

Determinación del diámetro económico de una tubería de impulsión de polietileno de alta densidad (PEAD)

Determination of the optimum diameter of a high density polyethylene (HDPE) impulse pipe

Yaset Martínez Valdés 1, * <https://orcid.org/0000-0001-9770-022X>

Félix Riaño Valle 1, <https://orcid.org/0000-0002-9342-6064>

Liz Acosta Caballero 1, <https://orcid.org/0000-0002-7094-8257>

1 Centro de Investigaciones Hidráulicas. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE).

*Autor para la correspondencia: yaset@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

Se presenta una metodología para obtener el diámetro económico de una tubería de impulsión de polietileno de alta densidad (PEAD) de un sistema fuente por bombeo para suministro de agua. La misma toma como punto de partida el concepto de Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS), de conjunto con nuevos conceptos, criterios y enfoques que se complementan para la obtención del diámetro económico de una conductora. El procedimiento propuesto incorpora en este análisis, la determinación de la presión nominal (PN) para cada tramo del perfil de la conductora y sus diámetros interiores en función de las particularidades del trazado de la tubería, incorporando a otras variables que dependen del tipo de instalación y su esquema de diseño. El procedimiento se ilustra con la solución de un problema práctico.

Palabras clave: diámetro, económico, impulsión, metodología, tubería.

ABSTRACT

A methodology is presented to obtain the economic diameter of a high-density polyethylene (HDPE) force main pipe from a pumped source system for water supply. As a starting point, it takes the concept of Optimum System Efficiency Range (OSER), together with new concepts, criteria and approaches that complement each other to obtain the economic diameter of a conductor. The proposed procedure incorporates in this analysis, the determination of the nominal pressure (PN) for each section of the conductor profile and its internal diameters depending on the particularities of the pipeline layout, incorporating other variables that depend on the type of installation and its design scheme. The procedure is illustrated with the solution of a practical problem.

Keywords: diameter, economic, force main, methodology, pipe.

Recibido: 9/2021, Aceptado: 12/2022

Introducción

El uso del polietileno de alta densidad (PEAD) como material de las tuberías en los sistemas de abastecimiento de agua, viene desplazando a otros materiales tradicionalmente utilizados en el país para este tipo de servicio. Cuba cuenta en la actualidad con tres fábricas donde se producen este tipo de tuberías con diámetros de hasta 1200 milímetros, las cuales son demandadas desde las obras de grandes conductoras hasta las acometidas que dan servicio en las redes. De igual forma se va imponiendo su uso gradualmente en las tuberías de alcantarillado y drenaje pluvial. Son numerosas las ventajas del uso de este tipo de material, entre las que se destacan: mejores coeficientes de fricción, economía de construcción e instalación, compresibilidad, rapidez de instalación, compatibilidad y durabilidad (se estima un periodo de vida útil de 50 años).

Para calcular el diámetro óptimo o económico de una tubería de impulsión, así como su presión nominal de diseño, se debe realizar un análisis técnico-económico en el cual intervienen variables hidráulicas como: caudal, diferencia de presión, pérdidas de carga admisibles en la tubería, golpe de ariete; así como de otro tipo, a saber: material de la tubería, espesor, perfil longitudinal de la tubería, condiciones de ensayos de presión en el campo, costos relativos diámetros/presión nominal, costo de mano de obra y equipamiento, amortización, restricciones financieras como costos operativos de las estaciones de bombeo, intereses y costos actuales y futuros de la energía (Cabrera 1996).

El objetivo de la metodología propuesta es la determinación del diámetro económico de una tubería de impulsión de PEAD, material usado habitualmente en los sistemas fuente por bombeo para el abastecimiento de agua en nuestro país. La misma se fundamenta en el concepto de Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS) y en la selección de la presión nominal necesaria por tramos de tubería y sus respectivos diámetros interiores. Se articulan también otros aspectos esenciales tales como: costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, rango de velocidades permisibles y eficiencia de los equipos de bombeo (conjunto bomba-motor). De esta manera se calcula el diámetro económico para el cual el costo anualizado total (CAT) del sistema es mínimo en el rango de eficiencia considerado (Martínez 2011). El procedimiento se aplica a la solución de un problema práctico con datos reales para el caso de un sistema fuente por bombeo con una demanda fija (caudal de bombeo constante) y servicio continuo.

Desarrollo

Dependiendo del modo en que intervienen los diámetros en el cálculo de la sección hidráulica más económica de una conducción forzada, se pueden clasificar el proceso de optimización según: a) Formulación en diámetros continuos: En este caso se considera la aproximación de que los diámetros de las conducciones actúan como variables continuas y b) Formulación en diámetros discretos: Se considera únicamente la participación de diámetros disponibles comercialmente. Se trata por tanto de un conjunto discreto compuesto de valores estándares o comerciales. Ambos métodos difieren en la forma de evaluar los sumandos que integran la función de costos a minimizar (CAT), aunque el planteamiento económico es el mismo.

Está demostrado que para el caso del dimensionado económico de tuberías de impulsión, la solución óptima deberá contar con un diámetro único, y en consecuencia, el proceso de normalización subsiguiente hacia diámetros continuos, deberá consistir no ya en la partición de la tubería en dos tramos de diferentes diámetros, sino en comprobar cuál de los dos

diámetros, inmediato inferior o inmediato superior al teórico obtenido, proporciona un resultado más económico (Pérez 1993).

La metodología que se propone establece un procedimiento analítico para la determinación del diámetro económico de una tubería de impulsión de PEAD y su REOS (Martínez 2011). El procedimiento está organizado por pasos de la manera siguiente:

1. Definición del rango de velocidades recomendable para la tubería
2. Determinación preliminar de la presión nominal de la tubería
3. Selección de los diámetros posibles a utilizar en la tubería
4. Definición de la presión nominal de diseño (PN) de la tubería
5. Determinación del Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS) y el diámetro económico de la tubería de impulsión
6. Asignación de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores

Paso 1. Definición del rango de velocidades recomendable para la tubería

Los límites máximo y mínimo del rango de velocidades permisibles para una conducción, dependen de razones funcionales y energéticas (magnitud de las pérdidas de carga). Entre las primeras están, presiones mínimas y máximas en la conducción, ruidos, vibraciones, infrautilización de la conducción, depósitos de materias en suspensión, incrustaciones y los costos de mantenimiento entre otros. Teniendo en cuenta estos factores se han propuesto formulaciones para el cálculo de las velocidades límites aconsejables y rangos de velocidades recomendables o económicas, como también se les conoce (Cabrera 1996). En Cuba, para los proyectos de sistemas de conducción de agua con tuberías de PEAD, se establece utilizar el Instructivo para el diseño con tuberías de PEAD (INRH 2006).

Paso 2. Determinación preliminar de la presión nominal de la tubería

Para definir la presión nominal con carácter preliminar de la tubería, PNp hay que tener en cuenta el desnivel general, ΔZ del sistema (diferencia de altura entre la sección inicial y final de la conducción), el cual servirá como valor mínimo de referencia para seleccionar del catálogo de un fabricante una presión nominal inmediata superior a la magnitud del ΔZ . Determinada la PNp se procede a seleccionar los diámetros posibles dentro de esa clase de presión. Debe tenerse en cuenta que para este tipo de tuberías a mayor valor de PE (tipología de polietileno indicador de la calidad de la materia prima de fabricación) los costos de la conducción disminuyen (López 2012).

Paso 3. Selección de los diámetros posibles a utilizar en la tubería

Para la PNp definida en el paso anterior, se procede a calcular los posibles diámetros a utilizar en la conducción. Empleando la Ecuación de Continuidad y el rango de velocidades recomendables (Paso 1), se tiene:

$$D = \left(\frac{4Q_D}{\pi V} \right)^{0,5} \quad (1)$$

donde: D: diámetro interior teórico de la tubería de conducción principal, (m); QD: caudal de diseño del sistema, (m³/s) y V: velocidad media de circulación en la tubería, (m/s).

Cuando se sustituye en la ecuación 1 la velocidad mínima del rango de velocidades permisibles, se obtendrá el diámetro teórico máximo posible para la tubería de impulsión.

Por otro lado, al utilizarse en la referida ecuación la velocidad máxima del intervalo recomendable, se conseguirá el diámetro teórico mínimo posible para la conducción. Ambos diámetros teóricos servirán para acotar el rango de diámetros comerciales para la conducción, aproximando por exceso y por defecto para los diámetros teóricos mínimo y máximo respectivamente. De esta manera se asegura el cumplimiento de las restricciones de velocidad establecidas. La cantidad de diámetros nominales posibles a emplear dependerá de la amplitud del rango de velocidades establecido, la magnitud del caudal y el espaciamiento entre los diámetros comerciales.

Paso 4. Definición de la presión nominal de diseño (PN) de la tubería

Establecido el rango de diámetros permisibles para la conducción, se procede a asignar la presión nominal para cada uno de ellos considerando la carga a presión inicial, $(P/\gamma)_i$, resultado de la sumatoria del ΔZ y las hf correspondientes. La carga a presión inicial es aquella que es necesaria en el inicio de la conductora para garantizar el gasto de diseño. En este cálculo se tiende a desprestigiar la carga a velocidad, dado que en el orden práctico es un valor significativo (Ej.: $v^2/2g = 0,204$ m para una velocidad de 2,0 m/s). Teniendo en cuenta que el ΔZ es igual para todas las variantes de diámetros, la asignación de la presión nominal de la tubería quedará solo en función de la magnitud de las pérdidas de carga calculada para cada diámetro. De esta manera, para el menor diámetro se obtiene la máxima hf y por consiguiente una mayor presión nominal necesaria y viceversa. Para definir la presión nominal de diseño correspondiente a cada diámetro se aproximará siempre por exceso. Las pérdidas de carga se calcularán a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach con el coeficiente de fricción, f determinado por la fórmula de Swamee-Jain:

$$hf = 0.0826 f \frac{L_{eq}}{D^5} Q^2 \quad (2)$$

Donde: hf : pérdidas de carga en la conducción, (m); f : coeficiente de fricción de la tubería, (adim.); L_{eq} : longitud equivalente del sistema, (m); D : diámetro interior de la tubería, (m) y Q : caudal de circulación, (m³/s).

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (3)$$

Donde: ε : rugosidad absoluta de la tubería asociada al material, (m); D : diámetro interior de la tubería, (m) y N_R : número de Reynolds que caracteriza el flujo en la conducción, (adim.).

Calculada la carga a presión inicial necesaria para cada diámetro del rango establecido, se procede a seleccionar la de diseño. Es oportuno destacar que las tuberías de PEAD se fabrican para diferentes presiones nominales en función de una misma plantilla de diámetro exterior, variando solo su espesor. En la producción de este tipo de tuberías, para un mismo diámetro exterior la sección interior de la tubería se va reduciendo a medida que se necesita una mayor presión nominal. De esta forma, a mayor PN se requiere un mayor espesor de tubería, lo que encarece el precio por metro lineal a pesar de que el diámetro exterior sea el mismo.

Tomando en cuenta lo anterior, se procede a la asignación de la PN de diseño para cada diámetro de modo que esta sea mayor que la requerida. Se recomienda que este proceso se inicie por el diámetro menor del rango. Si para este diámetro, su $(P/\gamma)_i$, resulta mayor que la

asignada de forma preliminar, se deberá tomar la inmediata superior correspondiente al mismo diámetro exterior. Al realizar este cambio, el espesor aumenta y habrá que recalcular nuevamente las pérdidas de carga y la carga de presión inicial, pudiendo resultar en una nueva PN necesaria. Este proceso se repetirá hasta que se encuentre el diámetro interior cuya $(P/\gamma)_i$ sea menor que la PN de diseño de la tubería. Si para el menor diámetro del rango, la carga a presión necesaria es menor que la presión de diseño, no es necesario realizar el proceso antes explicado.

Paso 5. Definición del Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS) y determinación del diámetro económico de la tubería de impulsión.

El Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS), se define como aquel que garantiza el conjunto de costos anualizados total mínimo del sistema para un diámetro nominal dado, en función de las variables hidráulicas y del sistema establecidas previamente. El diámetro óptimo será aquel que cumpla todas las restricciones técnicas, funcionales y económicas que tenga el menor costo anualizado total (CAT). En su definición intervienen los costos de inversión, energéticos y de operación y mantenimiento, reflejados en una sumatoria como la que se muestra:

$$CAT = C_i a_t + C_e + C_{o\&m} \quad (4)$$

Donde: CAT: costo anualizado total asociado a cada variante, (\$); C_i : costo de inversión de la conducción, (\$); a_t : factor de amortización de la inversión, (adim.); C_e : costo anual de la energía consumida (\$) y $C_{o\&m}$: costo anual de operación y mantenimiento de la aducción, (\$).

El monto de inversión se refieren de manera general a los costos de: tuberías; movimientos de tierra; acarreo de material de préstamo y material sobrante; el colchón de arena para el asentamiento de la tubería; levantamiento y reposición de pavimentos; los accesorios hidráulicos y de otra índole; colocación de las tuberías y juntas; bloques de apoyo y anclaje; camisas de protección y obras de cruce; construcción de registros para inspección y medición, interconexión y para válvulas de desagüe, cierre y ventosas; protección contra el golpe de ariete; adquisición de terrenos; proyectos y fiscalidad; la(s) estación(es) de bombeo. Las variables que intervienen en la relación entre el costo por metro lineal y el diámetro de las tuberías son las siguientes: el tipo de material y el espesor; los accesorios y uniones; el tipo de terreno y la profundidad de las zanjas; los costos de excavación y movimientos de tierras; las afectaciones en las vías públicas, autorizaciones, medidas de seguridad e higiene, etc. (Cabrera 1996) (Pérez 1993).

Para el cálculo del costo de inversión a nivel de anteproyecto, solo se considerará el relativo al de la inversión de la tubería de impulsión. La decisión de no incluir otros tipos de costos, se explica por el poco peso significativo que pueden tener estos en el monto de inversión total, máximo en este tipo de sistemas que se caracterizan por tener grandes longitudes de conducciones y diámetros relativamente grandes (Fuertes 2007). Tomando en cuenta estas consideraciones, el costo de inversión quedará planteado por la ecuación:

$$C_i = p_c L \quad (5)$$

Donde: C_i : costo total de la inversión, (\$); p_c : precio por metro lineal de tubería para un diámetro dado, (\$/ml) y L: longitud de la conductora, (m).

Por otra parte, debe advertirse que los costos de inversión se producen en el momento en que se acomete la construcción de la obra (tiempo de ejecución), mientras que los costos energéticos y de operación y mantenimiento se encuentran distribuidos en su tiempo de vida útil. Para compararlos todos tienen que ser referidos a una misma base temporal: año cero

(costo anualizado total, CAT). Para anualizar el costo de inversión durante el periodo de vida útil de la obra, se utiliza el factor de amortización que se expresa como (Pulido et al. 2006):

$$a_t = \frac{(1+r)^n r}{(1+r)^n - 1} \quad (6)$$

Donde: a_t : factor de amortización, (adim.); r : tasa de interés para el proyecto, (adim.) y n : tiempo de amortización de la inversión en años, (adim.).

El tiempo de vida útil para las tuberías de PEAD en los proyectos de abastecimiento fuente por bombeo se estima en 50 años (INRH 2006). Como resultado, las anualidades que se obtienen al multiplicar los costos de inversión por el factor de amortización, representan, desde el punto de vista técnico, el costo anual que supone la explotación del sistema en condiciones plenas de operación durante toda la vida útil del mismo (Martínez 2007).

El costo de la energía consumida para el trasiego del caudal depende del precio de la tarifa eléctrica, la cual, está en función del tipo de potencia contratada y las zonas horarias de la demanda. Las variaciones del costo de la estación de bombeo y las tasas de potencia contratada son, en general, poco significativas para diámetros similares. De esta manera, solo se considerará, la inversión relativa a la conductora y los gastos energéticos (López-Cortijo 2008). El cálculo del costo energético anualizado a nivel de anteproyecto se realiza mediante la expresión 7 (Martínez 2011):

$$C_e = \frac{\gamma Q(\Delta Z + hf)}{\eta_{eb}} t_b t_r = \frac{\gamma Q(\Delta Z + hf)}{\eta_{eb}} (t_{bm} t_{rm} + t_{bd} t_{rd} + t_{bp} t_{rp}) \quad (7)$$

Donde: C_e : costo energético anualizado, (\$); γ : peso específico del agua, (N/m³); Q : caudal de diseño de la conductora, (m³/s); ΔZ : desnivel topográfico del sistema, (m); hf : pérdidas de carga en la conducción, (m); η_{eb} : eficiencia del equipo de bombeo o equipo de bombeo equivalente, (adim.); t_b : tiempo de bombeo anual por horarios de demanda, (h); t_r : precio de la tarifa eléctrica contratada durante los intervalos de demanda, (\$/kWh); t_{bm} : tiempo de bombeo anual en el periodo de la madrugada (10:00 pm.-6:00 am.), (h); t_{bd} : tiempo de bombeo anual durante el periodo diurno (6:00 am.-6:00 pm.), (h); t_{bp} : tiempo de bombeo anual en el periodo del pico eléctrico (6:00 pm.-10:00 pm.), (h); t_{rm} : precio de la tarifa eléctrica contratada durante el periodo de la madrugada, (\$/kWh); t_{rd} : precio de la tarifa eléctrica contratada durante el periodo diurno, (\$/kWh) y t_{rp} : precio de la tarifa eléctrica contratada durante el periodo del pico eléctrico, (\$/kWh).

Para la estimación del costo de operación y mantenimiento para este tipo de sistemas hidráulicos, se han empleado varios criterios, de los cuales, aquellos que lo calculan en función del costo de instalación y del costo energético son los más aceptados. En este sentido, Featherstone y El-Jumaily (1983) proponen estimarlo como el 8% del costo de la energía consumida por la instalación, dependiendo de las características del sistema de bombeo y las condiciones de operación de este.

Todos estos costos tienen tendencias de crecimiento inverso, lo cual hace que, para cualquier sistema de conducción, la función de costo global (CAT) presente en general un mínimo dentro de los límites impuestos por las consideraciones del rango de velocidades permisibles. El diámetro que corresponde al menor CAT se denomina diámetro económico o diámetro óptimo, D_{opt} , como se puede observar en la figura 1.

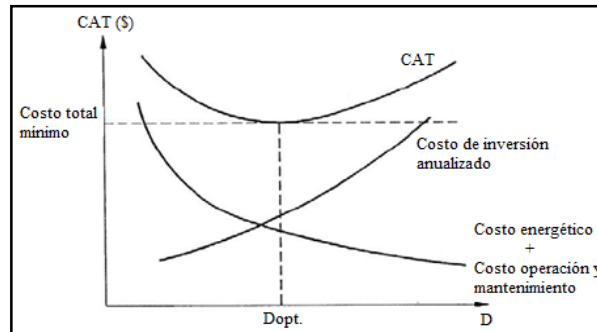


Fig. 1. - Curvas características de los costos de inversión, energético y de operación y mantenimiento anualizados en función del diámetro de la conducción.

Puede ocurrir que la tendencia de los costos anualizados total para el conjunto de diámetros seleccionados, no resulte una curva en que el costo mínimo quede perfectamente definido, sino que la tendencia se refleje en una curva ascendente o en una curva descendente para todo el rango de diámetros que se analiza. Si se diera el caso de una curva descendente, habría que analizar diámetros mayores de tubería hasta lograr que se produzca una inflexión con pendiente ascendente, realizando el proceso contrario para el caso de una curva ascendente. De esa forma, para ambas variantes, quedará verificado cual es el mínimo costo anualizado total y por consiguiente, se obtendrá el diámetro económico. Es necesario destacar que los análisis anteriores son válidos siempre que se cumplan los requerimientos de velocidades máximas y mínimas establecidas en el paso 1 de la metodología.

Para calcular el REOS correspondiente a cada diámetro de la conducción, se comenzará asumiendo un valor máximo práctico de la eficiencia del equipo de bombeo o equipo de bombeo equivalente de un 80%. Se entiende como eficiencia del equipo de bombeo equivalente, la eficiencia global del conjunto de equipos de bombeo instalados en una estación de bombeo, solo si son bombas iguales y tienen un acople al sistema de manera simétrica (caso de bombas iguales acopladas en paralelo). Este proceso continúa disminuyendo la eficiencia, -se propone que las variaciones sean del 1%-, hasta llegar a un valor de esta para el cual se produce un cambio de diámetro hacia el comercial inmediato superior.

Esta tendencia es esperada ya que, a medida que se reduce el valor de la eficiencia, el valor del diámetro económico aumenta. El valor precedente a esta eficiencia límite se considera el mínimo del REOS que se analiza, siendo la misma a su vez, el valor máximo del siguiente. Siguiendo este razonamiento, el diámetro óptimo a seleccionar será aquel que tenga el mayor REOS factible desde el punto de vista práctico. Este procedimiento difiere conceptualmente de los tradicionalmente citados en la literatura, los cuales se basan en asumir un único valor de eficiencia, -en algunos casos sin aclarar a que eficiencia se refiere y en otros como la eficiencia de la bomba, lo cual constituye un error conceptual-, para calcular el costo energético como paso previo para la determinación del diámetro óptimo.

Paso 6. Asignación de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores.

Calculado el diámetro óptimo para la conducción y su correspondiente REOS, se procede a la asignación de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores. Para esto hay que tener en cuenta el perfil longitudinal del trazado de la tubería, con el fin de verificar los estacionados singulares (puntos de mayor y menor cota topográfica)

y revisar si la PN definida para el diámetro económico se mantendrá durante todo el trazado de la conducción. Pudiera suceder que se inicie el trazado de la conductora con una PN y en un tramo hacia aguas abajo, producto de una depresión en su perfil longitudinal, se necesite una presión de trabajo mayor que la inicial. También se puede presentar el caso contrario, en el cual, durante un intervalo ascendente en el trazado de la tubería, pudiera reducirse la PN de trabajo debido a una menor demanda de presión interna en dicho tramo.

Para realizar este proceso se realizará el cálculo de la rasante piezométrica desde aguas abajo hasta aguas arriba, a partir del valor conocido de esta en la sección final de la tubería (sección aguas abajo con descarga libre a la atmósfera). La determinación de la cota piezométrica y la carga a presión, se efectuará para secciones de la tubería distanciadas cada 12 m (para hacerlas coincidir con la longitud de los tramos de las tuberías de PEAD de fabricación nacional), calculándose esta última a partir de la diferencia entre la cota piezométrica y la cota del centro de la tubería (línea de corriente central) para cada sección. Con estos valores de carga a presión cada 12 m se irá verificando cuando realizar el cambio de la PN para cada tramo en la tubería, atendiendo a las características del terreno en el trazado de la conducción.

Un cambio de la presión de diseño a lo largo de la tubería tendrá un impacto económico favorable en la inversión, en comparación con la práctica de proyecto de mantenerla constante. Al asignar a cada tramo del perfil de la tubería la PN necesaria, se pueden reducir los costos de la conducción (tramos de tubería con un espesor menor) y los costos energéticos (un menor espesor conlleva a un mayor diámetro interior, menores pérdidas de carga y por ende un menor costo energético). Desde el punto de vista hidráulico, al asumir tramos con diferentes PN y sus respectivos diámetros interiores, deberá analizarse toda la conducción como un sistema de tuberías en serie, aunque el diámetro exterior se mantenga igual a lo largo de todo el trazado.

A continuación, se aplica la metodología propuesta a un ejemplo práctico para garantizar una mejor comprensión del procedimiento.

Cálculo del diámetro óptimo de una tubería de impulsión de PEAD.

Datos del sistema fuente: Caudal de diseño, $QD = 91$ L/s; material de la tubería de impulsión: Polietileno de Alta Densidad (PEAD); rugosidad absoluta de la tubería, $\epsilon = 0,0000025$ m; Longitud equivalente de la tubería de impulsión, $Leq = 5100$ m; cota piezométrica inicio de la conductora, $CPi = 80,45$ m; cota piezométrica final de la conductora (cota piezométrica del tanque), $CPf = 153$ m; $\Delta Z = 72,55$ m y viscosidad cinemática (agua), $\nu = 10^{-6}$ m²/s. El caudal de bombeo se considerará constante durante un servicio continuo de 24 horas. El sistema fuente por bombeo está compuesto por una estación de bombeo (una sola bomba sumergible), una conductora y un tanque de distribución soterrado.

Paso 1. Definición del rango de velocidades recomendable para la tubería

Siendo el material de la tubería de impulsión PEAD se tomará como rango de velocidades permisibles: 0,6-1,8 m/s, según lo establecido en el Instructivo para el diseño con tuberías de PEAD para el caso del trasiego de agua limpia (INRH 2006).

Paso 2. Determinación preliminar de la presión nominal de la tubería

Tomando como referencia el catálogo nacional de tuberías de PEAD de fabricación nacional, se puede observar que para la calidad PE-100 del material, las PN que se fabrican van desde

PN 5 hasta PN 16 atm (INRH 2006). Este tipo de tipología (PE-100) es la que se establece para tuberías que trabajan en conducciones forzadas. A partir del $\Delta Z = 72,55$ m se selecciona de manera preliminar una PN de 8 atm, lo cual sería equivalente a una presión nominal de diseño de 81,55 m.c.a.

Paso 3. Selección de los diámetros posibles a utilizar en la tubería

Definido el rango de velocidades recomendables y trabajando con la ecuación 1, se procede a determinar el rango de diámetros teóricos: 253,7 a 439,4 mm. Tomando como referencia la PN 8, los diámetros posibles a seleccionar son: 284,9, 321,1, 361,8 y 407,1 mm, para los respectivos diámetros exteriores: 315, 355, 400 y 450 mm.

Paso 4. Definición de la presión nominal de diseño (PN) de la tubería

Precisados los diámetros interiores para la PN 8, se procede a asignar la presión nominal que deberá tener cada diámetro del rango a partir del cálculo de la carga a presión inicial, $(P/\gamma)_i$. Estos resultados se muestran en la tabla 1. Para comprobar si es válido desde el punto de vista práctico despreocupar la carga a velocidad, solo basta con calcular la velocidad para el menor diámetro del rango de diámetros posibles (el primero del listado de la tabla 1), obteniéndose: $v = 1,427$ m/s y $v^2/2g = 0,104$ m (0,106% representativa de la carga total).

Tabla 1. Asignación de la presión nominal para cada diámetro.

$D_{ext.}$ (mm)	$D_{int.}$ (PN 8) (mm)	N_R (adim.)	f (adim.)	hf (m)	$(P/\gamma)_i = \Delta Z + hf$ (m)	PN asignada (atm.)
315	284,9	406685,85	0,01371	25,48	98,04	10
355	321,1	360837,12	0,01399	14,30	86,85	10
400	361,8	320245,44	0,01428	8,04	80,59	8
450	407,1	284610,17	0,01459	4,55	77,10	8

Debido a que para los diámetros de 284,9 y 321,1 mm se produjo un cambio de PN de 8 a 10 atm., se procede a seleccionar los nuevos diámetros interiores para esa nueva PN y volver a calcular la carga a presión inicial para asignar la PN necesaria (véase tabla 2).

Tabla 2. Asignación de la PN para los diámetros interiores de 284,9 y 321,1 mm.

$D_{ext.}$ (mm)	$D_{int.}$ (PN 10) (mm)	N_R (adim.)	f (adim.)	hf (m)	$(P/\gamma)_i = \Delta Z + hf$ (m)	PN asignada (atm.)
315	277,6	417380,40	0,01365	28,89	101,44	10
355	312,8	370411,76	0,01393	16,23	88,78	10

Paso 5. Determinación del Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS) y el diámetro económico de la tubería de impulsión

Para la determinación del REOS para cada diámetro y la selección del diámetro económico de la conductora, será necesario calcular los diferentes costos que componen el costo anualizado total, CAT. En la tabla 3 se presenta la relación de precios por metro lineal de las tuberías de PEAD de fabricación nacional para los diámetros exteriores definidos en el paso 3 con sus respectivas presiones de diseño.

Tabla 3. Relación de precios por metro lineal en función del Dext. y la PN.

$D_{ext.}$ (mm)	315	355	400	450
PN asignada (atm.)	10	10	8	8
Precio (\$/mL)	78,56	101,57	105,45	137,44

Determinación del diámetro económico de una tubería de impulsión de polietileno de alta densidad (PEAD)

Para calcular el factor de amortización se asume una tasa de interés del 8% y una vida útil para la conductora de 50 años. Sustituyendo estos valores en la expresión 6 se encuentra un valor de a_t de 0,0817.

Empleando la expresión 7 se procede a determinar el costo energético utilizando la tarifa eléctrica **M-1A. Tarifa de media tensión con actividad continua** (20 horas y más servicio continuo), establecida por la Unión Eléctrica del Ministerio de Energía y Minas (UE-Minem 2018). El precio de las tarifas eléctricas son las siguientes: en el horario de la madrugada (10:00 pm. - 6:00 am.) es de 0,028 \$/kWh; en el horario del día (6:00 am. - 6:00 pm.) es de 0,042 \$/kWh y en el horario del pico eléctrico (6:00 pm. - 10:00 pm.) es de 0,083 \$/kWh. Obtenido este, se procede a calcular el costo de operación y mantenimiento como el 8% de este valor.

Para el cálculo del REOS se comienza evaluando diferentes valores de la eficiencia del equipo de bombeo a partir del valor de 0,8 como valor máximo práctico, hasta encontrar aquel valor de eficiencia que haga que se produzca un cambio de diámetro. En la tabla 4 se presentan el CAT y sus componentes para una eficiencia del equipo de bombeo del 80%. Observe que no es factible analizar un diámetro menor de 277,6 mm pues quedaría fuera del rango de velocidades permisibles.

Tabla 4. Costos de inversión anualizado, energético, operación y mantenimiento y CAT para una eficiencia de 80%.

$D_{ext.}(mm)$	$D_{int.}(mm)$	$C_i (\$)$	$C_i \cdot a_t (\$)$	$C_e (\$)$	$C_{o\&m} (\$)$	CAT (\$)
315	277,6	400656	32733,59	43796,69	3503,73	80034,02
355	312,8	518007	42321,17	38328,33	3066,27	83715,77
400	361,8	537795	43937,85	34792,88	2783,43	81514,17
450	407,1	700944	57267,12	33287,30	2662,98	93217,41

Siguiendo el procedimiento para otros valores menores de eficiencia se obtienen los siguientes resultados:

- El diámetro de menor CAT fue el de 277,6 mm ($D_{ext.} = 315$ mm) para un REOS de 80% (CAT = 80034,02 \$) a 70% (CAT= 86791,22 \$).
- Para un REOS de 69% a 10%, el diámetro económico pasa a ser el de 361,8 mm ($D_{ext.} = 400$ mm) (CAT = 87504,59 \$ y 344548,37 \$ para las eficiencias de 69% y 10% respectivamente).
- Finalmente calculando un REOS hipotético de 9% a 1%, el diámetro óptimo será el de 407,1 mm ($D_{ext.} = 450$ mm) obteniéndose un CAT = 376825,25 \$ para la eficiencia de 9% y un CAT = 2933290,27 \$ para la eficiencia de 1%.
- Para el rango teórico de 100% a 81%, se puede comprobar que el diámetro económico sigue siendo el de 277,6 mm ($D_{ext.} = 315$ mm), obteniéndose un CAT = 70573,93 \$ para la eficiencia de 100% y un CAT = 79450,06 \$ para la eficiencia del 81%.
- Contrario al comportamiento habitual de la curva de CAT vs. D (véase figura 1) descrito ampliamente en la literatura, al cual se ha hecho referencia anteriormente; para el diámetro de 400 mm, se obtiene una disminución del CAT, invirtiendo el comportamiento creciente, el cual vuelve de nuevo a recuperarse para el diámetro de 450 mm. La razón de esto reside en una ruptura de la relación D vs precio tubería vs. PN para los diámetros que se analizan, debido a que estos tienen PN diferentes para el mismo diámetro exterior, lo cual influye en el costo de inversión. En este sentido vale la pena recordar que para un mismo diámetro exterior, a medida que la PN aumenta, el espesor necesario será mayor, lo cual se traduce en un mayor costo por metro lineal de tubería. Este fenómeno de dos

mínimos en la solución global, solo es posible cuando se realiza un análisis de este tipo donde interviene el factor de la PN o clase de la tubería, como es el caso de las tuberías de PEAD, aspecto este no tenido en cuenta en los análisis tradicionales para el cálculo del diámetro económico de una tubería.

Paso 6. Asignación de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores

Teniendo en cuenta el perfil longitudinal del trazado de la tubería, se procede a identificar los estacionados singulares (puntos de mayor y menor cota topográfica) con el objetivo de realizar la **asignación** de la presión nominal por tramos de la tubería y sus respectivos diámetros interiores. El perfil está representado por 426 estacionados equidistantes cada 12 m, determinándose 15 secciones de cambio donde se produce una modificación de la PN para un tramo de la tubería, producto de variaciones en la pendiente del terreno (véase figura 2).

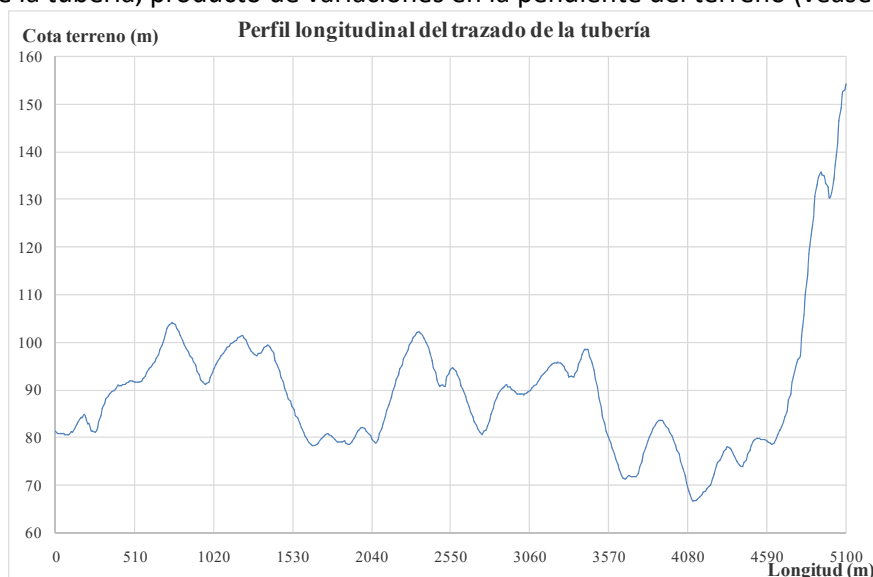


Fig. 2. - Perfil longitudinal del trazado de la conductora.

Los estacionados 0 (0 + 00 m) y 426 (5100 + 00 m) se corresponden con la sección inicial y final de la tubería, respectivamente. En la tabla 5 se muestra esta información detallada.

Tabla 5. Información del perfil longitudinal de la tubería y sus características hidráulicas.

Secciones de cambio	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estación (m)	636,0	912,0	1020,0	1476,0	2160,0	2688,0	2808,0	3564,0	3816,0
Cota centro tubería (m)	94,97	93,03	93,54	89,28	87,48	83,48	83,80	79,07	78,26
Cota piezométrica (m)	176,05	174,67	174,06	171,78	167,91	165,27	164,59	160,81	159,39
(P/γ) (m)	81,09	81,65	80,52	82,51	80,43	81,80	80,79	81,74	81,12
Secciones de cambio	10	11	12	13	14	15	Sección inicial		Sección final
Estación (m)	4008,0	4296,0	4392,0	4464,0	4776,0	4824,0	0,0		5100,0
Cota centro tubería (m)	76,31	75,36	74,00	75,44	94,74	104,69	80,45		153,00
Cota piezométrica (m)	158,43	156,79	156,31	155,91	154,35	154,13	179,66		153,00
(P/γ) (m)	82,11	81,43	82,31	80,47	59,61	49,44	99,21		0,00

En la tabla 6 se presenta la información sobre la cantidad de tramos de tubería con sus respectivos PN y sus longitudes por tramos y total. Bajo este criterio es posible utilizar hasta cuatro PN distintas a lo largo del trazado de la conductora (PN 10, 8, 6 y 5), utilizando el mismo diámetro exterior de 315 mm y asignándole los diámetros interiores a cada tramo en función de la presión nominal. De esta manera, quedan definidos que se utilizarán 179 tubos de PN 10, 218 de PN 8, cuatro de PN 6 y 24 de PN 5. Entre paréntesis se señalan las secciones de cambio y sección inicial o final de la tubería que acotan la distancia de cada intervalo entre estas.

Tabla 6. Longitudes parciales y total de cada tramo con su asignación de la PN.

PN asignada tramo (atm.)	$D_{ext.}$ (mm)	$D_{int.}$ (mm)	L_1 (m)	L_2 (m)	L_3 (m)	L_4 (m)	L_5 (m)	L_6 (m)	L_7 (m)	L_{total} (m)
10	315	277,6	624,00 (sección inicial-1)	108,00 (2-3)	684,00 (4-5)	120,00 (6-7)	252,00 (8-9)	288,00 (10-11)	72,00 (12-13)	2148,00
8	315	284,9	276,00 (1-2)	456,00 (3-4)	528,00 (5-6)	756,00 (7-8)	192,00 (9-10)	96,00 (11-12)	312,00 (13-14)	2616,00
6	315	290,7	48,00 (14-15)							48,00
5	315	296,9	288,00 (15-sección final)							288,00

Resultados y discusión

Para el diámetro económico de la conductora de 277,6 mm ($D_{ext.} = 315$ mm) se obtiene un REOS de 100% a 70%. En este sentido, si se garantiza que se seleccionen equipos de bombeo con una eficiencia dentro de ese rango, se asegurará que este sea el diámetro óptimo para la conducción. Por ejemplo, una electrobomba sumergible con los datos que se especifican, puede tener un rango de eficiencia del conjunto de 70 a 74,7%. Se han determinado para los otros tres posibles diámetros para la conducción sus respectivos REOS.

Para un mismo diámetro económico, es evidente que en la medida que se aumenta la eficiencia del equipo de bombeo el CAT disminuye. Este incremento de eficiencia, pudiera representar un valor que compense el incremento de costo por concepto del pago de una bomba más eficiente. Asumiendo un valor de eficiencia promedio de 72,3% para el equipo de bombeo, la solución propuesta por el nuevo método arroja un CAT = \$79777,38, pudiéndose alcanzar un ahorro de la solución de \$5294,17 al año (6,22%) cuando se compara con la solución clásica (PN 10, $D_{ext.} = 315$ mm, $D_{int.} = 277,6$ mm, CAT = \$85071,55) que se obtiene en el paso 5. El desglose de este ahorro en sus componentes queda de la siguiente manera: $Ci-at = \$4165,40$ (12,72%); $Ce = \$1045,15$ (2,16%) y $Co\&m = \$83,61$ (2,16%).

La conductora estará compuesta por 16 tramos de distintas PN (de 10 a 5 atm.), las cuales se irán alternando a lo largo de esta, en función de la topografía del trazado de la aducción. Las longitudes totales de cada uno de estos tramos en función de su PN son: PN 10: 2148,00 m (42,12% de la longitud total), PN 8: 2616,00 m (51,29%), PN 6: 48,00 m (0,94%) y PN 5: 288,00 m (5,65%). Se mantendrá durante todo el trazado de la tubería el mismo diámetro exterior de 315 mm. El diámetro interior de cada tramo estará en función de la PN asignada, resultando una conductora cuya analogía es un sistema de tuberías en serie. En términos generales, es importante subrayar que la magnitud de este ahorro vendrá dada por diferentes factores técnicos y topográficos particulares de cada proyecto.

Como es conocido, la longitud del trazado no influye en la determinación del diámetro económico, pero una mayor longitud de la conductora conlleva a un incremento de este

ahorro. A medida que la eficiencia del sistema de bombeo aumenta, disminuye el ahorro potencial que se puede conseguir. Un perfil longitudinal de la tubería con pendiente creciente a todo lo largo del mismo, implica un mayor ahorro posible, reduciéndose este, con el aumento de las inflexiones en la vertical. Teniendo en cuenta esto último, para el ejemplo en cuestión, se puede alcanzar un ahorro en el costo de inversión global y anualizado (Ci-at) de \$50984,08 (12,72%) y \$4165,40 (12,72%) respectivamente, debido al cambio de la PN de 10 a 8, 6 y 5 atm. en una longitud total de 2952 m (57,88% de la longitud de la conductora) cuando se compara con los resultados de la solución clásica. En este sentido, se observa que cuanto mayor es la relación entre la suma de las longitudes totales de las PN diferentes a la PN relativa al diámetro óptimo obtenida en el paso 5, mayor será el ahorro global que se puede conseguir.

Existe un aspecto técnico relativo a la soldadura térmica para la unión de los diferentes tramos con diferentes espesores. Si bien está descrito en la literatura que por el método de soldadura a tope (rango de utilización: 90 a 1600 mm) este proceder no es aconsejable, si es posible realizarlo utilizando la tecnología de electrofusión, mediante el empleo de accesorios electrosoldables para un rango de diámetros exteriores de 20 a 800 mm (AseTub 2010). Si se desea trabajar con la técnica de soldadura a tope (termofusión), -la técnica más empleada en nuestro país en los proyectos de conductoras-, es posible diseñar un accesorio hidráulico con la tipología de una expansión o contracción gradual (según como se le coloque teniendo en cuenta el sentido del flujo) que tendrá un espesor en la sección inicial y otro en la final. En la literatura consultada no se reporta un accesorio hidráulico con estas características diseñado para tal fin.

La función de este accesorio es garantizar como elemento de conexión, el cambio de espesor entre los diferentes tramos de distintas PN, lo cual permite como se ha apuntado, a tener una conducción con varios tramos de PN ajustadas a su presión de trabajo, con el consabido ahorro económico. Para el ejemplo resuelto sería necesario un total de 15 accesorios de este tipo: siete para cambio de PN de 10 a 8 atm. (expansión gradual), seis para cambio de PN de 8 a 10 atm. (reducción gradual), uno para cambio de PN de 8 a 6 atm. (expansión gradual) y otro para realizar un cambio de PN de 6 a 5 atm. (expansión gradual).

Conclusiones

La metodología que se presenta permite determinar el diámetro económico de una tubería de impulsión de PEAD, las cuales se utilizan habitualmente en los sistemas fuente por bombeo en Cuba. Con el procedimiento propuesto, se logra un nuevo enfoque que se desvincula un tanto del planteamiento conocido del proceso de optimización económica del diseño de una conductora, al lograr determinar cuál es el Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS) propio de cada diámetro, y de ese modo, poder determinar cuál es el diámetro económico a utilizar en una aducción por bombeo.

Se demuestra que a medida que el REOS sea mayor el CAT será menor, poniéndose de manifiesto que para cada REOS existe un diámetro económico determinado. En el presente trabajo, únicamente se ha pretendido hacer un planteamiento general del procedimiento analítico para la determinación del diámetro óptimo de una tubería de impulsión de PEAD, sin llegar a resolverlo de manera exhaustiva, contemplando variables muy específicas que intervienen en el diseño hidráulico y que, como se ha apuntado, no intervienen en la definición de la solución óptima. En este sentido, los criterios principales que inciden en el

proceso de selección son: el costo anualizado total (CAT) y el Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS).

Se presentan además nuevos enfoques, criterios y formulaciones que complementan este objetivo, a saber: rango de velocidades y de diámetros recomendables para tuberías de PEAD, definición preliminar de la presión nominal de la tubería, formulación de la ecuación del costo anualizado total y sus componentes, y proceso de asignación de la presión nominal por tramos de la conductora y sus respectivos diámetros interiores. La selección de las PN según las necesidades de cada tramo de la tubería de impulsión, contribuye de manera notable a disminuir el costo anualizado total del proyecto. Como un aporte del trabajo, se propone la utilización de un nuevo accesorio hidráulico cuya tipología es equivalente a una expansión o contracción gradual indistintamente (será una u otra en función de cómo se coloque según el sentido del flujo) para poder realizar los cambios en tramos de diferentes presiones nominales mediante la técnica de termofusión.

La metodología se aplica a un ejemplo práctico para un esquema de diseño muy común en los sistemas fuentes por bombeo en nuestro país. Este procedimiento de diseño será de gran utilidad tanto en la etapa de anteproyecto, como en un proyecto de rehabilitación de sistemas fuente por bombeo, al proporcionar una herramienta para la determinación del diámetro económico en conductoras de PEAD, en aquellos proyectos que contemplen en su diseño una demanda fija (gasto constante) y un servicio continuo.

Referencias

1. AseTub “Informe Técnico: Soldadura térmica en tuberías de polietileno (PE)”, Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos, Madrid, España. Extraído de: <http://www.masa.es/wp-content/uploads/2013/06/INFORME-DE-SOLDADURA-TUBERIA-DE-PE-ASETUB-MAYO-2010.pdf>. en septiembre de 2020. (2010).
2. Cabrera E. “Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua”, 2da Edición, Editorial Unidad Docente Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, t. 1 y 2, ISBN 978-848-94-8701-7, Valencia, España. 1996.
3. Featherstone R. E. and El-Jumaily K. K. “Optimal Diameter Selection for Pipe Networks”, Journal of Hydraulic Engineering, 109 (2): 221–234, February, ISSN 0733-9429, Virginia, United States of America. 1983.
4. Fuertes V. S., Pérez R., Martínez F. J. y López P. A. “Optimización del sistema formado por la estación de bombeo, la tubería de impulsión y el depósito de regulación”, Pimentel H., Pérez R. e Iglesias P. L. (2016). “Abastecimiento de agua: o estado da arte e técnicas avançadas”, pp.: 261-274, Editorial Universidade Federal da Paraíba, ISBN 978-85-7745-078-3, Paraíba, Brasil. (2007).
5. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) “Instructivo para la utilización de Tuberías y Accesorios de PEAD”, 63 pp., La Habana, Cuba. 2006.
6. López-Cortijo I., Esquiroz J. C., Aliod R. y García S. “Determinación de los costes energéticos en el cálculo de redes a presión con bombeo directo”, Memorias del XXV Congreso Nacional de Regadíos, Conferencia 15, pp. 1-15, Navarra, España. 2008.

7. López A. S. "Planeamiento de sistemas de abastecimiento de agua en comunidades de montaña de Venezuela", Tesis de doctorado, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba. 2012.
8. Martínez F. J., López G., Iglesias P. L. y Fuertes V. S. "Selección de la bomba para una impulsión mediante optimización económica", Memorias del VII Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua (VII SEREA), ISBN: 84-89487-25-1, Michoacán, México. 2007.
9. Martínez Y. "Metodología para el diseño hidráulico de las estaciones de bombeo para acueducto", Tesis de doctorado, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba. 2011.
10. Pérez R. "Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación", Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. 1993.
11. Pulido I, Gutiérrez J. C. and Asensio R. "Optimal design of pumping stations of inland intensive fishfarms", *Aquacultural Engineering*, 35 (2006): 283-291, ISSN 0144-8609, Ámsterdam, Holanda. 2006.
12. Unión Eléctrica (UE)-Ministerio de Energía y Minas (Minem) "Manual de Consumidores: Tarifas eléctricas y su utilización", 33 pp., La Habana, Cuba. 2018.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.