

EL BALANCE ENERGÉTICO EN TUBERIAS SIMPLES APLICADO A LA INGENIERÍA HIDRÁULICA

ENERGY BALANCE IN SIMPLE PIPES APPLIED TO THE HYDRAULIC ENGINEERING

Autores: Roberto Ramírez Zamora

Oscar Brown Manrique

Pedro León Balbón

Institución: Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Cuba

Correo electrónico: robertomr52@nauta.cu

RESUMEN

Se muestran los resultados de una investigación realizada en el municipio Ciego de Ávila, se presenta la evolución de la Mecánica de los Fluidos a partir de las investigaciones realizadas por científicos de diferentes nacionalidades basados en el trabajo experimental para el cálculo de las pérdidas hidráulicas en tuberías simples. Se muestra el aporte de científicos rusos como Konakov, Nikuradze y Altshul en la estimación del coeficiente de rozamiento y los criterios de Altshul, Karev y Levkoeva para la obtención del coeficiente de resistencia local. El diámetro de tuberías simples puede calcularse a partir de la ecuación de Aidarov, Golovanov y Mamaev. Estos resultados se usan por los estudiantes de la carrera Ingeniería Hidráulica en la Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez.

Palabras clave: Balance de energía, Coeficiente de rozamiento, Ecuación de Bernoulli.

ABSTRACT

The evolution of the Fluids Mechanics from the investigations carried out for scientific of different nationalities based on the experimental work for the hydraulic calculation of the lost in simple pipes is presented. The contribution of Russian scientists is shown as Konakov, Nikuradze and Altshul in the estimate of the friction coefficient and the approaches of Altshul, Karev and Levkoeva for the obtaining of the coefficient of local resistance. The diameter of simple pipes can be calculated from the equation of Aidarov, Golovanov and Mamaev. These results are used by the students of the Hydraulic Engineering career in the University of Ciego de Ávila Máximo Gómez Baez.

Keywords: Bernoulli equation, Coefficient of friction, Energy balance.

INTRODUCCIÓN

La mecánica de fluidos tiene sus orígenes en la hidráulica, tanto en Mesopotamia como en Egipto, alrededor del año 4000 antes de nuestra era proliferaron las obras hidráulicas que aseguraban el regadío de vastas zonas. Posteriormente, los imperios como el griego, el chino y especialmente el romano se caracterizaron por una gran profusión de las construcciones hidráulicas. A lo largo de la historia, aparecen inventos e investigadores que aportan mejoras sustanciales en el campo que hoy se denomina mecánica de fluidos, algunas de las cuales según Bergadá (2016) son las realizadas por: Arquímedes (287-212 a.c.), Leonardo da Vinci (1452-1519), Pascal (1623-1662), Newton (1642-1727), Henry de Pitot (1695-1771), Bernoulli (1700-1782), Euler (1707-1783), Venturi (1746-1822), Henri Navier (1785-1836), Ludwig Hagen (1797-1884), Poiseulle (1799-1869), William Froude (1810-1879), G. Stokes (1819-1903), Kirchhoff (1824-1887), Ernst Mach (1838-1916), Reynolds (1842-1912), Ludwig Prandtl (1875-1953), Theodor Von Karman (1881-1963).

En los finales de la década de los años 1700 (siglo XVIII), el estudio de los fluidos fue desarrollado esencialmente por dos grupos: los ingenieros hidráulicos y los matemáticos. Los ingenieros hidráulicos trabajaron desde un punto de vista empírico, mientras que los matemáticos se centraron en enfoques analíticos.

La gran cantidad de experimentos realizados por los ingenieros hidráulicos produjo mucha información con valor incalculable para la hidráulica; sin embargo, debido a la carencia de los beneficios de la generalización propios de una teoría practicable, estos resultados eran restringidos y de valor limitado en situaciones nuevas; mientras tanto, los matemáticos, por el hecho de no aprovechar la información experimental, se vieron forzados a establecer hipótesis tan simplificadas que produjeron resultados a veces completamente opuestos a la realidad. Fue evidente para investigadores eminentes, como Reynolds, Froude, Prandtl y Von Kármán, que el estudio de los fluidos debe ser una mezcla de teoría y experimentación. Con ellos nace la ciencia de Mecánica de Fluidos, tal como se conoce actualmente (Shames, 1995).

La Mecánica de los Fluidos es una de las ciencias que forman la base de toda técnica y se ramifica en varias especialidades como hidráulica, aerodinámica y otras.

Tiene relación con la estática, cinemática y dinámica de los fluidos, ya que el movimiento de un fluido se produce debido al desequilibrio de las fuerzas que actúan sobre él (Streeter, 1970).

La Hidromecánica se define como parte de la mecánica que estudia el equilibrio y el movimiento de los líquidos; así como la acción recíproca de las fuerzas del líquido y de los cuerpos sumergidos en él o las superficies que lo limitan (Nekrasov, 1968).

La Hidráulica es una rama de la Mecánica de los Fluidos la cual se define como la ciencia que estudia la aplicación de las leyes de la Hidrodinámica en la solución de problemas prácticos (Álvarez *et al.*, 2018). Durante un largo tiempo la Hidromecánica y la Hidráulica se desarrollaron aisladamente; pero en la actualidad la diferencia entre estas desapareció totalmente. En la actualidad la Hidráulica es la Hidromecánica teórica y técnica (Rabinovich, 1987).

Para la comprensión del fenómeno de movimiento de un líquido por un conducto sometido a una determinada presión, es necesario el análisis de un conjunto de temas relacionados con las propiedades de los fluidos, la ecuación de continuidad, la ecuación de la energía, el flujo con viscosidad dominante y sistemas de tuberías entre otros; por este motivo los estudiantes de la carrera de ingeniería hidráulica deben dominar estos contenidos. En este sentido, el objetivo del trabajo consiste en exponer de forma histórica y precisa, las ecuaciones fundamentales de la Mecánica de los Fluidos en el balance energético de una tubería simple.

DESARROLLO

Los líquidos no soportan esfuerzos cortantes cuando están en equilibrio; sin embargo, los soportan entre capas adyacentes en un movimiento relativo, debido a que tienen viscosidad. Un fluido ideal es aquel que no presenta esfuerzos cortantes, incluso cuando están en movimiento, por lo que las fuerzas superficiales que sobre este ejerzan son debidas a la presión, además de que no tiene viscosidad y por lo tanto no pierden energía mecánica. Si un líquido ideal fluye estacionariamente (a una velocidad constante) a través de una tubería horizontal estrecha y de sección transversal constante, la presión será constante a lo largo de la tubería (Nahid, 2011).

La ecuación de Bernoulli para un fluido ideal en régimen irrotacional es la siguiente:

$$E_1 = E_2 = cte = H \quad (1)$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 = cte = H \quad (2)$$

Donde:

E_1 : energía en el extremo inicial de la tubería (m).

E_2 : energía en el extremo final de la tubería (m).

P_1 : presión en el extremo inicial de la tubería (m).

P_2 : presión en el extremo final de la tubería (m).

γ : peso específico del agua (N m^{-3}).

g : fuerza de gravedad (m s^{-2}).

Z_1 : altura geométrica en el extremo inicial de la tubería (m).

Z_2 : altura geométrica en el extremo final de la tubería (m).

v_1 : velocidad en el extremo inicial de la tubería (m s^{-1}).

v_2 : velocidad en el extremo final de la tubería (m s^{-1}).

H : suma de las energías específicas disponibles en el flujo fluido (m).

Se denomina tubería simple a una tubería sin ramificaciones a través de la cual fluye el líquido por uno de sus extremos debido a la diferencia de energía entre ambos extremos. Este gradiente energético puede ser creado según Pachkov y Dolkachev (1977) debido a los siguientes aspectos:

- Diferencia de presión.
- Diferencia de carga de velocidad.
- Diferencia de altura del líquido.
- Trabajo desarrollado por una bomba.
- Pérdidas hidráulicas entre los extremos de la tubería.

La ecuación de Bernoulli representa para el fluido ideal la conservación de la energía mecánica; sin embargo, para el fluido real expresa el balance energético, el cálculo de las pérdidas hidráulicas que se producen (Tenorio, 2016). Esta ecuación puede aplicarse a cualquier serie de tubos rectos interconectados mediante diferentes clases de accesorios conectores. En esta ecuación la densidad se mantiene constante, pero se tiene en cuenta para los cambios en la energía interna y la transferencia de calor. Su forma de escritura cuando se tiene instalado un

equipo de bombeo es la siguiente:

$$E_1 + H_B = E_2 + \Sigma h_{1-2} \quad (1)$$

$$\left(\frac{P_1}{\gamma}\right) + \left(Z_1 + \frac{v_1^2}{2g}\right) + H_B = \left(\frac{P_2}{\gamma}\right) + \left(Z_2 + \frac{v_2^2}{2g}\right) + \Sigma h_{1-2} \quad (2)$$

Siendo:

$$v_d = \frac{Q}{A_d} \quad (3)$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (4)$$

Donde:

E_1 : energía en el extremo inicial de la tubería (m).

E_2 : energía en el extremo final de la tubería (m).

H_B : carga total de trabajo de la bomba (m).

P_1 : presión en el extremo inicial de la tubería (m).

P_2 : presión en el extremo final de la tubería (m).

γ : peso específico del agua (N m^{-3}).

g : fuerza de gravedad (m s^{-2}).

Σh_{1-2} : pérdidas totales de energía por fricción y localizadas (m).

Z_1 : altura geométrica en el extremo inicial de la tubería (m).

Z_2 : altura geométrica en el extremo final de la tubería (m).

v_1 : velocidad en el extremo inicial de la tubería (m s^{-1}).

v_2 : velocidad en el extremo final de la tubería (m s^{-1}).

A : área de la tubería (m^2).

Caracterización del régimen de movimiento de la corriente

El número de Reynolds es un indicador para caracterizar el régimen de movimiento del líquido se calcula como:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (5)$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (6)$$

Simultaneando la ecuación (5) con la ecuación (6) y simplificando queda:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (7)$$

Donde:

Re : número de Reynolds (adimensional).

ρ : densidad del líquido (kg m^{-3}).

D : diámetro de la tubería (m).

v : velocidad del movimiento del líquido (m s^{-1}).

μ : viscosidad dinámica o absoluta (N s m^{-2}).

ν : viscosidad cinemática ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

Perdidas hidráulicas por rozamiento

Nekrasov (1981) enunció que la corriente turbulenta ocurre con bastante frecuencia en la práctica ingenieril; debido a que el líquido se mueve relativamente con mayor energía y velocidad; por lo que no hay laminación del flujo y el líquido se mezcla, produciéndose pulsaciones de la velocidad y la presión. En estas condiciones las líneas de corriente tienen formas muy variadas a pesar de la rectitud del tubo. De esta manera, se demostró que la corriente turbulenta no es estacionaria; porque la velocidad, la presión y la trayectoria de las partículas del líquido varían con el tiempo.

Por su parte, Rabinovich (1987) señala que la corriente turbulenta es un caso típico del movimiento de un líquido real (viscoso) en el que se originan fuerzas de rozamiento interno que dan lugar en al surgimiento de tensiones tangenciales (τ). Este comportamiento se relaciona con la ley cuadrática de resistencia la cual establece que la tensión tangencial es proporcional al cuadrado de la velocidad; pero solo cuando el número de Reynolds es suficientemente grande, porque en los demás casos del régimen turbulento es un poco menor que el segundo grado y en él la corriente laminar es igual a la unidad. Este caso ocurre cuando el número de Reynolds es pequeño con un valor inferior a 2300, lo que indica que el flujo es laminar y las fuerzas viscosas tienen un efecto dominante en la pérdida de energía (Cengel y Cimbala, 2007).

La ecuación fundamental para el cálculo de pérdidas hidráulicas por rozamiento en tuberías circulares es la de Darcy-Weisbach (Rabinovich, 1987; Schaum Evett y Liu, 2005; Potter y Wiggert, 2007) que tiene la forma siguiente:

$$h_{roz} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

Donde:

f : coeficiente de rozamiento hidráulico o resistencia hidráulica (adimensional).

L : longitud de la tubería (m).

v : velocidad del movimiento del líquido ($m\ s^{-1}$).

D : diámetro de la tubería (m).

g : aceleración de la gravedad ($m\ s^{-2}$).

Estimación del coeficiente de rozamiento hidráulico

El coeficiente de rozamiento hidráulico es función del número de Reynolds, el cual incluye la velocidad el diámetro y la viscosidad. Para la estimación de este parámetro se utilizan diferentes ecuaciones empíricas y semiempíricas que expresan esta relación para la corriente turbulenta entre las que se encuentran las de varios científicos rusos como: P. Konakov, I. Nikuradze y A. D. Altshul.

La ecuación de P. Konakov se utiliza para la estimación del coeficiente de rozamiento hidráulico en tuberías lisas con un límite de aplicación en el entorno de $2300 > Re > 10^5$ (Nekrasov, 1981). Esta ecuación tiene la forma siguiente:

$$f = \frac{1}{(1,81 \log Re - 1,5)^2} \quad (9)$$

La ecuación de I. Nikuradze se utiliza para la estimación del coeficiente de rozamiento hidráulico en tuberías con rugosidades con un límite de aplicación en el entorno de $500 > Re > 10^6$ (Rabinovich, 1987). Nikuradze investigó en el año 1932 la resistencia de varios tubos con rugosidad artificial en su interior, la cual obtuvo pegando granos de arena de determinada dimensión lográndose una rugosidad granulosa uniformemente distribuida. La ecuación propuesta depende de la rugosidad absoluta (e) y el diámetro de la tubería y para la zona rugosa tiene la forma siguiente:

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2 \log \frac{e/D}{3,6} \quad (10)$$

Según Arteaga (1993) I. Nikuradze obtuvo para el régimen turbulento en tuberías lisas con valores de $Re < 10^5$ la siguiente ecuación:

$$f = 0,0032 + \frac{0,221}{\text{Re}^{0,237}} \quad (11)$$

Altshul propuso una nueva ecuación para determinar el coeficiente de rozamiento hidráulico en tuberías con rugosidades reales, la cual depende del número de Reynolds y la dimensión proporcional a la rugosidad absoluta (k') como se muestra en la tabla 1.

$$\frac{1}{f^{1/2}} = 1,8 \log \frac{\text{Re}}{\text{Re} \frac{k'}{D} + 7} \quad (12)$$

Pérdidas hidráulicas localizadas

Las pérdidas hidráulicas localizadas, también llamadas pérdidas secundarias o por accesorios son las que se producen en cualquier perturbación que encuentra la corriente en alguna sección: ensanchamiento, estrangulación, válvulas, codos, curvas, orificios de entrada y de salida, placas orificios, etc. (Nahid, 2011). Las investigaciones sobre las resistencias locales han estado sustentadas en un gran número de trabajos experimentales los cuales permitieron establecer que el coeficiente de resistencia local (ξ) depende no solo del tipo de resistencia local; sino además de número de Reynolds.

Los trabajos desarrollados por A. D. Altshul, V. N. Karev, N. V. Levkoeva y otros científicos demostraron que los mayores cambios de las pérdidas hidráulicas localizadas se producen en el régimen laminar en función del coeficiente de resistencia local ξ y el número de Reynolds (Rabinovich, 1987). La ecuación más empleada para el cálculo de las pérdidas hidráulicas localizadas es la siguiente:

$$h_{loc} = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

Determinación del diámetro en tuberías simples

En el cálculo hidráulico de tuberías simples es muy importante la selección del diámetro de la tubería en correspondencia con los caudales de circulación y las velocidades óptimas del movimiento del líquido. Para el cálculo del diámetro Aidarov, Golovanov y Mamaev, (1985) utilizan la ecuación siguiente:

$$D = 1000 \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot v}} \quad (14)$$

Donde:

D : diámetro de la tubería (mm).

Q : caudal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

v : velocidad del líquido (m s^{-1}).

Aplicación del balance energético en un sistema de abastecimiento de agua

El sistema de abastecimiento de agua bombeo de la Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez consiste de forma general de una cisterna, tubería de succión y descarga, equipo de bombeo y tanque de almacenamiento (Figura 1).

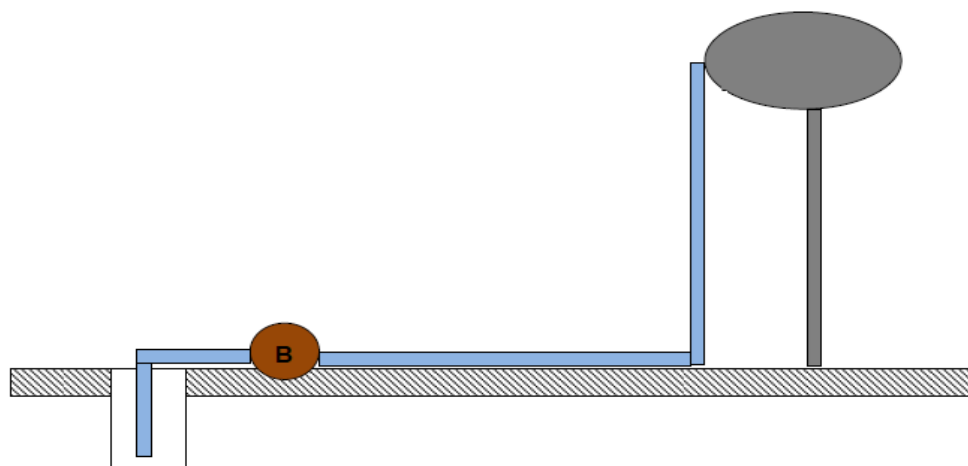


Figura 1. Representación esquemática del sistema de abastecimiento.

Según Hernández (2015) la cisterna es de hormigón armado, con capacidad de $849,60 \text{ m}^3$ y dimensiones de 15,00 metros de largo, 11,80 metros de ancho y 3,00 metros de profundidad. La tubería de succión es de hierro galvanizado, con diámetro interior de 110,00 milímetros y longitud de 2,97 metros. La tubería de descarga es también de hierro, con diámetro interior de 110,00 milímetros y longitud de 18,00 metros. La bomba es de tipo centrífuga con un caudal $76,00 \text{ L s}^{-1}$ ($4,76 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$) y velocidad de giro de 1750 revoluciones por minutos (rpm). Este dispositivo crea la energía necesaria para elevar el líquido a un tanque tipo hongo de $25,00 \text{ m}^3$, colocado sobre un fuste de 15,00 metros de altura (Figura 2).



Figura 2. Motor y tanque de almacenamiento del sistema de abastecimiento.

Los resultados del balance energético en el sistema de abastecimiento de agua de la Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez son los siguientes:

- Tiempo de llenado del tanque de almacenamiento: 5,48 minutos.
- Área de las tuberías de succión y descarga: 0,009 m².
- Velocidad del flujo en las tuberías de succión y descarga: 8,00 m s⁻¹.
- Carga de velocidad en las tuberías de succión y descarga: 3,25 m.
- Número de Reynolds en las tuberías de succión y descarga: 110066,68.
- Coeficiente de pérdidas por fricción en las tuberías de succión y descarga: 0,017.
- Pérdida de carga por fricción en la tubería de succión: 1,53 m.
- Pérdida de carga por fricción en la tubería de descarga: 9,27 m.
- Pérdida de carga localizada en la tubería de succión: 8,16 m.
- Pérdida de carga localizada en la tubería de descarga: 5,29 m.
- Carga de trabajo de la bomba: 42,23 m.

CONCLUSIONES

- Los aportes de los científicos de diversos países del mundo en el campo de la hidráulica han sido relevantes desde el punto de vista teórico y experimental. Estos resultados constituyen el fruto de su sistemática dedicación en la demostración y comprobación de sus ideas las cuales han permitido el avance de esta ciencia de gran importancia en la actualidad para el desarrollo de la

infraestructura hidráulica de los países y el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos.

- El legado de los científicos rusos y de otras naciones en esta área del saber constituye la base del conocimiento que reciben los estudiantes de la carrera Ingeniería Hidráulica en la Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez.
- Las evaluaciones hidráulicas realizadas en el sistema de abastecimiento de agua de la Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez se sustenta en el balance energético, el cual permitió la determinación de forma analítica y experimental de diferentes parámetros como: tiempo de llenado del tanque de almacenamiento, área de las tuberías, velocidad del flujo, carga de velocidad, número de Reynolds, coeficiente de pérdidas por fricción pérdidas de carga por fricción y localizada, carga de trabajo de la bomba. También se pudieron estimar parámetros hidráulicos como tirante en la sección transversal; área hidráulica; perímetro mojado; pendiente y caudal de circulación del flujo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIDAROV, I. P., GOLOVANOV, A. I., MAMAEV, M. G. (1985). El riego. Moscú : Ed. MIR, pp. 367.
- ÁLVAREZ, M. J. ... [et al.] (2018). Hidráulica aplicada para Ingenieros civiles. Ecuador : Ed. Área de Innovación y Desarrollo, S.L. Portoviejo, pp. 180.
- ARTEAGA, R. E. (1993). Hidráulica elemental. México: Ed. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco. pp. 331.
- BERGADÁ, J. M. (2016). Mecánica de fluidos. Problemas resueltos. Barcelona : Ed. Universitat Politècnica de Catalunya, pp. 414.
- CENGEL, Y. A. y CIMBALA, J. M. (2007). Mecánica de Fluidos, Fundamentos y Aplicaciones. México : Ed. Mc Graw Hill, pp. 350.
- HERNÁNDEZ, F. (2015). Evaluación de la eficiencia energética del sistema de bombeo de agua en la Universidad de Ciego de Ávila. Tesis de Maestría en Eficiencia Energética. Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez, Ciego de Ávila, Cuba, pp. 50.
- NAHID, V. (2011). Dinámica de los fluidos reales. Argentina : Ed. Universidad Tecnológica Nacional, pp. 34.
- NEKRASOV, B. (1981). Hidráulica. Moscú : Ed. MIR, pp. 432.

- PACHKOV, N. N. y DOLKACHEV, F. M. (1977). Hidráulica y máquinas hidráulicas. Moscú : Ed. MIR, pp. 341.
- POTTER, M. C. y WIGGERT, D. C. (2007). Mecánica de fluidos. México : Ed. Thomson Learning, pp. 362.
- RABINOVICH, E. Z. (1987). Hidráulica. Moscú : Ed. MIR, pp. 317.
- SCHAUM, R. V. G., EVETT, J. B., y LIU, C. (2005). Mecánica de los fluidos e Hidráulica. Madrid : Ed. McGraw–Hill, pp. 475.
- SHAMES, I. H. (1995). Mechanics of fluids. Colombia : Ed. McGraw-Hill, Inc. pp. 825.
- STREETER, V. L. (1970). Mecánica de los fluidos. México : Ed. McGraw-Hill, Inc., pp. 747.
- TENORIO, B. (2016). Cuaderno de Ejercicios de Propiedades de los Fluidos Petroleros. Material Didáctico. México : Ed. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 246.