# Optimización energética de redes hidráulicas mediante el análisis de las pérdidas por fricción superficial y resistencia de forma

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 12 de octubre 2026

Tiffany Noemí Rodríguez Mendoza, Mariana René Cáceres Martinez, Kelvin Esaú Espinoza Zárate, Yenifer Lizeth Merida Juarez, Herson Ubaldo Santos González[1]

## RESUMEN

En este estudio de simulación hidráulica se evaluó el comportamiento gráficamente de la capacidad de bombeo respecto a la energía disipada por fricción de superficie y de forma, realizando variaciones de caudales y diámetro para determinar cómo impacta dichas energías en un sistema de tubería y accesorios. Se calcularon variables como factores de fricción, número de Reynolds, áreas internas, entre otras variables, con el fin de calcular la capacidad de bombeo, observando gráficamente el comportamiento tras las variaciones de caudal y diámetro. Se determinó que, tras incrementar el caudal del sistema, incrementa la energía disipada por fricción de superficie y forma, por consiguiente, incrementó la capacidad de bombeo tras estas variaciones. De la misma manera, tras realizar incrementos de diámetro de tubería, se obtuvieron disminuciones de las energías por fricción de superficie y forma, por ende, también en la capacidad de bombeo. Se concluyó que el incremento del caudal aumenta las pérdidas por fricción y la capacidad de bombeo requerida, mientras que el aumento del diámetro reduce dichas pérdidas y mejora el desempeño hidráulico del sistema.

**Palabras claves**: Capacidad de bombeo, fricción de superficie, fricción de forma, número de Reynolds, diámetro de tuberías, accesorios y análisis hidráulico.

## ABSTRACT

In this hydraulic simulation study, the pumping capacity was graphically evaluated with respect to the energy dissipated by surface and form friction. Variations in flow rate and pipe diameter were applied to determine how these energy losses affect a piping system and its fittings. Variables such as friction factors, Reynolds number, internal cross-sectional areas, and other hydraulic parameters were calculated in order to determine the pumping capacity and analyze its behavior under different flow rates and pipe diameters.

The results showed that increasing the system flow rate led to higher energy losses due to both surface and form friction. Consequently, the required pumping capacity also increased. Similarly, increasing the pipe diameter

[1] Estudiantes de último año de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Email: 2980986520101@ingenieria.usac.edu.gt, 3020718810101@ingenieria.usac.edu.gt, *k3lvineez12@gmail.com*, *ymerida2002@gmail.com*, *3440036040923@ingenieria.usac.edu.gt*

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 12 de octubre 2026

resulted in lower surface and form friction losses, which in turn reduced the pumping capacity required by the system.

It was concluded that increasing the flow rate raises friction losses and the pumping capacity required, whereas increasing the pipe diameter reduces these losses and improves the overall hydraulic performance of the system.

**Keywords:** Pumping capacity, surface friction, form friction, Reynolds number, pipe diameter, fittings and hydraulic analysis.

## INTRODUCCIÓN

En el siguiente artículo titulado evaluación del impacto de la capacidad de bombeo respecto a la energía disipada por fricción de superficie y fricción de forma en redes de flujo complejas, se realiza un análisis del comportamiento de la capacidad de bombeo ($h_B$) de un sistema de tubería de acero y accesorios, comprendiendo cómo varía la energía disipada por fricción de superficie y forma tras la variación de diámetros y caudales.

Es importante señalar que el sistema de tubería y accesorios fueron propuestos a criterio propio, ya que se busca evaluar el comportamiento de capacidad de bombeo con respecto a las energías disipadas por fricción de superficie y forma. Asimismo, valores de propiedades físicas del agua, coeficientes de resistencia de accesorios y ecuaciones a emplear, fueron consultados en distintas bibliografías.

El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto de la energía disipada por fricción de superficie y fricción de forma sobre la capacidad de bombeo en una red de flujo compleja, analizando el efecto de diferentes caudales y diámetros de tubería sobre el comportamiento hidráulico del sistema.

## METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Para determinar la capacidad de bombeo requerida del sistema a diferentes caudales de operación para tuberías de acero de 2, 3 y 4 pulgadas de diámetro nominal, se realizó un análisis donde se utilizaron las propiedades físicas del agua a 25 °C, 100 metros de tubería de acero (Rugosidad=4.6E-05 m) y se tomaron en cuenta los accesorios presentes en el sistema, debido a que estos generan pérdidas de energía que afectan directamente el desempeño de la bomba.

En un sistema de transporte de fluidos, la energía requerida para el bombeo está influenciada por diferentes variables hidráulicas. Entre las más importantes se encuentran el caudal de operación, el diámetro de la tubería, la longitud de conducción, la velocidad del fluido, la rugosidad interna del material y la cantidad de accesorios instalados. La combinación de estas variables determina la magnitud de las pérdidas de carga que deben ser vencidas para garantizar el flujo deseado.

Como punto de partida, se consulta en el apéndice C-6a el diámetro interno de la tubería a trabajar, a partir del diámetro nominal. (Foust, Alan S. 2006)

Posterior a ello se calcula el área transversal de cada tubería, ya que esta

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 12 de octubre 2026

permite relacionar el caudal con la velocidad de circulación del fluido. Para ello se emplea la siguiente expresión:

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

A partir del área obtenida se calcula la velocidad del agua para cada condición de operación mediante la ecuación de continuidad:

$$v = \frac{Q}{A}$$

La velocidad representa una variable de gran importancia dentro del análisis hidráulico, debido a que influye directamente sobre las pérdidas de energía. A medida que la velocidad aumenta, las pérdidas por fricción se incrementan considerablemente, provocando un mayor requerimiento de potencia por parte de la bomba.

Para el cálculo del número de Reynolds se determina por medio de la siguiente ecuación, el cual ayudará a clasificar si el flujo es laminar o turbulento. (Crowe, Clayton T. 2006)

$$Re = \frac{v\phi\rho}{\mu}$$

Para el cálculo del factor de fricción, se empleó la ecuación de P. K. Swamee y A. K. Jain, el cual permite el cálculo directo del valor del factor de fricción para flujo turbulento (5E+05<Re<1E+08) (Mott, Robert L. 2006)

$$f = \frac{0.25}{[Log(\frac{\epsilon/\phi}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}})]^2}$$

Posteriormente, se evalúa las pérdidas por fricción desarrolladas a lo largo de la tubería mediante la ecuación de Darcy-Weisbach (Mott, Robert L. 2006)

$$h_L = f\left(\frac{L}{D}\right)\frac{V^2}{2g}$$

Esta ecuación relaciona las pérdidas de energía con la longitud de la tubería, el diámetro interno, la velocidad del fluido y el factor de fricción, siendo uno de los métodos más utilizados para el análisis de sistemas de conducción de fluidos.

Además de las pérdidas por fricción, se consideraron las pérdidas ocasionadas por accesorios como codos, tes, válvulas. Aunque estos elementos ocupan una longitud reducida dentro de la instalación, generan cambios en la dirección o velocidad del flujo que producen pérdidas adicionales de energía. Para su cálculo se utiliza el método de longitud equivalente (Mott, Robert L. 2006)

$$h_R = f\left(\frac{L_e}{D}\right)\frac{V^2}{2g}$$

Finalmente, la capacidad de bombeo requerida se obtiene considerando tanto las pérdidas por fricción como las pérdidas menores y la carga estática del sistema:

$$h_B = h_L + h_R + h_S$$

Los resultados permiten comparar el comportamiento hidráulico para cada diámetro analizado e identificar el efecto que tienen el caudal y el tamaño de la tubería sobre las pérdidas de carga y los requerimientos de bombeo.

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 12 de octubre 2026

Tabla 1. Coeficientes de resistencia para válvulas y acoplamientos

| # | Accesorio | Longitud equivalente en diámetros de tubería Le/D |
|---|---|---|
| 11 | Codo 90° | 30 |
| 16 | Tes | 20 |
| 1 | Válvula de globo | 340 |
| 4 | Válvula de pie | 75 |
| Total | | 1290 |

*Fuente: Mott, Robert L. 2006*

Tabla 2. Propiedades físicas del agua @ 25 °C

| | | |
|---|---|---|
| Densidad | 997 | kg/m3 |
| Viscosidad | 0.00089 | Pa*s |
| Gravedad | 9.81 | m/s2 |

*Fuente: Perry, Robert H. 2008*

## MUESTRA DE CÁLCULO

**Cálculo diámetro interno**

$$\phi_{nominal} = 2\ in$$

$$\phi_{interno} = 2.067\ in\ = 0.0525\ m$$

**Cálculo área**

$$\boldsymbol{A = \pi \frac{(0.0525m)^2}{4} = 0.002165\ m^2}$$

**Conversión de caudal**

$$\boldsymbol{\widehat{V} = \frac{250\ \cancel{gal}}{min} * \frac{3.785\ L}{1\ gal} * \frac{1\ m^3}{1000\ L} * \frac{1\ min}{60\ s}}$$

$$\boldsymbol{\widehat{V} = 0.01577\ m^3/s}$$

**Cálculo de velocidad**

$$\boldsymbol{v = \frac{0.01577\ m^3/s}{0.002165\ m^2} = 7.285\ m/s}$$

**Cálculo de Reynolds**

$$\boldsymbol{Re} = \frac{(7.285\ m/s)(0.0525\ m)(997\ kg/m^3)}{0.00089\ Pa.s}$$

$$\boldsymbol{Re = 428460.32}$$

**Cálculo de factor de fricción**

$$(\boldsymbol{\epsilon = 4.6E - 05\ m})$$

$$f = \frac{0.25}{[Log(\frac{4.6E-05m/0.0525}{3.7} + \frac{5.74}{428460.32^{0.9}})]^2}$$

$$f = 0.01991$$

**Cálculo de carga por fricción de superficie $h_L$**

$$\boldsymbol{h_L = 0.01991(\frac{100\ m}{0.0525})(\frac{(7.285\ m/s)^2}{2 * 9.81 m/s^2})}$$

$$\boldsymbol{h_L = 102.57\ J/N}$$

**Cálculo de carga por fricción de forma $h_R$**

$$\boldsymbol{h_R = 0.01991(\frac{(7.285\ m/s)^2}{2 * 9.81 m/s^2})[1290]}$$

$$\boldsymbol{h_R = 69.47\ J/N}$$

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 12 de octubre 2026

**Cálculo de carga estática $h_s$**

$$h_S = 10\,m = 10\,J/N$$

**Cálculo de capacidad de bomba $h_B$**

$$\boldsymbol{h_B = 102.57 + 69.47 + 10}$$

$$\boldsymbol{h_B = 182.04\,J/N}$$

***El cálculo se repite para cada caudal y diámetro***

## RESULTADOS

Tabla 3. Capacidad de bombeo $h_B$ para un diámetro nominal de 2 in a distintos caudales

| Caudal (gal/min) | $h_L$ (J/N) | $h_R$ (J/N) | $h_B$ (J/N) |
|---|---|---|---|
| 250.0 | 102.57 | 69.46 | 182.03 |
| 500.0 | 402.05 | 272.29 | 684.34 |
| 750.0 | 897.86 | 608.07 | 1515.93 |
| 1000.0 | 1589.86 | 1076.74 | 2676.60 |
| 1250.0 | 2478.03 | 1678.24 | 4166.27 |

*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 4. Capacidad de bombeo $h_B$ para un diámetro nominal de 3 in a distintos caudales

| Caudal (gal/min) | $h_L$ (J/N) | $h_R$ (J/N) | $h_B$ (J/N) |
|---|---|---|---|
| 250.0 | 13.50 | 13.57 | 37.06 |
| 500.0 | 52.07 | 52.35 | 114.42 |
| 750.0 | 115.53 | 116.15 | 241.68 |
| 1000.0 | 203.85 | 204.93 | 418.78 |
| 1250.0 | 317.00 | 318.68 | 645.68 |

*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 5. Capacidad de bombeo $h_B$ para un diámetro nominal de 4 in a distintos caudales

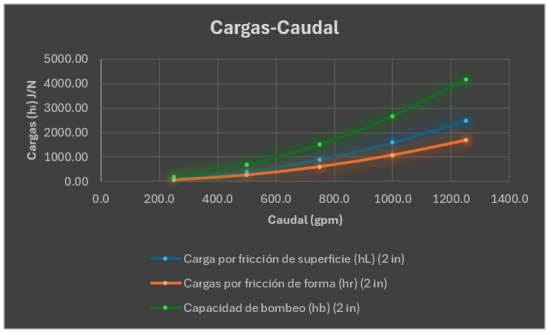
| Caudal (gal/min) | $h_L$ (J/N) | $h_R$ (J/N) | $h_B$ (J/N) |
|---|---|---|---|
| 250.0 | 3.39 | 4.48 | 17.87 |
| 500.0 | 12.90 | 17.02 | 39.92 |
| 750.0 | 28.43 | 37.51 | 75.94 |
| 1000.0 | 49.96 | 65.93 | 125.89 |
| 1250.0 | 77.50 | 102.27 | 189.77 |

*Fuente: Elaboración propia*

Figura 1. Comportamiento de cargas por fricción de superficie, forma y capacidad

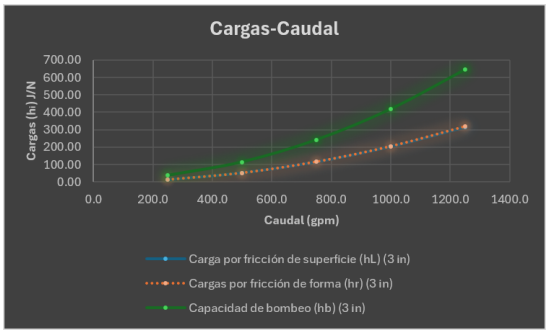
Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 12 de octubre 2026

de bomba a distintos caudales en tubería de 2 in.



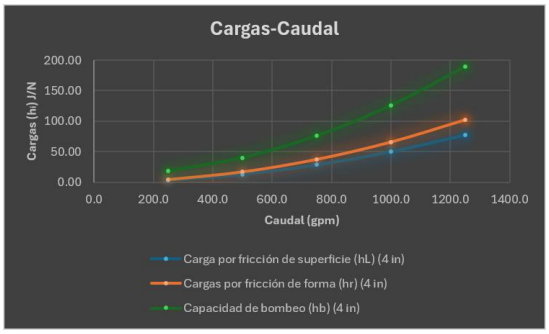

*Fuente: Elaboración propia*

Figura 2. Comportamiento de cargas por fricción de superficie, forma y capacidad de bomba a distintos caudales en tubería de 3 in.



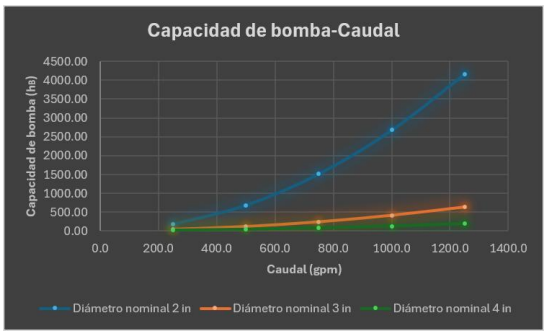

*Fuente: Elaboración propia*

Figura 3. Comportamiento de cargas por fricción de superficie, forma y capacidad de bomba a distintos caudales en tubería de 4 in.




*Fuente: Elaboración propia*

Figura 4. Comportamiento de capacidad de bomba a distinto diámetros y caudales.




*Fuente: Elaboración propia*

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos evidencian la influencia significativa del diámetro de la tubería sobre las pérdidas de energía por fricción y, por consiguiente, sobre la capacidad de bombeo requerida para transportar el fluido. Se observó que, para todos los diámetros analizados, el incremento del caudal produjo un aumento tanto de las pérdidas por fricción en la superficie como de las pérdidas por fricción de forma, lo que ocasionó un incremento de la carga total de bombeo. Este comportamiento concuerda con los principios del flujo de fluidos en tuberías, donde las pérdidas de energía aumentan conforme se incrementa la velocidad y el caudal del fluido (Geankoplis, 2003; McCabe, Smith & Harriott, 2007).

Para la tubería de 2 pulgadas, las pérdidas fueron considerablemente mayores. A un caudal de 250 gal/min se obtuvo una carga de bombeo de 182.03 J/N, mientras que a 1250 gal/min esta

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 12 de octubre 2026

aumentó hasta 4166.27 J/N. Este comportamiento se debe al aumento de la velocidad del fluido en conductos de menor diámetro, lo que genera mayores pérdidas por fricción y, por tanto, una mayor demanda energética. Según Coulson, Richardson, Backhurst y Harker (2004), para un mismo caudal, una disminución del diámetro de la tubería provoca un incremento de la velocidad del fluido y, en consecuencia, un aumento significativo de las pérdidas de carga.

En el caso de la tubería de 3 pulgadas, se observó una reducción significativa de las pérdidas respecto al diámetro anterior. Por ejemplo, a 250 gal/min la carga total de bombeo fue de 37.06 J/N, y para 1250 gal/min alcanzó 645.68 J/N, lo que representa una disminución considerable en comparación con la tubería de 2 pulgadas. Esto demuestra que el aumento del diámetro favorece un flujo más eficiente al reducir la velocidad del fluido y las pérdidas asociadas, tal como describen Geankoplis (2003) y McCabe *et al*. (2007)
La tubería de 4 pulgadas presentó los menores valores de pérdidas de carga. La energía requerida para el bombeo varió desde 17.87 J/N para un caudal de 250 gal/min hasta 189.77 J/N para 1250 gal/min. Estos resultados indican que los diámetros mayores permiten minimizar la disipación de energía por fricción tanto en la superficie como en los accesorios, mejorando el desempeño hidráulico del sistema. Este comportamiento coincide con lo reportado por Vidal, Maury y Chipana (2010), quienes destacan que una adecuada selección del diámetro contribuye a optimizar la eficiencia energética de los sistemas de bombeo.

Asimismo, se observa que las pérdidas por fricción de forma, originadas por los accesorios presentes en la red (codos de 90°, tes, válvula de globo y válvula de pie), contribuyen de manera importante a la carga total de bombeo. Sin embargo, las pérdidas por fricción en la tubería tienden a ser predominantes, especialmente a caudales elevados y en diámetros pequeños. De acuerdo con Geankoplis (2003), las pérdidas menores producidas por accesorios pueden representar una fracción significativa de la pérdida total de energía del sistema, dependiendo de la cantidad y tipo de elementos instalados.

En general, los resultados muestran una relación directamente proporcional entre el caudal y la energía requerida para el bombeo, y una relación inversamente proporcional entre el diámetro de la tubería y las pérdidas de carga. Por ello, aunque la instalación de tuberías de mayor diámetro implica un mayor costo inicial, su utilización puede traducirse en una reducción significativa del consumo energético y en una mayor eficiencia operativa del sistema de transporte de fluidos. Estos resultados son consistentes con los fundamentos presentados por McCabe et al. (2007), Coulson et al. (2004)

## CONCLUSIONES

1. Se determinó que el incremento del caudal provoca un aumento significativo de las pérdidas de energía por fricción de superficie y fricción de forma dentro de la red

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 12 de octubre 2026

hidráulica. Este comportamiento se debe al aumento de la velocidad del fluido, lo que genera una mayor resistencia al flujo y, en consecuencia, una mayor demanda de capacidad de bombeo para garantizar el transporte del fluido a través del sistema.

2. Se estableció que el diámetro de la tubería es una de las variables de mayor influencia en el desempeño hidráulico de la red. Los resultados evidenciaron que, al aumentar el diámetro, disminuyen las velocidades de flujo y las pérdidas de carga asociadas, permitiendo reducir la energía requerida por la bomba y mejorando la eficiencia general del sistema.
3. Se identificó que las pérdidas por fricción de superficie representan la principal contribución a la pérdida total de energía en la red analizada. Sin embargo, los accesorios presentes en el sistema también generan pérdidas de forma que deben ser consideradas durante el diseño y la evaluación hidráulica, ya que pueden afectar significativamente la capacidad de bombeo requerida.
4. Se comprobó que existe una relación directa entre la velocidad del fluido y la disipación de energía dentro de la red. A medida que la velocidad aumenta debido a mayores caudales o menores diámetros de tubería, se incrementan las pérdidas por fricción, lo que repercute en mayores requerimientos energéticos para mantener las condiciones de operación establecidas.
5. Se concluyó que la selección adecuada del diámetro de tubería constituye un aspecto fundamental para optimizar el funcionamiento de una red de flujo compleja. Una correcta elección permite minimizar las pérdidas de energía, reducir la potencia requerida por los equipos de bombeo y favorecer una operación más eficiente desde el punto de vista técnico y económico.

## Bibliografía

Alan S. Foust, Leonard A. Wenzel, Curtis W. Clump (2006) Principios de Operaciones Unitarias (Segunda edición). Belotserkouski, O., & Khlokov, I. (2010). *Monte Carlo Methods in Mechanics of Fluids and Gas.* EEUU: Editorial Word Scientific.

Brooks, S., Gelman, A., Jones, G., & Li-Meng, X. (2011). *Handbook of Markov Chain Monte Carlo.* Boston: Chapman and Hall/CRC.

Dimov, I. (2008). *Monte Carlo Methods for Applied Scientists.* Estados Unidos de América: Editorial Word Scientific.

Shonkwiler, R., & Mendivil, F. (2009). *Explorations in Monte Carlo Methods.* London: Springer.

Ganapathy. (1988). *Applied Heat Transfer.* EEUU: PennWell. Retrieved from 0 87814 182 0

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 12 de octubre 2026

Geankoplis, C. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles* (Fourth ed.). Delhi: PHI Learning. Obtenido de 978 81 203 2614 9

David F. Dyer (1981) Boiler Efficiency Improvement, Boiler Efficiency Institute, Alabama

IPS ingenieros. (2021). *Importancia y Dimensionamiento de Manifold de Vapor*. Retrieved Agosto 24, 2021, from IPS ingenieros: https://ipsingenieros.com/2020/12/11/importancia-y-dimensionamiento-de-manifold-de-vapor/

J.B. Kitto, S. S. (2005). *Steam, its generation and use.* (Vol. 41st). Ohio, United States: The Babcock & Wilcox Company.

López, P. (2017). *Evaluación de la eficiencia de generadores de vapor, Estudio de caso: ECOPETROL S.A.* Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.

McCabe, W., C. Smith, J., & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (Séptima ed.). China: Mc Graw Hill. Retrieved from 0-07-284823-5

}

Roca, S. M. (2007, Octubre). Beneficios en sistemas de vapor por medio de una correcta instalación y selección de trampas. Ciudad de Guatemala, Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

San juan, D. (2016, Abril 4). *Golpe de ariete*. Retrieved Agosto 20, 2021, from 0grados: https://0grados.com.mx/golpe-de-ariete-consecuencias-y-prevenciones/

Spirax sarco. (n.d.). *Spirax Sarco, first for steam solutions.* Retrieved from http://www1.frm.utn.edu.ar/electromecanica/materias%20pagina%20nuevas/INSTALACIONES%20TERMICAS%20MECANICAS%20Y%20FRIGORIFICAS/material/apuntes/01-Distribucion%20de%20Vapor%20-%20Spirax%20Sarco.pdf

Spirax Sarco. (n.d.). Retrieved Septiembre 2, 2021, from https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/steam-engineering-principles-and-heat-transfer/steam-consumption-of-plant-items

TLV Engineering S.A. (n.d.). *TLV*. Retrieved Septiembre 1, 2021, from https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/steam-equipment-energy-saving-tips.html

TLV Engineering SA. (2021). *Golpe de Ariete en Líneas de Distribución de Vapor*. Retrieved from https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/waterhammer-steam-distribution-lines.html#

Toledo López, A. F. (2009, Agosto). *Estudio y experimento del*

Fecha de recepción: 16 de septiembre 2026 Fecha de corrección: 12 de octubre 2026

*fenómeno de golpe de ariete, debido a cierre de válvulas, para el laboratorio de hidráulica.* doi:08_3018_C

Vega. (2018). *Aplicaciones de diferentes tipos de trampas de vapor*. Retrieved Agosto 2021, from TLV: https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/steam-trap-varieties-and-applications.html

Cao, E. (2009). *Heat Transfer.* United States of America: Mc Graw Hill.

Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa - Fundamentos y Aplicaciones _.* México: Mc Graw Hill.

Yoo, D., & Singh, V. P. (2010). Explicit design of commercial pipes with secondary losses. *Journal Of Hydro-environment Research*, *4*(1), 37-45. https://doi.org/10.1016/j.jher.2009.12.003

Ganapathy. (1988). *Applied Heat Transfer.* EEUU: PennWell. ISBN 0 87814 182 0

Geankoplis, C. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles* (Fourth ed.). Delhi: PHI Learning. ISBN 978 81 203 2614 9

HIDRÁULICO EN SISTEMAS DE BOMBEO MINERO: ESTUDIO DE CASO. *Ingeniare. Revista Chilena de IngenieríA*, *18*(3), 335-342. https://doi.org/10.4067/s0718-33052010000300007