

Diámetro óptimo de conductoras de polietileno de alta densidad en sistemas de bombeo directo a la red

Yaset Martínez Valdés

E-MAIL: yaset@civil.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), La Habana, Cuba

Félix Riaño Valle

E-MAIL: riano@tesla.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), La Habana, Cuba

Yilian Álvarez Gil

E-MAIL: yilialanal@civil.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), La Habana, Cuba

RESUMEN

Se presenta una nueva metodología para calcular el diámetro económico de una conductora de polietileno de alta densidad (PEAD) de un sistema fuente por bombeo para suministro de agua con inyección directa a la red. La misma se basa en el concepto de Rango de Eficiencia Óptimo del Sistema de bombeo (REOS), de conjunto con nuevos conceptos, criterios y enfoques técnicos que se complementan para la obtención del diámetro óptimo de la conductora. Se incorporan en los análisis, la determinación de la presión nominal (PN) según las características de cada tramo del perfil de la tubería y sus respectivos diámetros interiores. El procedimiento propuesto tiene en cuenta otras variables que dependen del tipo de instalación, esquema de diseño y variación de la demanda horaria. El procedimiento se ilustra con la solución de un problema práctico.

PALABRAS CLAVES:

diámetro, económico, conductora, inyección, red de abasto

Optimum diameter of high density polyethylene conductors in direct-to-network pumping systems

ABSTRACT

A new methodology is presented for calculating the economic diameter of a high density polyethylene (HDPE) pipeline in a pumped source system for water supply with direct injection into the network. It is based on the concept of the Range of Optimal Efficiency of the Pumping System (REOS), together with new concepts, criteria and technical approaches that complement each other to obtain the optimal diameter of the pipeline. The determination of the nominal pressure (PN) according to the characteristics of each section of the pipe profile and their respective internal diameters are incorporated in the analyses. The proposed procedure takes into account other variables that depend on the type of installation, design scheme and variation in hourly demand. The procedure is illustrated with the solution of a practical problem.

KEYWORDS: diameter, economical, pipeline, injection, supply network

01 INTRODUCCIÓN

La inyección directa a la red se plantea como una solución alternativa a la construcción de depósitos elevados de gran capacidad, cuando estos tienen un costo económico prohibitivo, o bien que la construcción de estos causa un impacto ambiental y/o urbanístico en la arquitectura urbana de una ciudad, especialmente en aquellas con topografía eminentemente llana. Los objetivos que persigue un sistema de regulación de alimentación directa a la red se pueden resumir en: optimizar los rendimientos de las bombas, haciendo que estas trabajen en zonas de elevada eficiencia, funcionar siempre lo más cerca posible de la curva de consigna de la red, a fin de que la eficiencia global de la instalación sea lo más alto posible, evitando gastos energéticos innecesarios, limitar al máximo las bruscas variaciones de caudal originadas por las maniobras de arranque o parada de grupos (Pérez 1993) (Cabrera 1996).

Para calcular el diámetro económico de las conductoras en los sistemas fuente con inyección directa a la red, debe hacerse un análisis técnico-económico sobre la base de resolver un problema de optimización con variables hidráulicas que varían en el tiempo. La resolución del problema planteado permite determinar el diámetro óptimo, es decir, aquel que minimiza los costos totales de la instalación (costos de inversión más gastos de explotación). Este proceso está sujeto a limitaciones, entre las fundamentales: rango de diámetros comerciales, material y espesor de la tubería, límites de velocidades en la tubería, costos de las tuberías, mano de obra y equipamiento, y amortización e intereses de la infraestructura construida (Pulido 2001) (Fuertes et al 2007).

El objetivo de la metodología propuesta es determinar el diámetro económico de una conductora de PEAD de un sistema fuente por bombeo con inyección directa a la red. 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 la tubería y sus respectivos diámetros interiores (Martínez et al 2022). Se consideran también otros aspectos esenciales que inciden en el cálculo del diámetro óptimo, tales como: costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, rango de velocidades permisibles, eficiencia de los equipos de bombeo, la ecuación que define la variación de la eficiencia operacional por la referencia del Método del Índice de Eficiencia Mínima (MEI por sus siglas en inglés) y la curva de evolución de consumos diaria. 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. El procedimiento se ejemplifica mediante la resolución de un problema para el caso de un sistema fuente por bombeo con demanda variable y servicio continuo las 24 horas.

02 DESARROLLO

La metodología que se propone establece un procedimiento analítico para el cálculo del diámetro económico de una tubería de impulsión con variación del gasto de circulación y su Rango de Eficiencia Óptima del Sistema (REOS) propuesto por Martínez et al. (2022). El procedimiento se estructura en los siguientes pasos:

1. Selección de los límites de velocidades recomendables
2. Definición de la curva de evolución de consumos para el día tipo de diseño
3. Determinación preliminar de la presión nominal de la tubería (PN_p)
4. Selección de los diámetros posibles a utilizar en la conductora
5. Cálculo de la presión nominal de diseño (PN) de la tubería
6. Determinación de la carga a presión inicial y la eficiencia de operación para el intervalo de gastos del día tipo de diseño

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

Paso 1. Selección de los límites de velocidades recomendables

El rango de velocidades permisibles para una conducción depende de razones funcionales y energéticas. Las primeras se representan en las presiones mínimas y máximas en la tubería, ruidos, vibraciones, infrutilización de la conducción, depósitos de materias en suspensión, erosión, incrustaciones y costos de mantenimiento; mientras que la segunda se refiere a la magnitud de las pérdidas de carga en la tubería. Teniendo en cuenta estos factores se han propuesto formulaciones para la determinación de las velocidades límites aconsejables y rangos de velocidades recomendables (Cabrera 1996).

Paso 2. Definición de la curva de evolución de consumos para el día tipo de diseño

A partir de datos de proyecto se debe confeccionar el gráfico de demanda horaria de consumos para el día tipo de diseño, del cual se obtendrán la información relativa al caudal máximo, $Q_{m\acute{a}x.}$, el caudal mínimo, $Q_{m\acute{i}n.}$, y el rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, $\Delta Q_{mf.}$, el cual se define como el intervalo que engloba a los caudales de mayor ocurrencia a lo largo del día tipo de diseño (véase figura 1).

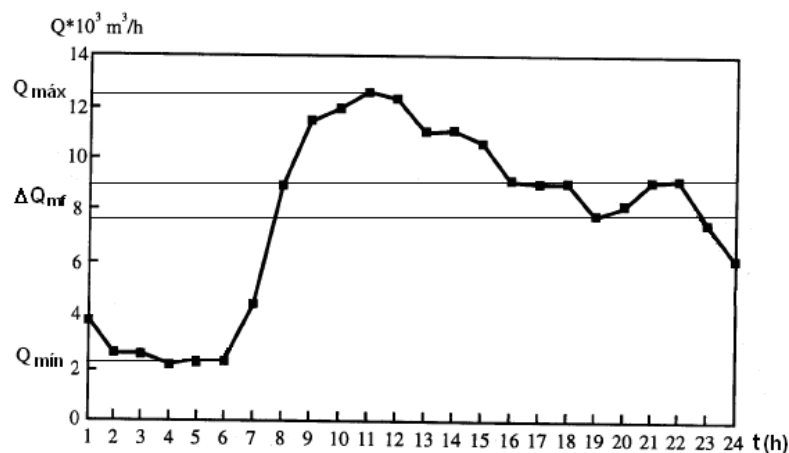


Figura 1. Curva de evolución de consumos horarios para el día tipo de diseño.

Paso 3. Determinación preliminar de la presión nominal de la tubería (PN_p)

La determinación de la presión nominal de la tubería con carácter preliminar, se debe realizar en función de la diferencia entre la cota piezométrica en el nodo de entrada a la red correspondiente al máximo caudal, $CP_{n.m\acute{a}x.}$ y la cota elevación en el inicio de la conductora, Z_i . Para el cálculo de la primera, debe conocerse a priori la carga necesaria a la entrada a la red determinada para el gasto máximo que circula por la conductora, $H_{sist.m\acute{a}x.}$.

$$PN_p = CP_{n.m\acute{a}x.} - Z_i = H_{sist.m\acute{a}x.} + Z_n - Z_i \quad (1)$$

Donde: PN_p : presión nominal de la tubería calculada de forma preliminar, (m); $CP_{n.m\acute{a}x.}$: cota piezométrica en el nodo de entrada a la red correspondiente al máximo caudal, (m); Z_i : cota elevación en el inicio de la conductora, (m); $H_{sist.m\acute{a}x.}$: carga necesaria a la entrada a la red determinada para el gasto máximo, (m) y Z_n : carga a elevación en el nodo de entrada a la red, (m).

Esta diferencia servirá como valor mínimo de referencia para seleccionar de un catálogo comercial de tuberías de PEAD, una presión nominal (clase) inmediata superior a la magnitud de esta.

Paso 4. Selección de los diámetros posibles a utilizar en la conductora

A partir de la PN_p determinada en el paso anterior, se procede a seleccionar los posibles diámetros comerciales dentro de una clase (PN). Para esto, es necesario determinar, primeramente, el rango de diámetros teóricos, mediante la utilización de la ecuación de Continuidad y el rango de velocidades permisibles. El gasto de referencia que se tomará para el diseño será el caudal medio del rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, Q_{pmf} .

$$D = \left(\frac{4Q_{pmf}}{\pi V} \right)^{0,5} \quad (2)$$

Donde: D : diámetro interior teórico de la tubería, (m); Q_{pmf} : caudal promedio del rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, (m^3/s) y V : velocidad de circulación en la tubería, (m/s).

Sustituyendo en esta ecuación el valor de la velocidad mínima permisible, se obtendrá el valor máximo del rango de los diámetros posibles a utilizar en la tubería de impulsión. El límite mínimo de este intervalo se obtiene evaluando en la citada ecuación, el valor máximo permisible para la velocidad. Obtenido este rango de diámetros teóricos, se procede a elegir los diámetros comerciales inscritos dentro de este, del referido catálogo de tuberías de PEAD. Luego se procede a verificar el cumplimiento de las restricciones de velocidad establecidas para cada uno de estos diámetros comerciales para todo el intervalo de gastos horarios del día tipo de diseño.

Paso 5. Definición de la presión nominal de diseño (PN) de la tubería

Determinado el rango de diámetros comerciales para la conducción se procede a asignar la presión nominal para cada uno, considerando la carga a presión inicial máxima, $(P/\gamma)_{im\acute{a}x.}$, obtenida de la diferencia entre la cota piezométrica en la sección inicial de la conductora para el caso del gasto máximo y la cota elevación en el inicio de la misma. La primera se obtendrá sumándole a la cota piezométrica en el nodo de entrada a la red correspondiente al máximo caudal, $CP_{n.m\acute{a}x.}$, las pérdidas de carga en la conducción derivados de este. Calculada la carga a presión inicial máxima necesaria para cada diámetro del rango establecido, se procede a seleccionar la presión nominal de diseño, teniendo en cuenta que esta sea mayor que la requerida, aproximándose siempre por exceso dentro de la clase. 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.

$$hf = 0.0826 f \frac{L_{eq}}{D^5} Q^2 \quad (3)$$

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, (m^3/s).

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (4)$$

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.).

Cuando para un diámetro su $(P/\gamma)_i$ resulte 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, resultando 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.

Paso 6. 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 costo anualizado total mínimo del sistema para un diámetro nominal específico, en función de las variables establecidas previamente. El diámetro óptimo será aquel que cumpla todas las restricciones técnicas, funcionales y económicas que tenga el menor costo anualizado total. En el cálculo de la sección más económica de una conducción intervienen los costos de inversión, los energéticos y los de operación y mantenimiento. La ecuación que define el costo anualizado total (CAT) es la siguiente (Martínez 2011):

$$CAT = C_i a_t + C_e + C_{o\&m} \quad (5)$$

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, (\$).

Para el cálculo del costo de inversión en la etapa de estudio de factibilidad, solo se considerará el costo de inversión del sistema de conducción. La decisión de no incluir otros tipos de costos, viene dado por el poco peso significativo que puede tener esta(s) en el costo total de inversión, máxime en este tipo de sistemas que se caracterizan por tener grandes longitudes y diámetros relativamente significativos (Fuertes et al. 2007). Teniendo en cuenta esta observación, el costo de inversión quedará simplificado a la ecuación:

$$C_i = p_c L \quad (6)$$

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).

Para anualizar el costo de inversión durante el periodo de vida útil de la obra, se utiliza el factor de amortización que se define en la ecuación 7 (Pulido, Gutiérrez y Asensio 2006).

$$a_t = \frac{(I+r)^n r}{(I+r)^n - I} \quad (7)$$

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 costo energético anualizado para la etapa de diseño del proyecto se calcula mediante la expresión 8 (López-Cortijo et al. 2008):

$$C_e = \sum_{i=1}^{24} \frac{\gamma Q_i H_i}{\eta_{ebi}} t_b t_{ri} = \sum_{i=1}^{24} \frac{\gamma Q_i ((P/\gamma)_{ii} + hf_i)}{\eta_{ebi}} t_b t_{ri} \quad (8)$$

Donde: C_e : costo energético anualizado, (\$); γ : peso específico del agua, (N/m³); Q_i : caudal de circulación en la conductora para la hora i , (m³/s); H_i : carga de bombeo o carga dinámica total para la hora i , (m); $(P/\gamma)_{ii}$: carga a presión inicial para la hora i , (m); hf_i : pérdidas de carga en la conducción para la hora i , (m); η_{ebi} : eficiencia del equipo de bombeo o equipo de bombeo equivalente para la hora i , (adim.); t_b : tiempo de bombeo anual por horarios de demanda = 1 h y t_{ri} : precio de la tarifa eléctrica contratada para cada intervalo de demanda: madrugada (10:00 pm.-6:00 am.), diurno (6:00 am.-6:00 pm.) y pico (6:00 pm.-10:00 pm.), (\$/kWh).

Una vez definida la presión nominal de diseño para cada diámetro, se procede a determinar la $(P/\gamma)_i$ característica de cada hora, tal como se explicó en el paso anterior, para el caso del caudal máximo. La eficiencia de operación para cada hora, η_{ebi} resulta de la multiplicación de la eficiencia de diseño asignada por los valores de corrección adimensionales que dependen de cada caudal adimensional. Estos últimos se calculan como la relación entre el gasto de cada hora y el caudal promedio del rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, Q_{pmf} . Para este cómputo es necesario definir a priori la cantidad de bombas que asumirán la operación, con el objetivo de establecer la distribución de los caudales horarios por bomba. Los valores de corrección adimensionales para la eficiencia son obtenidos mediante la ecuación de eficiencia adimensional elaborada a partir de los valores propuestos por el Método del Índice de Eficiencia Mínima (MEI por sus siglas en inglés) (UE 2012):

$$\eta_a = 2,04945Q_a - 1,04922Q_a^2 \quad (9)$$

Donde: η_a : eficiencia adimensional, (adim.) y Q_a : caudal adimensional, (adim.).

La ecuación propuesta por los autores para el cálculo de la eficiencia adimensional fue obtenida utilizando el software TableCurve 2D V4.0, con un coeficiente de correlación, $r^2 = 0,99999$, un error relativo medio de $3,65 \cdot 10^{-4}\%$, con valores máximo y mínimo de este error de 0.0156% y 0 respectivamente. Es necesario apuntar que en esta etapa de estudio de factibilidad los valores de eficiencias de operación horaria se consideran valores estimados, debido a que en esta fase del proyecto aún no se conocen las características de los equipos de bombeo que se instalarán en el sistema.

Para el cálculo del costo de operación y mantenimiento se trabajará con el concepto propuesto por Featherstone y El-Jumaily (1983) que lo expresa como un ocho por ciento del costo energético. 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 será el diámetro económico o diámetro óptimo, D_{opt} .

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

Determinado 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 en el paso 5, se mantendrá durante todo el trazado de la conducción. Puede 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 tramo ascendente en el trazado de la tubería, pudiera ser conveniente reducir la PN de trabajo. Ambas situaciones se pueden presentar en el mismo trazado de la conductora y en varios tramos a lo largo del mismo. Este análisis se realizará teniendo en cuenta solamente la rasante piezométrica correspondiente al gasto máximo.

El cambio de la presión de diseño a lo largo de la tubería, tendrá un impacto económico favorable en el proyecto, en comparación con la práctica frecuente de mantenerla constante durante todo el trazado. 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, lo cual se traduce en menores pérdidas de carga y por consiguiente menores costos energéticos). 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 resuelve un ejemplo práctico para ilustrar la metodología propuesta para el cálculo del diámetro óptimo de una tubería de impulsión que trabaja con un régimen de demanda variable y servicio continuo para abastecer a una red de abasto.

Datos del sistema fuente y la red de abasto: El sistema fuente por bombeo funciona con una inyección directa a la red. Se usará como material de la tubería de impulsión el polietileno de alta densidad (PEAD) con una rugosidad absoluta de la tubería, $\epsilon = 0,0000025$ m. La longitud equivalente de la conductora, $L_{eq} = 3000$ m. Se considerará una viscosidad cinemática para el agua de $\nu = 10^{-6}$ m²/s. Las cotas a elevación en las secciones inicial y final de la conductora (nodo de entrada a la red) son: $Z_i = 29,184$ m y $Z_n = 39,646$ m, respectivamente. La carga necesaria a la entrada de la red para el gasto máximo, $H_{sist.máx.}$ es 79,59 m. Trabajarán dos bombas con iguales características en el sistema fuente.

Paso 1. Selección de los límites de velocidades recomendables

Siendo el material de la tubería de impulsión PEAD, se tomará como rango de velocidades permisibles: $0,3^{-3}$ 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) en su amplio rango de utilización, con el objetivo de contemplar la amplia variación del gasto en el diseño de la conductora.

Paso 2. Definición de la curva de evolución de consumos para el día tipo de diseño

El gráfico de evolución de consumos para el día tipo de diseño se representa en la figura 2. Del análisis de este se puede extraer como información: caudal mínimo, $Q_{min.}$: 29,4 L/s (hora 4); caudal máximo, $Q_{máx.}$: 119 L/s (hora 20); rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, $\Delta Q_{mf.}$: 70 a 94,5 L/s (intervalo de 12 a 17 h) y caudal medio del rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, $Q_{pmf.}$: 82,83 L/s.

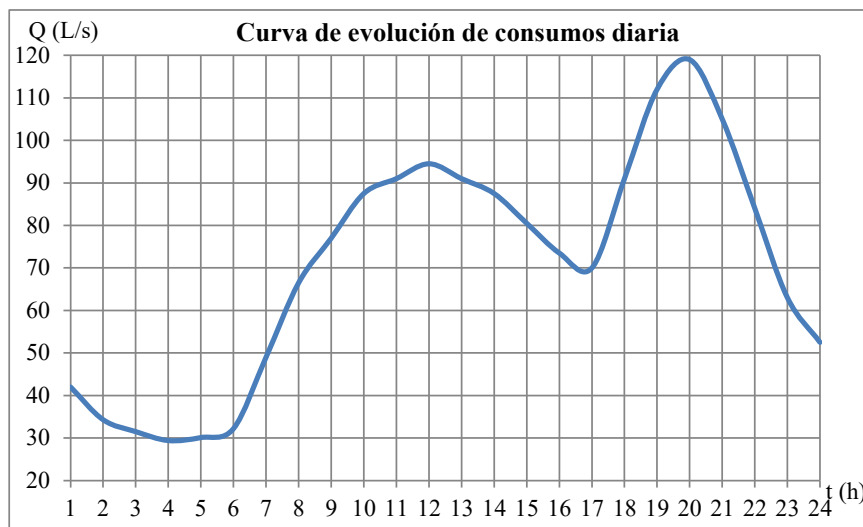


Figura 2. Gráfico de demanda horaria de consumos para el día tipo de diseño

Paso 3. Determinación preliminar de la presión nominal de la tubería (PN_p)

A partir de la información inicial y trabajando con la ecuación 1, se comienza el procedimiento para la determinación de la presión nominal de la tubería.

$$PN_p = CP_{n.máx} - Z_i = H_{sist..máx.} + Z_n - Z_i = 79,59 + 39,646 - 29,184 = 90,05m$$

Tomando este valor como referencia se procede a seleccionar de un catálogo de tuberías de PEAD de fabricación nacional, para la calidad PE-100 del material, una PN de 10 atm. equivalente a una presión nominal de diseño de 101,94 m.c.a.

Paso 4. Selección de los diámetros posibles a utilizar en la conductora

Definido el rango de velocidades recomendables y el caudal medio del rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, $Q_{pmf.}$: 82,83 L/s, se trabaja con la ecuación 2 para determinar el rango de diámetros teóricos: 187,49 a 592,91 mm. Tomando como referencia la PN 10 atm., los ocho diámetros interiores posibles a seleccionar son: 220,26, 277,56, 312,82, 352,48, 396,56, 440,63, 493,52 y 555,22 mm, para los respectivos diámetros exteriores: 250, 315, 355, 400, 450, 500, 560 y 630 mm. A continuación, se procede a verificar el cumplimiento de las restricciones de velocidad establecidas para cada uno de estos diámetros interiores para todo el intervalo de gastos del día tipo de diseño. Estos resultados se compilan en la tabla 1 con las siguientes observaciones.

Tabla 1. Verificación del cumplimiento de las restricciones de velocidad.

$D_{int.}$ (m)	$V_{mín.}$ (0,3 m/s) $Q_{mín.} = 29,4$ L/s	$V_{máx.}$ (3,0 m/s) $Q_{máx.} = 119$ L/s	Observaciones
220,26	0,772	3,123	No se cumple la restricción de velocidad máxima para la hora 20
277,56	0,486	1,967	Cumple las restricciones de velocidad
312,82	0,382	1,548	Cumple las restricciones de velocidad
352,48	0,301	1,219	Cumple las restricciones de velocidad
396,56	0,238	0,963	No se cumple la restricción de velocidad mínima para el intervalo de 2 a 6 h
440,63	0,193	0,780	No se cumple la restricción de velocidad mínima para el intervalo de 1 a 6 h
493,52	0,154	0,622	No se cumple la restricción de velocidad mínima para el intervalo de 1 a 7 h y en la hora 24
555,22	0,121	0,491	No se cumple la restricción de velocidad mínima para los intervalos de 1 a 8 h y de 23 a 24

Teniendo en cuenta las observaciones declaradas en la tabla 1 se decide tomar como diámetros válidos para el diseño los cuatro primeros, haciendo la observación que el diámetro interior de 220,26 mm se seleccionará porque el incumplimiento de la restricción de la velocidad máxima sucede para un intervalo corto de tiempo (1 h) y solo se excede en un 4,1%.

Paso 5. Definición de la presión nominal de diseño (PN) de la tubería

Definidos los diámetros interiores para la PN 10 se procede a asignar la presión nominal que deberá tener cada diámetro del rango a partir del cálculo de la carga a presión inicial máxima, $(P/\gamma)_{imáx.}$, para el caso del gasto máximo. La cota piezométrica en el nodo de entrada a la red correspondiente al máximo caudal, $CP_{n.máx.}$ es independiente del valor del diámetro y su valor es 119,24 m. Los resultados correspondientes a cada diámetro se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Asignación de la presión nominal para cada diámetro.

$D_{ext.}$ (mm)	$D_{int.}$ (PN 10) (mm)	$CP_{n.máx.}$ (m)	N_R ($Q_{máx.}$) (adim.)	f ($Q_{máx.}$) (adim.)	hf ($Q_{máx.}$) (m)	$(P/\gamma)_{imáx.}$ (m)	PN asignada (atm.)
250	220,26	119,24	687887,09	0,012596	85,26	175,31	> 16
315	277,56	119,24	545887,83	0,013041	27,78	117,83	12,5
355	312,82	119,24	484358,47	0,013292	15,57	105,62	12,5
400	352,48	119,24	429851,73	0,013556	8,74	98,79	10

Para el diámetro de 220,26 mm ($D_{ext.} = 250$ mm) el valor de la $(P/\gamma)_{imáx.}$ supera el valor de 163,1 m.c.a (PN 16 atm.) por lo que en este punto se descarta de forma definitiva este diámetro. Debido a que para los diámetros de 277,56 (315) mm y 312,82 (355) mm se produjo un cambio de PN de 10 a 12,5 atm., se procede a seleccionar los nuevos diámetros interiores para esas nuevas PN y volver a calcular la carga a presión inicial para asignar la PN necesaria (véase tabla 3).

Tabla 3. Asignación de la PN para los diámetros interiores de 277,56 y 312,82 mm.

$D_{ext.}$ (mm)	$D_{int.}$ (PN 12,5) (mm)	$CP_{n.máx.}$ (m)	N_R ($Q_{máx.}$) (adim.)	f ($Q_{máx.}$) (adim.)	hf ($Q_{máx.}$) (m)	$(P/\gamma)_{imáx.}$ (m)	PN asignada (atm.)
315	268,18	119,24	564966,39	0,012971	32,81	122,86	12,5
355	302,27	119,24	501261,20	0,013218	18,38	108,43	12,5

Paso 6. Definición del rango de eficiencia óptima del sistema (REOS) y determinación del 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 4 se presentan los precios por metro lineal de las tuberías de PEAD de fabricación nacional para los diámetros exteriores seleccionados en el paso 5 con sus respectivas presiones de diseño.

Tabla 4. Relación de precios por metro lineal en función del Dext. y la PN.

$D_{ext.}$ (mm)	315	355	400
PN asignada (atm.)	12,5	12,5	10
Precio (\$/mL)	96,39	124,70	128,86

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 ecuación 7 se encuentra un valor de a_t de 0,0817.

Empleando la expresión 8 se procede a determinar el costo energético anual, 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 a través de la ecuación 10.

Para el cálculo del REOS de los distintos diámetros se comienza evaluando diferentes valores de la eficiencia del equipo de bombeo a partir del valor de 0,8 como valor máximo práctico. Como trabajarán dos bombas en el sistema, se procede primeramente a calcular los caudales horarios por bomba, trabajando con el caudal medio del rango de caudales de mayor frecuencia de ocurrencia, Q_{pmf} . (82,83 L/s). Con estos se pasa a determinar los respectivos caudales adimensionales por hora que servirán para calcular los valores de corrección adimensionales a través de la ecuación 9. Por último, se computan los valores de eficiencia de operación relativa a cada gasto, η_{ebi} como se puede observar en la tabla 5 para el caso de una eficiencia de 0,8 (80%).

Tabla 5. Cálculo de la eficiencia de operación para una eficiencia de referencia de 0,8.

t (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Q (L/s)	42	34,3	31,5	29,4	30,1	32,2	49	66,5	77	87,5	91	94,5
n_{bo} (adim.)	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
Q_a (adim.)	1,01	0,83	0,76	0,71	0,73	0,78	1,18	0,80	0,93	1,06	1,1	1,14
η_a (adim.)	1	0,98	0,95	0,93	0,93	0,96	0,96	0,97	1	0,99	0,98	0,97
η_{ebi} (adim.)	0,66	0,64	0,62	0,61	0,61	0,63	0,63	0,64	0,66	0,65	0,65	0,64
t (h)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Q (L/s)	91	87,5	80,5	73,5	70	91	112	119	105	84	63	52,5
n_{bo} (adim.)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
Q_a (adim.)	1,1	1,06	0,97	0,89	0,84	1,1	1,35	1,44	1,27	1,01	0,76	1,27
η_a (adim.)	0,98	0,99	1	0,99	0,98	0,98	0,85	0,78	0,91	1	0,95	0,91
η_{ebi} (adim.)	0,65	0,65	0,66	0,65	0,64	0,65	0,56	0,51	0,6	0,66	0,62	0,6

Leyenda: n_{bo} : número de bombas operativas en la hora i .

En la tabla 6 se presentan el CAT y sus componentes para una eficiencia del equipo de bombeo del 80%. Siguiendo el procedimiento para otros valores de eficiencia se obtiene que el diámetro de menor CAT es el de $D_{ext.} = 315$ mm ($D_{int.} = 268,18$ mm para PN 12,5 atm.) con un REOS de 80% ($CAT = \$64263,73$) a 65,8% ($CAT = \$73033,82$), por lo cual se define como el diámetro económico de la conductora. Si se garantiza que los equipos de bombeo se seleccionen con una eficiencia dentro de ese rango para trabajar en la instalación, se asegurará que este sea el diámetro óptimo para la conducción.

Tabla 6. Costos de inversión anualizado, energético, operación y mantenimiento y CAT para una eficiencia de referencia de 80%.

$D_{ext.}$ (mm)	$D_{int.}$ (mm)	C_i (\$)	C_{r-a_t} (\$)	C_e (\$)	$C_{o\&m}$ (\$)	CAT (\$)
315	268,18	289165,91	23624,85	37628,58	3010,29	64263,73
355	302,27	374099,03	30563,89	34000,73	2720,06	67284,68
400	352,48	386583,59	31583,88	31574,48	2525,96	65684,31

Para el $D_{ext.} = 400$ mm ($D_{int.} = 352,48$ mm para PN 10 atm.) se obtiene una disminución del CAT invirtiendo el comportamiento creciente, lo cual sucede por una ruptura de la relación D vs. precio tubería vs. PN para los diámetros que se analizan, debido a que estos tienen PN diferentes, lo cual influye en el costo de inversión, específicamente en el costo de la tubería por metro lineal.

Realizando un análisis adicional para verificar la sensibilidad del cambio en la solución del diámetro económico cuando cambia el gasto de referencia, se realiza el procedimiento para otros dos gastos: 70,58 L/s (valor medio de la serie diaria de gastos del día tipo de diseño) y 99,17 L/s (valor obtenido atendiendo al criterio del rango de fiabilidad). Debe tenerse en cuenta que al modificarse el gasto cambian los valores de los gastos adimensionales, que a su vez inciden en los valores de la eficiencia adimensional y real de operación, reflejándose esto en el costo energético y de operación y mantenimiento, dependiente de este, y por consiguiente en el CAT .

Para el gasto de 99,17 L/s se obtiene que el diámetro de menor CAT es el de $D_{ext.} = 315$ mm ($D_{int.} = 268,18$ mm para PN 12,5 atm.) con un REOS de 80% ($CAT = \$62049,44$) a 61,2% ($CAT = \$73853,07$); mientras que para el caudal medio de 70,58 L/s, el diámetro de menor CAT sigue siendo el de $D_{ext.} = 315$ mm ($D_{int.} = 268,18$ mm para PN 12,5 atm.) con un REOS de 80% ($CAT = \$61483,80$) a 60,5% ($CAT = \$73686,27$). Para este último valor de gasto es necesario utilizar tres bombas para operar en el sistema. Como resultado de este análisis de sensibilidad se puede observar que el diámetro óptimo sigue siendo el mismo para las dos opciones de gasto de diseño.

Paso 7. 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 reflejado en la figura 3, se procede a verificar los estacionados singulares (puntos de mayor y menor cota topográfica) para asignar la presión nominal definitiva en cada tramo de la tubería. El perfil está representado por 151 estacionados, equidistantes 20 m entre estas, destacándose cinco puntos característicos donde se produce un cambio de pendiente que origina un cambio de PN en la conductora. Los puntos característicos (estacionados) 0 (0 + 00 m) y 5 (3000 + 00 m) se corresponden con la sección inicial y final de la tubería, respectivamente. En la tabla 7 se muestra esta información detallada.

Tabla 7. Información del perfil longitudinal de la tubería y sus características hidráulicas.

Puntos singulares	0	1	2	3	4	5
Estación (m)	0,00	760,00	1880,00	2380,00	2820,00	3000,00
Cota tubería (m)	29,184	41,451	49,590	45,055	38,853	39,646
Cota piezométrica (m)	152,045	143,733	131,484	126,016	121,204	119,235
Carga a presión (P/γ) (m)	122,861	102,282	81,894	80,961	82,351	79,589

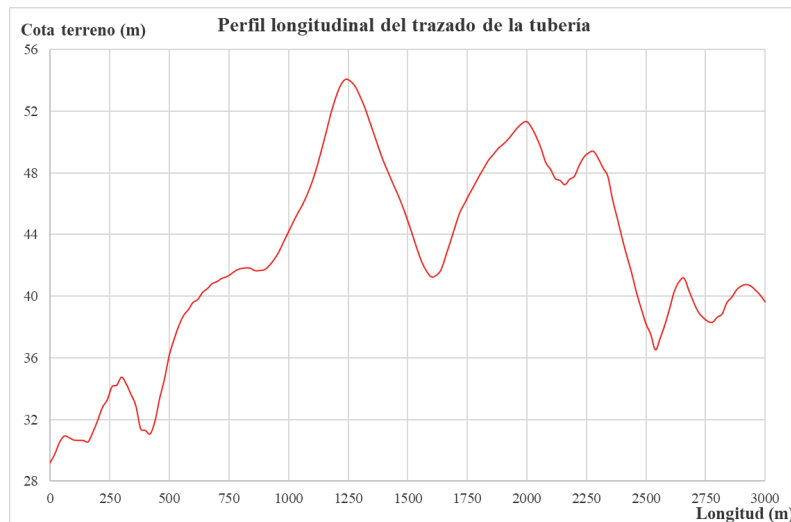


Figura 3. Perfil longitudinal del trazado de la conductora.

En la tabla 8 se presenta la información sobre la cantidad de tramos de tubería con sus respectivos PN y sus longitudes por tramos y total. Basado en este criterio es posible utilizar hasta tres PN distintas a lo largo del trazado de la conductora, utilizando el mismo diámetro exterior de 315 mm y asignándole los diámetros interiores a cada tramo en función de la presión nominal. Entre paréntesis se señalan los puntos característicos que acotan la distancia de cada intervalo.

Tabla 8. Longitudes parcial y total para 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_{total} (m)
12,5	315	268,2	760,00 (0-1)		760,00
10	315	277,6	1120,00 (1-2)	440,00 (3-4)	1560,00
8	315	284,9	500,00 (2-3)	180,00 (4-5)	680,00

La conductora estará compuesta por cinco tramos de distintas PN, las cuales se irán alternando a lo largo de ésta en función de la topografía del trazado de la tubería. El diámetro exterior de 315 mm se mantendrá durante todo el trazado de la conductora con diámetros interiores que variarán en función de la PN de cada tramo. De esta forma la aducción se analizará como un sistema de tuberías en serie y en este sentido se evaluará su CAT para compararlo con la solución tradicional de mantener el mismo PN a lo largo del trazado. A partir de asumir un valor de eficiencia de 80%, la solución propuesta por el nuevo método arroja un $CAT = \$59665,52$, alcanzándose un ahorro de la solución de $\$4598,20$ al año (7,15%) cuando se compara con la solución clásica $CAT = \$64263,73$). Realizando el mismo análisis para el valor inferior del REOS (65,8%) el ahorro anual que se consigue es de un 7,59% ($\$5541,90$).

En líneas generales, la magnitud de este ahorro está dado por diferentes factores técnicos y topográficos como son: longitud de la conductora (mayor longitud conlleva un incremento de este ahorro); la eficiencia del sistema de bombeo (al aumentar disminuye el ahorro potencial que se puede conseguir); y el perfil longitudinal de la conductora (una pendiente creciente a todo lo largo

del trazado aumenta el ahorro posible, reduciéndose este, con el aumento de las inflexiones en la vertical. A partir de estos criterios y para el ejemplo en cuestión, el ahorro alcanzado de 7,15 a 7,59% para todo el REOS se logró debido al cambio de la PN de 12,5 a 10 y 8 atm. en una longitud total de 2240 m (74,67% de la longitud de la conductora.).

Para la unión de los distintos tramos de tuberías con diferentes espesores, Martínez et al. (2022) propone el diseño de 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 espesores diferentes en la sección inicial y final. La función del mismo será la de conectar los diferentes tramos de distintas PN con diferentes espesores, con el fin de lograr un ahorro en cuanto a la inversión de la conducción. Para el ejemplo ilustrativo, sería necesario un total de cuatro accesorios de este tipo: dos para cambio de PN de 10 a 8 atm. (expansión gradual), uno para cambio de PN de 8 a 10 atm. (reducción gradual), y uno para cambio de PN de 12,5 a 10 atm. (expansión gradual).

03 CONCLUSIONES

La metodología que se presenta permite determinar el diámetro económico de una tubería de impulsión de PEAD en un sistema fuente por bombeo con inyección directa a la red. 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 calcular el rango óptimo de eficiencia propio de cada diámetro, y de ese modo, determinar cuál es el diámetro económico a utilizar en una aducción por bombeo con variación en la demanda horaria. 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 este trabajo se ha pretendido hacer un planteamiento general del procedimiento analítico para la determinación del diámetro óptimo de una tubería de impulsión, sin llegar a resolverlo de manera exhaustiva, incluyendo 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 técnicos, 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, obtención de la ecuación de eficiencia adimensional elaborada a partir de los valores propuestos por el Método del Índice de Eficiencia Mínima (MEI) 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 los costos de la inversión inicial de la conductora. la metodología de cálculo se aplica a un ejemplo práctico para un esquema de diseño muy común en los sistemas fuentes por bombeo con inyección directa a la red. Este nuevo procedimiento de diseño será de gran utilidad tanto en la etapa de anteproyecto como en un proyecto de rehabilitación de sistemas fuente, brindando una ayuda para la selección del diámetro económico de las conductoras, garantizando la solución óptima en el diseño hidráulico del sistema. Se recomienda aplicar la nueva metodología en proyectos que contemplen en su diseño una demanda variable y un servicio continuo.

04 REFERENCIAS

- Cabrera E.** (1996). "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
- Featherstone R. E. y El-Jumaily K. K.** (1983). "Optimal Diameter Selection for Pipe Networks", *Journal of Hydraulic Engineering*, 109 (2): 221–234, February, ISSN 0733-9429, Virginia, United States of America
- Fuertes V. S., Pérez R., Martínez F. J. y López P. A.** (2007). "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 água: o estado da arte e técnicas avançadas", pp.: 261-274, Editorial Universidade Federal da Paraíba, ISBN 978-85-7745-078-3, Paraíba, Brasil
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)** (2006). "Instructivo para la utilización de Tuberías y Accesorios de PEAD", 63 pp., La Habana, Cuba
- López-Cortijo I., Esquiroz J. C., Aliod R. y García S.** (2008). "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
- Martínez Y.** (2011). "Metodología para el diseño hidráulico de las estaciones de bombeo para acueducto", Tesis de doctorado, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba
- Martínez Y., Riaño F. A. y Acosta L.** (2022). "Determinación del diámetro económico de una tubería de impulsión de polietileno de alta densidad (PEAD)", *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 43(4), 47–61, ISSN 2788-6050
- Pérez R.** (1993). "Dimensionado óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación", Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España
- Pulido I.** (2001). "Diseño y gestión óptimos de sistemas de impulsión y de almacenamiento de agua para riego", Tesis de doctorado, Universidad de Córdoba, Córdoba, España
- Pulido I; Gutiérrez J. C. y Asensio R.** (2006). "Optimal design of pumping stations of inland intensive fishfarms", *Aquacultural Engineering*, 35 (2006): 283-291, ISSN 0144-8609, Amsterdam, Holanda
- Unión Eléctrica (UE)-Ministerio de Energía y Minas (Minem)** (2018). "Manual de Consumidores: Tarifas eléctricas y su utilización", 33 pp., La Habana, Cuba
- Unión Europea (UE)** (2012). "Reglamento (UE) Nº 547/2012. Requisitos de diseño ecológico para las bombas hidráulicas", 9 pp., Bruselas, Bélgica, extraído de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32012R0547> en abril de 2021

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

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

Participó en la elaboración de la metodología y redacción del artículo.

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

Participó en el análisis de los resultados, revisión y redacción del trabajo en su versión final.

Yilian Álvarez Gil <https://orcid.org/0009-0003-7644-0694>

Trabajó en el procesamiento de los datos del caso de estudio, haciendo contribuciones en su análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de información y en la redacción final del trabajo.