidencia que existe entre las líneas de energía y el gradiente hidráulico como bien se reporta en [15], [20], [23], [24].

En la ingeniería práctica un método normalizado es derivar una tubería B paralelamente a una tubería existente A, y posteriormente volver a conectarla con esta, tal como se muestra en la figura # 1.1.

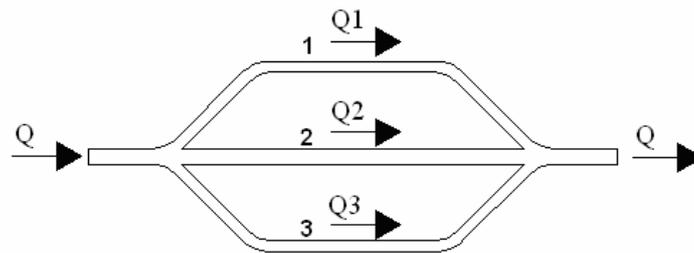


Figura #1.1 Esquema representativo de una tubería ramificada en paralelo

De esta forma se logra aumentar la capacidad de la línea. Se nota aquí una analogía entre el flujo de fluidos y el flujo de corriente eléctrica en un circuito en paralelo, si se comparan la pérdida de carga con la caída del potencial eléctrico, y el movimiento del fluido con la corriente eléctrica.

Es evidente, a partir de lo explicado en el párrafo anterior, que la distribución de flujos en los ramales debe ser tal, que ocurra la misma pérdida de carga en cada uno de los ramales, pues si esto no fuera así habrían entonces más de una línea de energía para el tubo corriente arriba y corriente abajo, siendo esto una imposibilidad obvia.

Con la aplicación del principio de continuidad se muestra que el caudal de flujo en la línea principal va a ser igual a la sumatoria de los caudales de flujo en los ramales, por tanto coincidiendo la opinión de este autor a lo planteado en las referencias [1], [4], [5], [11], [12], [15], [16], se puede expresar lo antes planteado en el análisis efectuado a la Figura # 1.1, mediante las siguientes ecuaciones simultaneas:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_3 \quad (1.1)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1.1-a)$$

Las pérdidas de presión en el conducto se expresan en términos del flujo a partir de la ecuación de Darcy y la expresión volumétrica de la ecuación de continuidad, la cual se escribe como:

$$Q = V * A$$

Donde

A es el área de la sección transversal de la tubería, en m² determinada en conductos de sección circular como:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4}$$

Sustituyendo en la ecuación de Darcy y arreglando convenientemente se obtiene:

$$\Delta p = \left(\frac{f * 8 * l}{d^5 * \pi^2 * g} + \sum \xi * \frac{8}{d^4 * \pi^2 * g} \right) * Q^2 \quad (1.2)$$

Esta relación se puede generalizar escribiéndola de la siguiente forma

$$\Delta p = K * Q^2 \quad (1.2-a)$$

Donde

$$K = \left(\frac{f * 8 * l}{d^5 * \pi^2 * g} + \sum \xi * \frac{8}{d^4 * \pi^2 * g} \right) \quad (1.2-b)$$

En la expresión (1.2-b) las pérdidas menores ocasionadas por accesorios generalmente son tratadas como longitudes equivalentes de tuberías, por tanto la expresión (1.2-b) se transformará entonces, siguiendo este criterio, en:

$$K = \left(\frac{8 * f * (L_{Tub} + L_{EQUIV})}{d^5 * \pi^2 * g} \right) \quad (1.2-c)$$

En esta expresión

L_{Tub} es la longitud de las tuberías integrantes del tramo dado, en m.

L_{EQUIV} es la longitud equivalente de los accesorios, en m.

La longitud equivalente de los accesorios se define como la longitud de una tubería recta y de sección transversal constante en la cual ocurre la misma caída de presión que en el accesorio, siendo expresada en m.

De acuerdo a la ecuación (1.2-a) la relación (1.1) se puede expresar como:

$$K_1 * Q_1^2 = K_1 * Q_2^2 = K_1 * Q_3^2 \quad (1.3)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1.3-a)$$

La solución de las ecuaciones simultáneas (1.3) y (1.3-a), permite la predicción de la división de un régimen de flujo Q , en los regímenes de flujo Q_N de cada una de las tuberías, cuando se conocen sus características. La aplicación de estos principios también permite la predicción del régimen de flujo obtenible por la derivación de una línea de tubería Q y su incremento.

Los sistemas de tuberías múltiples alcanzan su mayor nivel de complejidad en los problemas de distribución de flujo en las redes de tuberías, tales como las del sistema de distribución de agua en una ciudad.

El espacio disponible en este informe no permite aquí una discusión exhaustiva de este tema, pero si la exposición de un método que a la opinión del autor es uno de los más difundidos y empleados a nivel mundial, atribuido a Hardy Cross¹, siendo recomendado por los autores [1], [3], [5], [7], [8], [9], [11], [12], [21], [22], [23], [24], [25], siendo este a su vez el de mayor uso en Cuba en el diseño y evaluación de redes de distribución hidráulicas.

1.2 Pérdidas menores producidas por accesorios.

Las pérdidas locales tienen lugar en los cambios de sección y dirección de la corriente, en las contracciones, ensanchamientos bruscos, curvas, codos, bifurcaciones, o por accesorios instalados en ellas, como diafragmas, llaves, válvulas, etc. Todos ellos originan una perturbación de la corriente que provoca la aparición de remolinos, intensificándose de esta forma las pérdidas de carga, que en algunos casos pueden ser más importantes que las pérdidas continuas, sobre todo en conducciones relativamente cortas.

Se admite en la ingeniería práctica, sin que se cometa un error considerable, que si la conducción tiene una longitud superior a mil veces el diámetro, el error que se comete despreciando las pérdidas accidentales es menor que el que se cometería en el cálculo del factor de pérdidas por rozamiento para las pérdidas continuas.

Los valores de pérdidas menores se determinan, como se demostró anteriormente, y coincidiendo con el criterio de los autores [1], [7], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [22], a partir del último término de la derecha en la ecuación de balance de energía mecánica, la cual se muestra a continuación:

$$\frac{P_1}{\rho_1 * g} + \alpha_1 * \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho_2 * g} + \alpha_2 * \frac{V_2^2}{2g} + f * \frac{V^2}{2g} * \frac{l}{d} + Z_2 + \sum_{i=1}^{i=n} \xi_i * \frac{V^2}{2g} \quad (1.4)$$

¹ H Cross, "Analysis of flow in networks of conduits and Conductors", Univ. Illinois Eng. Expt. Sta., Bull. 286, 1936

En el caso de que el conducto tenga varios diámetros se calcularán las pérdidas locales para cada una de los tramos de tuberías teniendo en consideración sus velocidades características, calculadas usando la ecuación de balance de energía mecánica (1.4) y se sumarán para establecer el valor de las pérdidas totales en el conducto:

$$\Delta pm = \sum_{i=1}^{i=n} \xi_i * \frac{V_i^2}{2 * g} \quad (1.4-a)$$

En la ecuación (1.4-a)

Δpm es la caída de presión debido los accesorios integrantes de la red, en m

Los valores de los coeficientes de pérdidas por accesorios dados en la literatura fueron determinados en la zona de turbulencia total, o sea, para números de Re mayores que el segundo número de Re crit. [9], [14], [16], [20], [22].

Actualmente existen un amplio grupo de expresiones para la determinación del valor del segundo número adimensional de Reynolds critico, el cual posee un importancia vital en el análisis del flujo de fluidos por el interior de conductos cerrados, ya que para valores de Re superiores a él, en las mismas condiciones de trabajo, el valor numérico del factor de fricción dejará de depender del valor de este número adimensional. Aquí el autor hará uso de una expresión, la cual es la de mayor difusión y uso a nivel internacional atribuida a [23], la cual se representa de la siguiente forma:

$$Re_{CRIT2} = 550 * \left(\frac{e}{d}\right)^{-1,125} \quad (1.5)$$

En el caso dado, en que el número adimensional de Reynolds del sistema sea inferior al Re_{CRIT2} , entonces se deben corregir los valores de $\sum \xi$, a partir de la siguiente relación

Según lo recomendado por los autores

$$\sum \xi_{DEF} = \sum \xi * \frac{f}{f_{TUR}} \quad (1.6)$$

En la expresión (1.6), los términos no conocidos son:

$\sum \xi_{DEF}$ es el valor de la sumatoria de los coeficientes de pérdidas por accesorios equivalente en la zona de transición, adim.

f_{TUR} es el valor del factor de fricción determinado según el valor del segundo número critico de Re, adim.

f es el valor del factor de fricción determinado según el valor del Re determinado a la velocidad característica, la de la tubería de menor diámetro, adim.

Existe un criterio muy generalizado para la determinación de las pérdidas ocasionadas por accesorios, conocido en la práctica como longitud equivalente. Este coincide en

determinar que longitud de tuberías, con iguales características constructivas que el accesorio, aportaría el mismo valor de caídas de presión que este último.

Existe una expresión matemática que permite relacionar según las referencias [1], [4], [5], [11], [12], [19], [20], [23], [24], [25], los coeficientes de pérdidas menores con la longitud equivalente, la cual se expresa de la siguiente forma para un accesorio i dado como:

$$L_{Ei} = \frac{\xi_i * d}{f} \quad (1.6-a)$$

Para un tramo de diámetro constante del conducto las pérdidas locales se determinarían como:

$$L_E = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \xi * d}{f} \quad (1.6-b)$$

En la ecuación (1.6-b) L_E es la longitud equivalente de tuberías, que ocasionaría la misma pérdida de presión que el conjunto de accesorios integrados al tramo analizado del conducto, en m

La ventaja de este método consiste en que una vez obtenidas las longitudes equivalentes, estas se suman al término longitud, presente en la ecuación de Darcy determinándose de esta manera, de una forma muy sencilla, las pérdidas de carga en las líneas de tuberías. Sin embargo a pesar de las facilidades proporcionadas, se sacrifica la precisión de los resultados con la aplicación de este método, por lo que en ocasiones se suele acudir a monogramas², los cuales relacionan la longitud equivalente con distintos tipos de accesorios, sin tener en cuenta factores como el material del cual están elaborados o el tiempo de explotación, cosa que no ocurre con los coeficientes ξ , los cuales son determinados por el fabricante mediante cuidadosa experimentación.

1.3 Solución de problemas sobre tubos múltiples mediante el Método de Cross.

Una red de tuberías en un sistema de distribución de agua consiste en la agregación de tubos conectados, los cuales se emplean con el fin de entregar agua a los usuarios en un área especificada, como pudiera ser una ciudad, o una parte de esta. La red consiste en un conjunto de tubos de varios tamaños, orientaciones geométricas y características hidráulicas, interconectados entre sí con el fin de distribuir uniformemente el volumen de caudales, y las caídas de presiones. Estos están constituidos además por bombas, válvulas, accesorios y similares.

² Véase por ejemplo la referencia [24] Pág. 182

La solución de cualquier problema de redes, debe satisfacer los principios de continuidad y el principio de Bernoulli a través de toda la red. El principio de continuidad establece que el régimen neto de flujo en cualquier unión de tubos, debe ser igual a cero. En la literatura técnica [1], [2], [3], [4], [8], [9], [10], [14], [17], [20] se acostumbra a llamar a las uniones de tubos como nodos.

El principio de Bernoulli requiere que en cualquier rama solo exista una posición de la línea de energía, esto es, que la pérdida neta de carga alrededor de cada malla de la red debe tener valor cero, aplicando estos principios a cada nodo, rama y malla de la red, se obtiene un juego de ecuaciones simultáneas³. En una red de distribución hidráulica se conoce como nodo al punto de convergencia o unión del caudal de dos o más ramas

Para una mejor comprensión de los nuevos términos, se muestra en la Figura # 1.2 una descripción más detallada de una red sencilla de distribución.

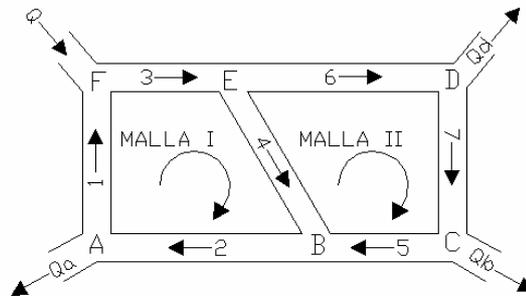


Figura # 1.2 Representación esquemática de una red de distribución hidráulica

En la figura # 1.2, los nodos se indican con letras mayúsculas, desde la A hasta la F, los tubos individuales o ramas se representan por números desde el 1 hasta el 7, y las mallas son mostradas enumeradas con números romanos I y II.

El método de Cross se caracteriza por las siguientes notaciones a la hora de efectuar el balanceo de la red:

- 1- Los flujos en las ramas son positivos cuando su rotación se efectúa en sentido dextrógiro alrededor de cada circuito, o sea que estos coinciden con la saeta indicadora, según como se indica en las mallas I y II de la Figura # 1.2, en el caso contrario serán negativos.
- 2- Los flujos se consideran positivos si estos entran a los nodos, y negativos en el caso de que salgan.

Como se muestra en la Figura # 1.2, la malla I está integrada por los tubos 1, 2, 3 y 4, mientras que la malla II está constituida por los tubos 4, 5, 6 y 7.

³ La demostración matemática de este enunciado se puede encontrar en la referencia [31], Pág. 55- 56.

Aplicando lo expuesto en los párrafos anteriores en las ecuaciones **(1.3)** y **(1.3-a)**, se obtienen el siguiente sistema de ecuaciones para la malla I.

$$\sum_A Q = -Q_a - Q_1 + Q_2 = 0 \quad (1.7)$$

$$\sum_F Q = Q + Q_1 - Q_3 = 0 \quad (1.7-a)$$

$$\sum_E Q = Q_3 - Q_4 + Q_6 = 0 \quad (1.7-b)$$

$$\sum_B Q = Q_5 + Q_4 - Q_2 = 0 \quad (1.7-c)$$

$$\sum_I \Delta p = K_1 * Q_1^2 + K_2 * Q_2^2 + K_3 * Q_3^2 + K_4 * Q_4^2 = 0 \quad (1.7-d)$$

Para el caso de la malla II, se obtiene un sistema de ecuaciones similar al anterior.

Para determinar las ecuaciones desde la **(1.7)** hasta la **(1.7-d)**, se han asumido las direcciones de las líneas de corriente del flujo en las ramas, aunque puede darse el caso que estas no sean las correctas y a la vez se suponen conocidas las características fundamentales de los sistemas integrantes de la red, dentro de las cuales se pueden mencionar:

- 1- Longitudes
- 2- Diámetros
- 3- Características hidráulicas de cada tubo
- 4- El caudal suministrado a la red
- 5- Características de las bombas instaladas
- 6- Distribución de la red y sus elevaciones (necesarias si se van a determinar las presiones)

Para aplicar el método de Cross, según los autores [1], [3], [5], [7], [12], [13], [18], [23], [24], [25], se comienza por suponer un juego de valores de gasto para cada rama Q1, Q2, etc., que satisfagan a su vez a la ecuación de continuidad, ajustado posteriormente en forma sistemática (mediante aproximaciones sucesivas), de forma que se mantenga satisfecha la continuidad, hasta que se obtengan resultados de pérdida de carga con la precisión deseada. La ventaja principal de este método consiste que en el se satisfacen automática y continuamente todas las ecuaciones de continuidad del sistema.

Vale destacar que en este método solo se deben resolver las ecuaciones de pérdidas de carga, y que el número de estas expresiones simultaneas a resolver va a ser igual al número de mallas existentes en la red.

Si en el proceso de iteraciones, el primer valor tomado es razonable, los Q_N regímenes de flujos verdaderos en cada rama, deberán diferir en solo en una pequeña cantidad Δ_L , diferente de las suposiciones iniciales.

Lo explicado en el párrafo anterior se puede representar matemáticamente de acuerdo a lo reflejado por los autores [1], [3], [4], [10], [11], [14], [21], [22], [25], mediante la siguiente expresión:

$$Q_{N+1} = Q_N \pm \Delta_L \quad (1.8)$$

En la expresión (1.8):

Q_{N+1} es el caudal después de la corrección, en m^3/s

Q_N es el caudal inicial asumido, en m^3/s

Δ_L es el valor de la corrección, en m^3/s

El signo \pm en la ecuación (1.8) va a depender de las direcciones asumidas inicialmente para Q_N y de Δ_L . Para mantener la continuidad se aplica a cada tubo de la malla la corrección Δ_L , la cual será positiva o negativa en función del sentido de desplazamiento del fluido por el interior de las ramas. Para plasmar una idea más clara acerca del signo del coeficiente Δ_L , según lo planteado en las referencias [3], [18], [21], [22], [24], [25], se deben tener en cuenta dos aspectos fundamentales:

- 1- Cuando el momento producido por el sentido asumido para el desplazamiento del fluido no es en sentido dextrógiro (hacia la derecha) entonces Δ_L es (-).
- 2- Cuando el momento producido por el sentido asumido para el desplazamiento del fluido es en sentido dextrógiro (hacia la derecha) entonces Δ_L es (+).

Teniendo en cuenta estos dos señalamientos, y aplicando la ecuación (1.7-d), se llega a la conclusión que, en general, una ecuación de pérdidas de carga para una malla N, toma la siguiente forma:

$$\sum_N \Delta p = \sum_N (\pm) K_N * Q_N^2 = 0 \quad (1.9)$$

Si se introduce la expresión (1.8) en la (1.9), entonces quedará:

$$\sum_N \Delta p = \sum_N (\pm) K_N * (Q_N \pm \Delta_L)^2 = 0 \quad (1.10)$$

Expandiendo la expresión (1.10) por el teorema del binomio y despreciando los términos que contienen productos de la corrección Δ_L , ya que inicialmente se supuso que este coeficiente es pequeño en comparación con el resto de los términos, se llega a

la expresión obtenida originalmente por Cross⁴, la cual según los autores [1], [3], [5], [7], [12], [13], [18], [23], [24], [25], se formula de la siguiente manera:

$$\Delta_L = - \left[\frac{\sum_N (\pm) K_N * Q_N^2}{\sum_N |2 * K_N * Q_N|} \right] \quad (1.11)$$

La ecuación anterior es la empleada en este método para obtener una corrección para los valores de flujo supuestos inicialmente para cada rama en la red analizada. Debido a que en cualquier red siempre existirán tubos que son compartidos en más de una malla, y a que se despreciaron los términos más pequeños en (1.10) para obtener la ecuación (1.11). Cuando se aplica esta no se obtiene inicialmente valores de corrección que sean capaces de corregir todos los valores de flujo a su magnitud real, sino que lo que proporciona es una mejor aproximación a los valores reales.

Por tanto como se acaba de demostrar, el proceso iterativo debe continuarse, utilizando para esto los nuevos valores de flujo obtenidos a base de la última corrección aplicada, hasta que todas las magnitudes Δ_L en cada malla sean lo suficientemente pequeñas, como para ser despreciadas.

En recientes investigaciones [17], [18], [19], [23], [24], se ha demostrado la posibilidad de una convergencia acelerada de los valores de caudales asumidos inicialmente, incluyéndose además en el proceso iterativo la influencia de las caídas de presiones y tratar a su vez al factor de fricción como otra incógnita.

En la práctica en ocasiones se encuentran casos en que dentro de la red se encuentran instaladas bombas, en ese caso el proceso sufre una modificación, ya que se requiere de una expresión que represente la curva de la carga aportada por la bomba versus la curva de capacidad. Por tanto resulta conveniente en esta situación ajustar una curva polinómica a la curva experimental reportada por el fabricante, para obtener una expresión que sea capaz de dar una aproximación lo suficientemente buena para insertarla en el proceso iterativo a desarrollar, tanto en forma manual como utilizando métodos computacionales, sin que este pierda su nivel de precisión. En la literatura consultada [1], [3], [4], [5], [8], [12], [16], [21], [23], [24], se recomienda se ajuste la expresión mostrada a continuación para obtener la curva característica de carga de la bomba vs flujo:

$$\Psi p \approx \Psi p_0 * (1 + a_1 * Q + a_2 * Q^2 + \dots + a_N * Q^N) \quad (1.12)$$

⁴ H Cross, "Analysis of flow in networks of conduits and Conductors", Univ. Illinois Eng. Expt. Sta., Bull. 286, 1936

En la expresión anterior:

Ψ_p es la carga aproximada de la bomba bajo las condiciones de operabilidad de la red, en m.

Ψ_{p_0} es la carga nominal de la bomba en el punto de máxima eficiencia, (dado por el fabricante), en m

Para garantizar el nivel de precisión en el análisis se tomaran cuantos coeficientes a sean necesarios, con lo cual se coincide ya que esto es una exigencia para ajustar por regresión modelos matemáticos con alta confiabilidad estadística.

Bibliografía:

- 1- Agüera Soriano, José, Mecánica de fluidos, Publicado por Ciencia 3. Distribución, S.A., Buenos Aires, 2005,
- 2- Bejan, A. Rules of Thumbs by Mechanical Engineers. Ed. McGraw Hill, New York, 1998.
- 3- Bergada Graño, J. M. , Problemas resueltos de Mecánica de los fluidos, Ed: Edición UPC, Madrid , España, 2006,
- 4- Bird, R., et al. Fenómenos de transporte. Ed. Continental, Madrid, 1992
- 5- Camaraza, Y. Selección y elementos para la explotación eficiente de un intercambiador de calor para el enfriamiento del aire de salida de la primera etapa del compresor multietápico modelo A-12X-10., Trabajo de diploma, 2008.
- 6- Camaraza. Y. y J. Landa. Nueva ecuación para la determinación del factor de fricción en tuberías rectas (no publicado), UMCC, 2008
- 7- Camaraza. Y, Landa. J, García. O, Ecuación explícita para el cálculo de los factores de fricción, publicado en el CD de monografías 2008, Universidad de Matanzas, Cuba, 2008
- 8- Camaraza. Y. et al, Ecuación explícita para el cálculo de factores de fricción en la zona de transición del régimen turbulento, disponible en <http://www.monografias.com/trabajos-pdf3/ecuacion-explicita-calculo-friccion/ecuacion-explicita-calculo-friccion.shtml>
- 9- Çengel, Yunus et al. , Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones Ed: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2007,
- 10- Chen, Liu et al. Civil Engineers Handbook. Ed. CRC Press , Michigan University , EUA, 2007

- 11- Crespo Martínez, Antonio , Mecánica de fluidos, Ed: Reverte, Barcelona , España, 2006,
- 12- Crane. Flow through valves and pipes, Ed. McGraw Hill, New York, 2004
- 13- Curso de análisis, diseño, operación y mantenimiento de redes hidráulicas a presión, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia, España, 2009,
- 14- Dias Ortiz, J. Ernesto, apuntes de mecánica de fluidos e Hidráulica, Ed: Universidad del valle, Guadalajara, México, 2006,
- 15- Fox, Robert W. et al. Introducción a la mecánica de los fluidos, 3^{RA} edición. Ed. Jhon Willey and Sons, México, 1995.
- 16- Kreit, F., Mechanical Engineers Handbook. University of Colorado, CRC Press, 2000
- 17- Mark's Standard Mechanical Engineers Handbook. University of Colorado, CRC Press, 2001.
- 18- Mott, Robert. L , Mecánica de los fluidos, Ed: Pearson Educación, Cantabria, España, 2007,
- 19- Nayyar Mohinder L. Introduction to pipe systems. Ed. Jhon Willey and Sons, Georgia, 2002.
- 20- Pavlov, D. y colaboradores. Ejercicios y problemas para el curso de operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. Ed. Mir, 1988.
- 21- Perry, R. et al. Chemical Engineers Handbook, Ed. McGraw Hill, 7th Edition, 1999.
- 22- Shames, I. Mecánica de Fluidos. Ed. McGraw Hill, México. 2001.
- 23- Streeter, V. L. Mecánica de Fluidos. Ed. McGraw Hill, México. 2000.
- 24- White, F. Fluid Mechanics. Ed. McGraw Hill, Georgia City, 2001.
- 25- Vennard, J. et al. Elementos de mecánica de los fluidos. Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1988.