

CÁLCULO DEL DIÁMETRO ECONÓMICO DE UN ACUEDUCTO A PRESIÓN, PARA DISTINTOS MATERIALES EN LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN

Autrique Ruiz René¹, Rodal Canales Eduardo²

¹Policonductos, Cracovia 54, San Ángel, Ciudad de México, CP 01000

²Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, CP 04510

¹rautrique@prodigy.net.mx, ²erc@pumas.ii.unam.mx

RESUMEN

Se presenta la función del diámetro económico, *FDE*, que permite calcular el diámetro económico de un acueducto a presión, es decir, aquél que corresponde al costo mínimo de proyecto, considerando los costos de potencia, de tubería, y de energía. Se escoge un acueducto típico de 10 km de longitud, con desniveles topográficos de 50 y de 100 m entre el punto de origen y el de destino, y que conduce desde 0.5 hasta 8 m³/s. Se calculan, para dos materiales, acero de alta resistencia y polietileno de alta densidad (PEAD), los diámetros económicos, las velocidades del agua asociadas, los costos de proyecto y de inversión, los costos unitarios por m³ de agua bombeada, y los costos energéticos, en kWh/m³. Con los resultados y las figuras presentadas se obtiene un panorama general del diseño de los acueductos a presión, y del peso e influencia de las distintas variables involucradas. Se exponen las ventajas y rangos de aplicación de los dos materiales usados en la tubería de conducción.

Palabras clave

Diámetro económico, acueductos, conducciones a presión, transferencia entre cuencas, fricción en tuberías, economía, consumo energético, PEAD, acero de alta resistencia.

1. INTRODUCCIÓN

Los acueductos modernos, que llevan agua de una cuenca a otra y deben vencer los parteaguas que las separan, son cada vez más requeridos para abastecer de agua potable a poblaciones urbanas crecientes, o para suministrar agua de riego a buenos suelos agrícolas que se encuentran en regiones secas. El proyecto de estos acueductos da lugar muchas veces a protestas y a conflictos con la cuenca que debe ceder el agua, mismos que, una vez resueltos con la aceptación de las partes, conducen al diseño del acueducto, que deberá reflejar los mejores criterios tanto económicos como ambientales [1]. Debe resaltarse también que en muchos casos las transferencias de agua entre cuencas son preferibles a la extracción y sobreexplotación de aguas subterráneas en las cuencas de consumo, situación que no es ya sostenible, siendo además que sus profundidades de extracción son muchas veces mayores a los desniveles que puede haber si se transfiere agua de otra cuenca a través de un acueducto.

El cálculo del diámetro económico de la tubería de un acueducto moderno, que conduce agua a presión de una localidad a otra, es un problema antiguo, que debe actualizarse continuamente para considerar los nuevos costos energéticos y los nuevos costos de los materiales de la tubería. En este problema, en el que se conocen tanto el caudal a transportar como la diferencia de alturas entre las dos localidades, debe escogerse el diámetro de la tubería que reduzca al mínimo los costos totales del proyecto, que son esencialmente la potencia requerida para bombear el agua, la energía que se consumirá durante la vida económica del proyecto, y el costo de la propia tubería. Este último costo dependerá de las envolventes presiones máximas y mínimas del acueducto, del material de la tubería y de las propiedades de peso y resistencia mecánica de este material. El problema debe plantearse inicialmente para la línea piezométrica correspondiente al flujo establecido, para posteriormente verificar el resultado obtenido para las condiciones extremas del golpe de ariete. De esta manera, para conocer la carga hidráulica total, deberá sumarse al desnivel topográfico entre las localidades de origen y destino la carga o altura hidráulica perdida por rozamiento o fricción entre el agua y las paredes de la tubería, lo que obligará a comparar entre distintas velocidades de flujo y a emplear las rugosidades y los coeficientes de fricción característicos de los materiales de la tubería. En este trabajo se considerarán únicamente dos materiales: el acero de alta resistencia y el polietileno de alta densidad (PEAD).

Los costos de la potencia instalada, de la energía consumida, y de la tubería son costos que varían en el tiempo y según la región o país, y en el caso del último concepto, la tubería, debemos también considerar la variación en los costos de los diferentes materiales con los que actualmente se fabrican las tuberías. Debe tomarse también en cuenta, para cada material, un valor representativo de su rugosidad, y en etapas de cálculo posteriores, la evolución esperada de esta en el tiempo, a partir de su valor inicial.

El suministro de agua potable es normalmente un servicio gubernamental, y deben definirse, en este tipo de proyectos, para poder presentar y establecer correctamente los criterios para las decisiones de autorización, de inversión y de operación, distintos montos y valores índice, como sigue: 1, Costo total del proyecto, incluidos los costos de energía durante un cierto número de años; 2, Monto total de la inversión, compuesta por el costo de la potencia requerida y el costo de la tubería; 3, Costo anual de la energía requerida por el bombeo; 4, Costos por m³ de agua; y 5, Energía requerida por m³ de agua.

En los apartados que siguen se calcularán y comentarán cada uno de los conceptos anteriores.

2. FUNCIÓN DEL DIÁMETRO ECONÓMICO (*FDE*)

La función del diámetro económico, *FDE*, propuesta aquí para plantear el problema del diámetro económico, se compone de tres elementos:

$$FDE = \text{Costo de potencia (CPot)} + \text{Costo de tubería (CTub)} + \\ + \text{Costo de energía (CEnerg)}$$

Estos tres elementos se definen como sigue:

$$FDE = C_{pot} \left(\frac{\gamma Q}{\eta} H \right) + C_{tub} \gamma_m \pi e (D - e) L + C_{energ} \left(\frac{\gamma Q}{\eta} H \right) t FA \quad (1)$$

En esta función, como se verá más adelante, tanto el costo de potencia como el costo de energía decrecen con el diámetro, mientras que el costo de tubería crece con el diámetro. De esta manera, la función FDE tendrá un costo mínimo, al cual corresponderá el diámetro económico.

El primer elemento, el costo de la potencia, representa la potencia instalada necesaria para conducir el caudal Q hasta una nueva altura $H = H_o + 3 + h_f$, en donde H es la carga hidráulica total, H_o el desnivel topográfico entre las localidades de origen y destino, y h_f la pérdida por fricción. Se han añadido 3 m de sumergencia en el punto de entrega. Se ha considerado que η , la eficiencia del sistema motor-bomba, tiene un valor de 0.85. C_{pot} , que vale 3250 USD/kW en este trabajo, representa el costo de un kW instalado. Este costo incluye un factor de reserva de 1.25, es decir, una bomba de reserva por cada cuatro bombas en operación, y considera también el costo de construcción de la estación de bombeo.

El segundo término representa el costo de la tubería instalada en campo. En esta expresión, D es el diámetro exterior, γ_m el peso unitario (kg/m^3) del material de la tubería, y C_{tub} el costo unitario de la tubería, según el material, en USD/kg. Como puede verse, el costo de la tubería depende tanto de su diámetro como de su espesor, que dependen a su vez de la carga hidráulica y del esfuerzo admisible en el material, así como de las limitaciones que puedan imponerse a la relación D/e para evitar riesgos de colapso. La longitud del tramo de tubería es L . Se consideraron longitudes de 10 y 25 km, ya que, aunque los acueductos pueden ser muy largos, de más de una centena de kilómetros, suelen tener varias estaciones de bombeo, lo que se traduce, al dividir la carga hidráulica total entre el número de estaciones de bombeo, en menores presiones de operación a lo largo del acueducto. En vista de que para los desniveles de cálculo de 50 y 100 m, no se encontraron diferencias en el diámetro económico para las longitudes de 10 y 25 km, se usó una longitud de 10 km para los cálculos subsecuentes. La Tabla 1 muestra los valores típicos usados para los distintos materiales considerados para las tuberías. En este trabajo se consideran dos materiales: el acero de alta resistencia ($\sigma_y = 3500 \text{ kg/cm}^2$, ASTM 572 Gr 50), y el polietileno de alta densidad (PEAD, con resinas PPI PE 4710 [2,3]). Para ambos materiales, se siguieron los criterios de diseño de la American Water Works Association (AWWA, [4,5]). Así, para el acero, el esfuerzo admisible es 0.5 veces su esfuerzo de fluencia (que vale 3500 kg/cm^2), mientras que para el PEAD es 0.625 veces la base de diseño hidrostática (BDH, igual a 112 kg/cm^2).

Tabla 1. Valores característicos de los materiales de la tubería

Material	C_{tub}	γ_m	D/e_{\min}	D_{\max}	D/e_{\max}	e_{\max}	σ
	USD/kg	kg/m^3		m		mm	kg/cm^2
Acero	3.15	7850	150	4.5	50	50	1750
PEAD	2.85	959	30	2.5	7	125	70

El último término de la *FDE* se refiere al valor presente una serie de anualidades que representan el costo energético de bombear, durante 7,300 horas al año (20 horas por día), el caudal requerido. Por cada m³/s bombeado se obtendrán 26.3 millones de metros cúbicos por año. *FA* representa el factor de actualización de la serie de anualidades. En este trabajo, se considera una serie de 10 años y una tasa de actualización del 10% anual. La Tabla 2 muestra otros factores de actualización posibles.

Tabla 2. Factores de actualización (*FA*)

<i>r</i>	10 años	20 años
5	7.722	11.462
6	7.360	11.470
8	6.710	9.818
10	6.145	8.514

Como puede verse en la tabla, el factor de actualización escogido, 6.145, corresponde al mínimo de la tabla. Una mayor cantidad de años, o una menor tasa de actualización, se traducirán en un mayor peso relativo del concepto energía en el valor total del proyecto. Si se escoge, por ejemplo, una tasa de actualización del 5% durante 20 años, el costo de energía se duplicaría. El costo unitario de la energía, C_{energ} , se consideró de 0.10 USD/kWh.

El valor total de la *FDE* representará así el costo total del proyecto, incluida la energía necesaria para su operación durante cierto número de años, típicamente entre 10 y 20 años. El costo de inversión será la suma del costo de potencia y del costo de tubería.

3. DIÁMETRO ECONÓMICO. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO.

El procedimiento es el siguiente:

- 1) Se propone un desnivel H_0 . Se inicia con 50 m y se calcula también para 100 m.
- 2) Se propone un caudal, empezando con $Q = 0.5$ m³/s, y calculando también para $Q = 1, 2, 4$ y 8 m³/s.
- 3) Se propone una velocidad v del agua. El primer valor es 0.8 m/s, y se calcula con incrementos de 0.05 m/s hasta alcanzar 2.8 m/s.

- 4) Se calcula el diámetro interior, con la expresión $D_{int} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$

- 5) Se calcula H con

$$H = H_0 + 3 + \frac{f L Q^2}{12.103 D_{int}^5} \quad (2)$$

- 6) Se calcula e con

$$e = \frac{D_{int} H}{(2\sigma - H)} \quad (3)$$

- 7) Se calcula el diámetro exterior, $D = D_{int} + 2e$

- 8) Se calcula *FDE*

- 9) Se vuelve a (3), para incrementar la velocidad en 0.05 m/s
- 10) Al alcanzar la velocidad máxima del agua, $v = 2.8$ m/s, se vuelve a (2), para incrementar el caudal Q .
- 11) Al terminar los cálculos para $8 \text{ m}^3/\text{s}$, se vuelve a (1), y se calcula para $H_o = 100$ m.

4. INFLUENCIA DEL PERFIL TOPOGRÁFICO DEL TERRENO

Una vez planteada la *FDE*, y su procedimiento de cálculo, debe analizarse la influencia de algunas variables que pueden influir en el resultado. Una de ellas es el perfil topográfico del terreno, que se estudia habitualmente para definir los dispositivos de control ante los efectos de los fenómenos transitorios. Así, por ejemplo, un perfil cóncavo favorecerá la instalación de una cámara de aire, y un perfil altamente convexo hará económica la instalación de una torre de oscilación.

Para este trabajo se estudiaron, con fines de comparación, tres perfiles, el perfil recto, el perfil cóncavo, y el perfil convexo (Figura 1). Para cada uno de ellos se definió la ecuación del perfil topográfico y la expresión para calcular la carga hidráulica aplicable en el tramo del cálculo. La longitud total L se dividió en cinco tramos de cálculo.

Para tuberías de acero, los resultados mostraron igualdad de costos para desniveles bajos ($H_o = 50$ m), al dominar en casi todos los casos el espesor mínimo establecido, mientras que para desniveles altos ($H_o = 300$ m), las diferencias resultaron menores al 3% en costo total y menores al 5% en diámetro económico, al comparar los perfiles cóncavos, más costosos, o los convexos, menos costosos, con el perfil recto.

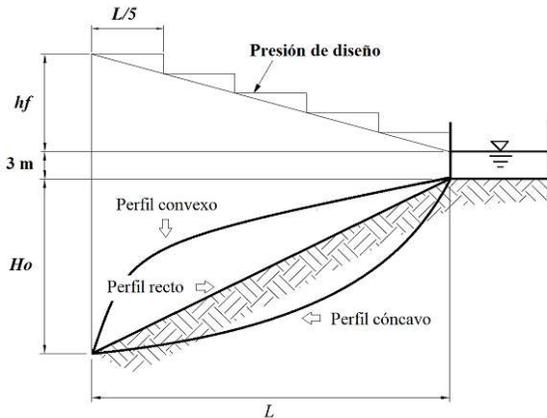


Figura 1. Esquema de la conducción

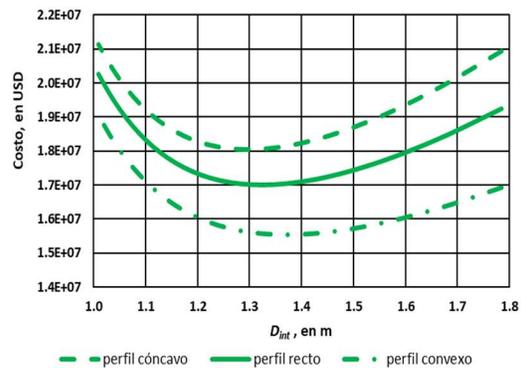


Figura 2. Costos totales de proyecto para perfiles cóncavo, recto y convexo. $H_o=50$ m, $Q=2 \text{ m}^3/\text{s}$, tubería de PEAD.

En el caso del PEAD, la Figura 2 muestra los costos de proyecto y los diámetros económicos para los tres perfiles, para un caudal de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ y un desnivel topográfico H_o de 50 m. En este caso, las diferencias entre los perfiles curvos y el recto son menores al 10% en el costo total, y menores al 5% en el diámetro económico.

En vista de los resultados anteriores, se estableció el perfil recto entre el origen y el destino como perfil de cálculo.

5. INFLUENCIA DE LA FRICCIÓN

La segunda variable a analizar y a definir es la fricción. Se usa aquí, para el cálculo de las pérdidas de carga por fricción, la expresión de Darcy-Weisbach, como se indica en el procedimiento de cálculo del diámetro económico. Para la determinación del coeficiente de fricción f , se usa la expresión explícita de Swamee-Jain [6], en términos de la rugosidad relativa ϵ/D y del número de Reynolds, Re :

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{\epsilon/D}{3.7}\right) + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right]^2} \tag{4}$$

El acero ha sido hasta ahora, junto con el concreto reforzado o presforzado, el material más usado para los acueductos a presión. Se usa para este material una rugosidad absoluta ϵ de 0.05 mm [7]. Para el polietileno de alta densidad (PEAD), que se usa ya también en los acueductos, la recomendación de los manuales de diseño es usar una rugosidad absoluta ϵ de 0.0015 mm [5].

La aproximación de la expresión explícita de Swamee-Jain resultó ser suficientemente exacta, para los fines de este trabajo. Se recalculó en algunos casos el valor de f con la expresión clásica de Colebrook-White, sin encontrar diferencias en las tres primeras cifras significativas. No se consideraron variaciones en el tiempo de los valores de f .

6. PRESENTACIÓN GENERAL DE RESULTADOS

La Figura 3 muestra, para una tubería de acero, $Q=0.5$ m³/s, $H_o=50$ m, y $L=10$ km, los valores del costo total del proyecto, en función del diámetro de la tubería, así como los costos parciales de potencia, energía, y tubería. Los dos primeros decrecen con el diámetro, mientras que el costo de la tubería crece con el diámetro, lo que da lugar a un diámetro, 0.67 m, para el cual el costo es mínimo, en este caso 5.62 M USD.

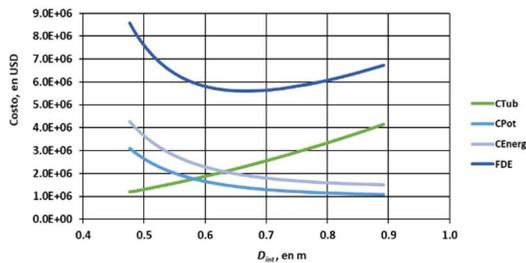


Figura 3. Costos parciales y totales para tubería de acero, $Q=0.5$ m³/s, $L=10$ km y $H_o=50$ m

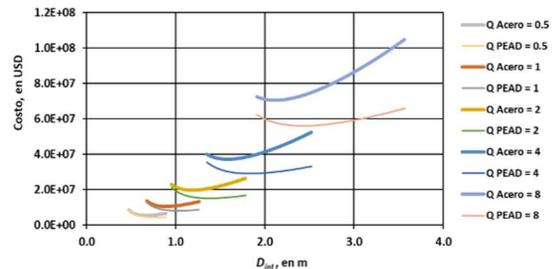


Figura 4. Función del diámetro económico (FDE) para $L=10$ km y $H_o=50$ m

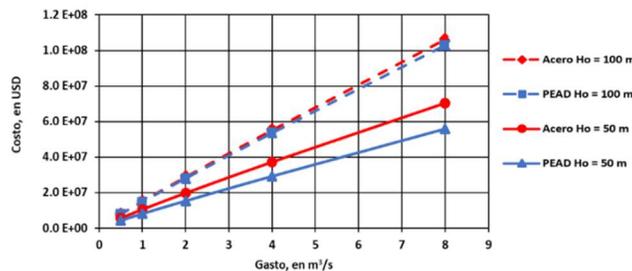


Figura 5. Función del diámetro económico (FDE) para $L=10$ km, $H_o=50$ m y $H_o=100$ m

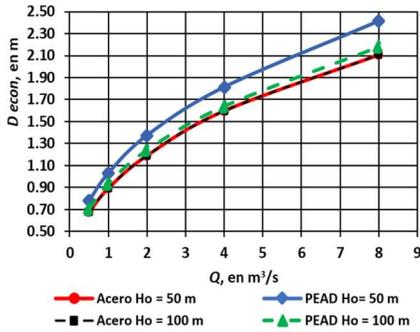


Figura 6. Diámetro económico vs gasto

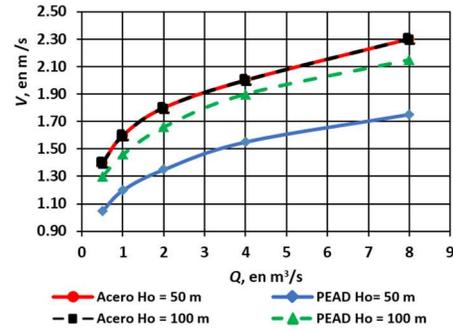


Figura 7. Velocidad asociada al costo mínimo

La Figura 4 muestra las curvas de costos totales para acueductos con $H_o=50$ m y $L=10$ km, para cinco caudales diferentes y para dos materiales en la tubería, acero y PEAD. Con el caudal aumenta el costo y el diámetro económico, y para este desnivel, 50 m, los proyectos con tuberías de PEAD resultan siempre con costos menores a aquéllos que usan tuberías de acero. En la Figura 5 se muestran los costos totales de proyecto en función del caudal Q , para desniveles de 50 y 100 m, y para tuberías de acero y de PEAD. Como puede esperarse, los costos se incrementan con el caudal y con el desnivel, al ser los tres términos de la FDE funciones casi lineales del producto QH_o . El costo del PEAD es bastante menor para un desnivel de 50 m, aunque para un desnivel de 100 m su costo es apenas ligeramente menor al del acero. Las Figuras 6 y 7 muestran los diámetros económicos y sus velocidades asociadas en términos del caudal Q , para los dos materiales y para los dos desniveles topográficos usados. Es de notarse que, en el caso del acero, los diámetros económicos resultan iguales para ambos desniveles, y que en el caso del PEAD los diámetros económicos disminuyen y las velocidades de flujo aumentan al incrementarse el desnivel topográfico. Con el caudal se incrementan tanto los diámetros económicos como las velocidades de flujo.

7. COSTOS POR m^3 DE AGUA

La Figura 8 muestra el costo unitario, por m^3 de agua, en función del diámetro de la tubería, para acero y para PEAD. La Figura 9 muestra los costos unitarios en términos del caudal Q , para desniveles de 50 y 100 m, y para tuberías de acero y PEAD.

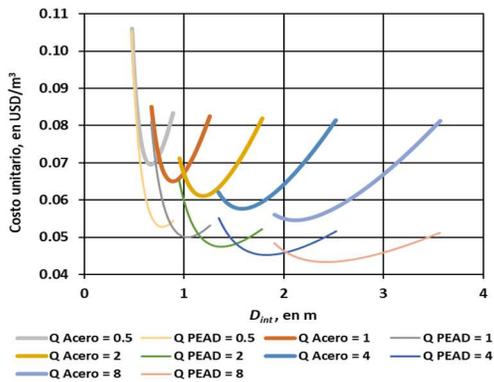


Figura 8. Costo unitario vs diámetro interior

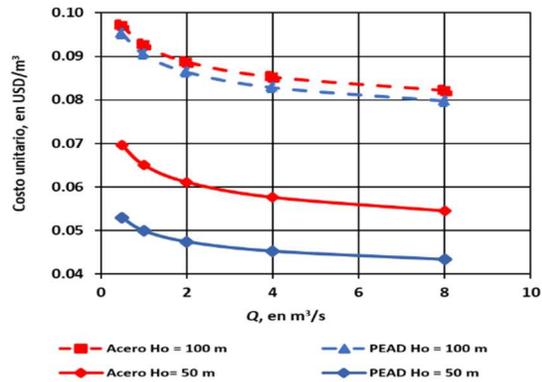


Figura 9. Costo unitario vs gasto

8. ENERGÍA REQUERIDA POR m³ DE AGUA

Igualmente, interesantes son las Figuras 10 y 11, que muestran los consumos energéticos, en kWh por metro cúbico de agua, en función del diámetro y de la velocidad de flujo. Se aprecia que el consumo energético tiende hacia un mínimo, de aproximadamente 0.18 kWh/m³ para 50 m de desnivel y 10 km de longitud, que corresponde a los mayores diámetros y a las menores velocidades, para los casos mostrados. Como los diámetros económicos no son los mayores, los consumos energéticos de un acueducto de costo mínimo serán mayores al valor mínimo mencionado arriba, como puede verse en la Figura 11, que muestra los consumos energéticos correspondientes a los diámetros económicos, en función del caudal Q , y para desniveles de 50 y 100 m y tuberías de acero y PEAD. Es de notarse que consumo para el PEAD, para un desnivel de 50 m, es muy cercano al valor mínimo mencionado arriba.

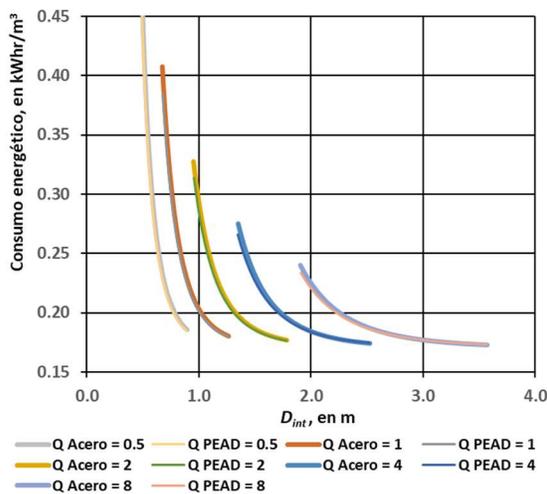


Figura 10. Consumo energético vs diámetro $L = 10$ km y $H_o = 50$ m

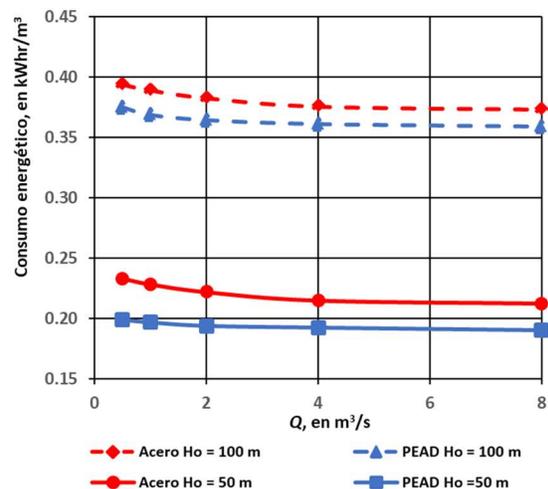


Figura 11. Consumo energético vs gasto $L = 10$ km, $H_o = 50$ y 100 m

9. COSTOS RELATIVOS DE LOS CONCEPTOS POTENCIA, TUBERÍA Y ENERGÍA

Los valores relativos de los conceptos potencia, energía y tubería, para desniveles de 50 y 100 m, aparecen en las Figuras 12, para el acero, y 13, para el PEAD. Es notable, para el caso del acero, la alta variación de los costos relativos al incrementarse el desnivel, y el alto costo de la tubería para $H_o = 50$ m, reflejando en ambos casos la baja eficiencia de este material para desniveles topográficos pequeños. Para el PEAD, es menor la variación de los costos relativos al incrementarse el desnivel, lo que refleja rangos de utilización adecuados. El costo de energía es generalmente el más significativo. Variaciones al alza o a la baja en los costos unitarios definidos para esos tres conceptos traerán incrementos o decrementos en el valor relativo de cada uno de estos conceptos.

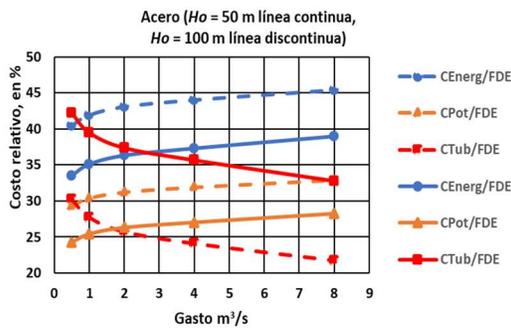


Figura 12. Costos relativos, acero: Potencia, Tubería y Energía. $L=10$ km; $H_o=50$ y 100 m

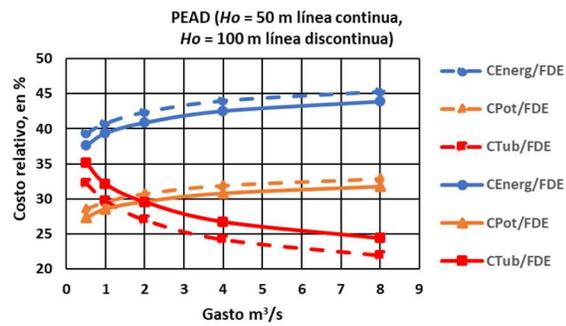


Figura 13. Costos relativos, PEAD: Potencia, Tubería y Energía. $L=10$ km; $H_o=50$ y 100 m

10. RELACIONES ENTRE COSTO DE TUBERÍA Y FRICCIÓN

De acuerdo con Stephenson [8], si buscamos el diámetro óptimo con respecto al caudal, podemos tomar el cociente FDE/Q , derivarlo con respecto a Q , e igualarlo a cero,

$$\frac{\partial FDE/Q}{\partial Q} = 0 \tag{7}$$

Obteniendo

$$2 [C_{pot} + C_{energ} t FA] \frac{\gamma Q h_f}{\eta} = C_{tub} \gamma_m \pi e(D - e) L \tag{8}$$

lo que significa que el costo de la tubería debe ser dos veces el costo de la potencia y la energía requeridas para vencer la fricción. Se llamará $C_{t/f}$ al cociente entre el costo de la tubería y el costo de la fricción, que teóricamente debe ser igual a 2. La Figura 15 muestra los valores de $C_{t/f}$ con respecto al caudal Q , para los diámetros económicos. Estos valores no son los teóricos, pero muestran uniformidad. Para el acero, son casi constantes, así como para el PEAD, para gastos mayores a $2 \text{ m}^3/\text{s}$. De hecho, el valor teórico de 2 se alcanza, en el acero, para diámetros ligeramente menores a los económicos. Lo que la Figura 15 indica es que, para los costos unitarios usados, el costo de la fricción es alto para el acero y bastante menor para el PEAD, con respecto al costo de la tubería. Como referencia, en la Figura 14 se muestran los valores relativos de la carga de fricción con respecto a la carga hidráulica total, para distintos gastos, materiales, y desniveles topográficos.

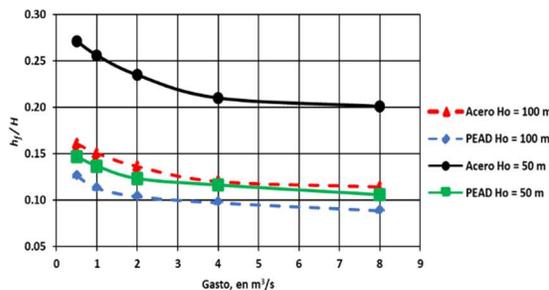


Figura 14. Carga de fricción entre la carga total (h_f/H) en función de Q

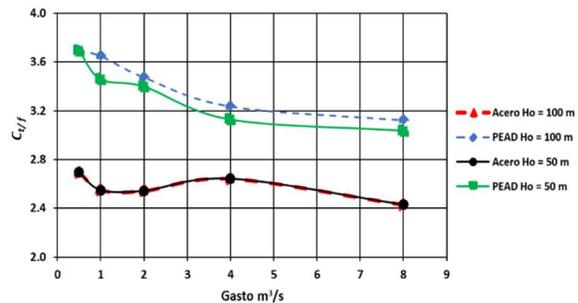


Figura 15. Cociente entre el costo de tubería y costo de la fricción ($C_{t/f}$) en función de Q

11. PESO TOTAL DE LA TUBERÍA A TRANSPORTAR Y KW INSTALADOS

El peso total de la tubería y la potencia instalada requerida pueden ser variables a considerar desde el punto de vista ambiental, mostradas en las Figuras 16 y 17, en toneladas y en kW, en función del caudal Q , para desniveles de 50 y 100 m. Se aprecia la ventaja en peso del PEAD, que para $Ho=50$ m representa el 66% del peso de la solución en acero, aunque para 100 m de desnivel esta ventaja desaparece, siendo mayor el peso del PEAD. La potencia instalada requerida es menor para el PEAD, para ambos desniveles topográficos.

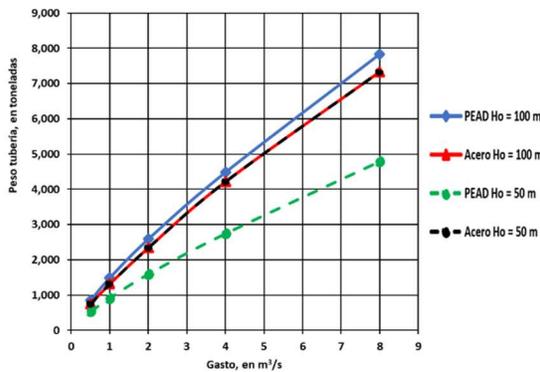


Figura 16. Peso de la tubería en función del gasto

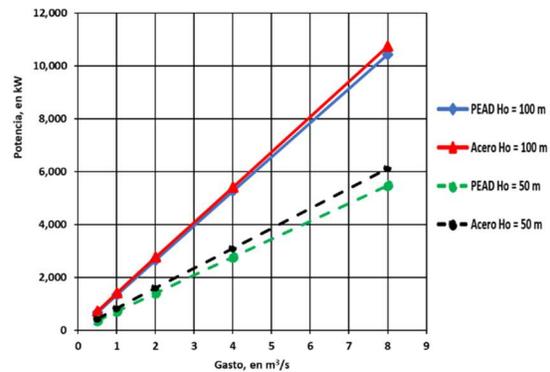


Figura 17. Potencia instalada en función del gasto

El peso total de la tubería de acero para $Ho = 50$ m y $Ho = 100$ m es prácticamente el mismo, dado que el espesor calculado es casi siempre menor al espesor mínimo establecido para evitar riesgo de colapso, $e_{min} = D/150$ [9]. De hecho, esta relación D/e corresponde, para un acero de alta resistencia, a una presión o carga hidráulica de 233 metros de columna de agua, por lo que el uso del acero se justifica plenamente por encima de este último valor.

12. REVISIÓN FINAL POR GOLPE DE ARIETE

La revisión final se hace con las envolventes de presiones máximas y mínimas. En lo que se refiere a las presiones mínimas o depresiones, al escoger las relaciones D/e_{min} de 150 [9] para el acero y de 30 para el PEAD (Tabla 1), se aseguró la protección de las tuberías ante el riesgo de colapso por vacío interno, que representa la situación más extrema y adversa. En cuanto a las sobrepresiones, la norma AWWA permite para el acero una presión 1.5 veces mayor a la del diseño para flujo establecido, y para el PEAD una presión 2 veces mayor. Podemos por tanto considerar que no es necesario modificar los diámetros y espesores calculados para el flujo establecido son válidos también para el flujo transitorio, siendo que las sobrepresiones permitidas por las normas son altas y existiendo los dispositivos de control de transitorios que pueden asegurar sobrepresiones menores a las admisibles [10].

13. CONCLUSIONES

Se presentó una función del diámetro económico, FDE , que permite calcular los diámetros económicos de acueductos a presión, tanto en proyectos genéricos como en proyectos

específicos. Para el caso de los proyectos genéricos, se presentaron figuras e interpretaciones que permiten tener una visión general del problema. Para los proyectos específicos, bastará con aplicar los valores de las variables y los costos unitarios específicos del lugar y del momento.

La *FDE*, que representa el costo total de un acueducto, refleja claramente una relación prácticamente lineal con el caudal Q y el desnivel H_o , al depender los tres términos de la *FDE* ($CPot$, $CTub$, y $CEnerg$) del producto QH_o . Además del costo total, el monto de inversión y el costo energético dependen también directamente del producto QH_o . El costo por m^3 es casi directamente proporcional al desnivel H_o .

El PEAD presenta ventajas para desniveles menores o iguales a 100 m. Estas son las siguientes: menor costo total, menor consumo energético, menor costo por m^3 , menor costo de la tubería, y menor monto de inversión. Sin embargo, tiene algunas limitaciones, impuestas por el espesor máximo de pared (110 mm), ya que su desnivel máximo factible es $H_o=120$ m, para gastos de $1 m^3/s$ y menores. Para $H_o=100$ m, admite un caudal máximo de $2 m^3/s$. Si $H_o=50$ m, el PEAD puede cubrir toda la gama de gastos.

El acero, en cambio, domina en los desniveles mayores a 100 m, alcanzando su mayor eficiencia como material por encima de los 200 m, y en los caudales que requieren grandes diámetros, para los cuales la tecnología actual del PEAD, si bien alcanza diámetros de 2.50 m, no suministra aún los espesores requeridos.

Los pasos siguientes a ejecutar en este trabajo son: 1, Adaptar los resultados a los diámetros y espesores comerciales, ya que aquí se calculó para valores continuos, y 2, Considerar otros materiales para las tuberías, esencialmente concreto y hierro dúctil, y también PVC y PRFV, a pesar de que estos materiales son menos resilientes y sus inconvenientes pueden ser mayores a sus ventajas.

Nomenclatura

$CEnerg$	Costo total del concepto energía, en USD
$CPot$	Costo total del concepto potencia, en USD
$CTub$	Costo total del concepto tubería, en USD
C_{energ}	Costo unitario de la energía, en USD/kWh
C_{pot}	Costo unitario de la potencia, en USD/kW
C_{tub}	Costo unitario de la tubería, en USD/kg
$C_{t/f}$	Cociente entre el costo de la tubería y el costo de la fricción
D	Diámetro exterior de la tubería, en m
D_{int}	Diámetro interior de la tubería, en m
D_{econ}	Diámetro económico, en m
η	Eficiencia del sistema motor-bomba
ϵ	Rugosidad absoluta del material de la tubería, en m
e	Espesor de pared de la tubería, en m
f	Coefficiente de fricción de Darcy-Weisbach
FDE	Función del diámetro económico
FA	Factor de actualización

γ	Peso específico del agua, en kN/m^3
γ_m	Peso específico del material de la tubería, en kg/m^3
H	Carga hidráulica total, en m
h_f	Carga de fricción, en m
H_o	Desnivel topográfico entre los puntos de origen y destino, en m
L	Longitud del acueducto, en m
Q	Gasto o caudal, en m^3/s
Re	Número de Reynolds, adimensional
r	Tasa de actualización
t	Tiempo de operación del acueducto, en horas/año
v	Velocidad del agua en la tubería, en m/s
σ	Esfuerzo admisible de trabajo en la tubería, en kg/cm^2
σ_y	Esfuerzo de fluencia del acero, en kg/cm^2

REFERENCIAS

- [1] F. Ghassemi and I. White. *Interbasin Water Transfer*. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- [2] Plastics Pipe Institute. *Report TR-4. HDB/HDS/MRS/Listed Materials*. Irving, Texas, 2018.
- [3] Plastic Pipe Institute. *Handbook of polyethylene pipe*. PPI, 2^a Ed, Irving, Texas, 2009.
- [4] AWWA. *Manual M 11. Steel Water Pipe – A Guide for Design and Installation*. 4th Ed, Denver, 2006.
- [5] AWWA. *Manual M 55. PE Pipe – Design and Installation*. 1st Ed, Denver, 2006.
- [6] Swamee, P.K.; Jain, A.K. (1976). “Explicit equations for pipe-flow problems”. *ASCE, Journal of the Hydraulics Division*. **102** (5): 657-664.
- [7] Moody, L.F. “Friction factors for pipe flow”. *Transactions ASME*, Vol 66 No 671, 1994.
- [8] D. Stephenson. *Pipeline design for water engineers*. Developments in Water Science, Vol 15, 2nd Ed, Elsevier, Amsterdam, 1981.
- [9] R. Autrique and E. Rodal. “Experimental verification of steel pipe collapse under vacuum pressure conditions”. *28th Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IAHR*, Grenoble, 2016. (Disponible en Research Gate).
- [10] R. Autrique and E. Rodal. “The unitary aqueduct method. A new tool for the design of air chambers”. Paper 262, *29th Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IAHR*, Kyoto, 2018. (Disponible en Research Gate).