

Pérdida de carga y energía en impulsiones de fango deshidratado: análisis como fluido no newtoniano

Pressure and energy loss in dewatering sludge drives: analysis as a non-Newtonian fluid

José García Cascallana¹

Resumen

El comportamiento reológico de los fangos deshidratados es similar al de un fluido seudoplástico o adelgazante de tipo no newtoniano, y se puede considerar que sigue el modelo de Herschel-Bulkley. De esta forma, y una vez superada la tensión umbral, la derivada del esfuerzo cortante con respecto a la velocidad de deformación disminuye de forma no lineal al aumentar la velocidad de deformación, mientras que la viscosidad dinámica aparente disminuye. Este comportamiento es diferente al de los plásticos de Bingham, en los que dicha derivada se mantiene constante y, cuando la velocidad de deformación tiende a infinito, la viscosidad dinámica aparente coincide con la de Newton. El cálculo teórico de la pérdida de carga para este tipo de fluidos se ha realizado en régimen laminar a velocidades mucho menores que la crítica, donde el factor de fricción es inversamente proporcional al número de Reynolds de acuerdo con la ecuación de Poiseuille.

Palabras clave

Reología, viscosidad, polielectrolito, biosólidos, centrados.

Abstract

The rheological behaviour of the dewatered sludge is similar to that of a non-Newtonian pseudoplastic or thinning fluid, and can be considered to follow the Herschel-Bulkley model. Thus, once the threshold stress is exceeded, the derivative of the shear stress with respect to the strain rate decreases non-linearly as the strain rate increases, while the apparent dynamic viscosity decreases. This behaviour is different from that of Bingham plastics, in which this derivative remains constant and, when the strain rate tends to infinity, the apparent dynamic viscosity coincides with the Newtonian viscosity. The theoretical calculation of the head loss for this type of fluid has been carried out in the laminar regime at speeds much lower than the critical speed, where the friction factor is inversely proportional to the Reynolds number in accordance with Poiseuille's equation.

Keywords

Rheology, viscosity, polyelectrolyte, biosolids, centrates.

Recibido / received: 03/11/2022. Aceptado / accepted: 15/02/2023.

1- Ingeniero técnico industrial por la Universidad de León, ingeniero industrial por la UNED y doctor por la Universidad de León.

Autor para correspondencia (corresponding author): José García Cascallana; e-mail: jgc0504@yahoo.es



Planta de tratamiento de aguas residuales. Foto: Shutterstock.

1. Introducción

La tensión cortante τ (N/m²) experimentada por un fluido al circular por un conducto se puede representar mediante la ecuación (1) que constituye la Ley de Newton de la viscosidad.

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (1)$$

En ella, μ es la viscosidad dinámica (Pa·s) y du/dy la velocidad de deformación por unidad de longitud (s⁻¹).

Se denominan fluidos newtonianos (N) aquellos que presentan una relación lineal entre el esfuerzo cortante producido y la velocidad de deformación aplicada, cumpliendo con la Ley de Newton de la viscosidad (Bergadá-Grañó, 2012). Los fluidos N son los más sencillos de analizar y se caracterizan por la propiedad de que el gradiente de velocidad de deformación en un punto es proporcional al esfuerzo cortante (Levenspiel, 2022). Son fluidos no newtonianos (NN) aquellos que no cumplen la Ley de Newton de la viscosidad. La viscosidad de un fluido NN no existe como tal, ya que depende del valor que tenga en cada momento el esfuerzo cortante τ , por tanto, es variable. El parámetro τ se denomina viscosidad aparente (Pa·s), pero no solo varía con la temperatura,

sólidos totales (ST, %), etc., como lo hace μ , sino también con τ (Navarro et al., 2007).

La diferencia básica entre el comportamiento de los fluidos N y NN es la longitud de la molécula, de forma que aquellos fluidos con moléculas de pequeño tamaño (agua, vapor de agua, todos los gases, etc.) presentan un comportamiento N en contraposición con aquellos (fangos, emulsiones, pinturas, etc.) que poseen moléculas de mayor tamaño y se comportan como fluidos NN (Navarro et al., 2007; Levenspiel, 2022). Los fluidos N son aquellos en los que la viscosidad es inherente a la naturaleza fisicoquímica de los mismos y, por tanto, independiente del esfuerzo cortante aplicado. Otra diferencia importante entre los fluidos N y NN se puede visualizar mediante el análisis de las ecuaciones (2) y (3) (Martín et al., 2011).

$$\tau = \mu \cdot (du/dy), \text{ Ley N, } \mu = \text{constante} \quad (2)$$

$$\tau = \eta \cdot (du/dy), \text{ Ley NN, } \eta = \text{variable} \quad (3)$$

La reología es definida en el Diccionario de la lengua española como, “el estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos”. La reología de un fango varía sensiblemente de una muestra a otra en fun-

ción de los procesos de tratamiento realizados (Haldenwang et al., 2012), y es la ciencia que describe la deformación de los fluidos bajo la influencia de tensiones tangenciales (Seyssiecq et al., 2003).

Las variables que influyen en la viscosidad dinámica son:

1. ST: aumenta al incrementarse ST. Se han descrito dos tipos de modelos matemáticos para considerar el efecto de ST en la viscosidad según la ecuación (4), modelo potencial y la ecuación (5), exponencial.

$$\mu = K_1 \cdot ST^{A1} \quad (4)$$

$$\mu = K_2 \cdot e^{A2 \cdot ST} \quad (5)$$

donde K_1 , K_2 , A_1 y A_2 son constantes.

2. Temperatura: disminuye al aumentar la temperatura. Varias fórmulas permiten evaluar la variación de la viscosidad de un fluido al cambiar la temperatura, y la ecuación (6) de Arrhenius es la más utilizada:

$$\mu = A \cdot e^{B/T} \quad (6)$$

donde T es la temperatura absoluta (K), A y B constantes.

3. Presión: su efecto se ignora en el cálculo de la viscosidad (Panchi Gua-

noluisa, 2013).

Hay varios modelos reológicos de los fluidos NN: ecuación (7), Sisko; ecuación (8), Careau; ecuación (9), Cross; ecuación (10), Bingham; ecuación (11), Ostwald (potencial), y ecuación (12), Herschel-Bulkley.

$$\mu = \mu_{\infty} + K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \tag{7}$$

$$\frac{\mu - \mu_0}{\mu_0 - \mu_{\infty}} = (1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^2)^{\frac{n-1}{2}} \tag{8}$$

$$\frac{\mu - \mu_0}{\mu_0 - \mu_{\infty}} = \frac{1}{1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^m} \tag{9}$$

$$\tau = \tau_0 + \eta_B \cdot \dot{\gamma}^n \tag{10}$$

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \tag{11}$$

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \tag{12}$$

donde μ_{∞} es la viscosidad aparente en el límite (Pa·sⁿ); K, el índice de consistencia (Pa·s); $\dot{\gamma}$, la velocidad de deformación (s⁻¹); n, el índice de flujo; μ_0 , la viscosidad aparente de cizalladura inicial (Pa·s); λ , la constante de tiempo (s); m, la constante de velocidad; τ_0 , la tensión umbral (Pa), y η_B , la viscosidad límite de alta cizalladura (Pa·s) (Hong et al., 2017).

Los fluidos NN se pueden clasificar en:

- a. Fluidos independientes del tiempo: Velocidad de cizalladura= función de τ únicamente (García Villegas 2008)
- La figura 1 a muestra el valor de τ y la figura 1 b el de η , ambos en función de $\dot{\gamma}$ para distintos tipos de fluidos NN.

Los fluidos NN de este tipo pueden ser:

1. Plásticos reales o de Herschel-Bulkley: se comportan como sólidos elásticos, almacenando cierta cantidad de energía cuando son sometidos a esfuerzos por debajo de cierto valor umbral τ_0 , mientras que con un esfuerzo superior se deforman continuamente como un fluido, y el esfuerzo es una función no lineal de la velocidad de deformación. El índice de flujo es $n < 1$. Ejemplos típicos son: mahonesa, mermelada, arena

de playa mojada, etc.

2. Plásticos ideales o de Bingham: requieren el desarrollo de un nivel significativo de tensión umbral τ_0 antes de empezar a fluir y la tensión cortante varía de forma proporcional con la velocidad de deformación, siendo $n = 1$. Cuando $\dot{\gamma}$ tiende a ∞ , entonces $\eta_B = \mu$. Algunos ejemplos son: chocolate, salsa de tomate, pasta de dientes, etc.
3. Seudoplásticos o adelgazantes: reducen su viscosidad dinámica aparente al aumentar la velocidad de deformación. Muchos materiales muestran este tipo de comportamiento en mayor o menor grado y es el comportamiento más común, con $n < 1$. Ejemplos de ellos son el plasma sanguíneo, la arcilla (Navarro et al., 2007), la pulpa de papel y la pintura (Levenspiel, 2022).
4. Dilatantes: aumentan su viscosidad dinámica aparente al ser incrementada la velocidad de deformación, causada por reorganizaciones dentro de su microestructura interna, donde $n > 1$. Estos fluidos son poco numerosos: fécula de maíz en etilenglicol, almidón en agua etc. (Navarro et al., 2007), arenas movedizas y algunas emulsiones de arena (Ramiro Betancourt-Grajales, 2022).
- b. Fluidos dependientes del tiempo:

Son fluidos cuyo comportamiento en un momento determinado está influenciado por lo que le haya ocurrido en el pasado reciente. Por ejemplo, la salsa de tomate que ha estado en reposo durante un rato no verterá. Sin embargo, recientemente agitada verterá fácilmente. Estos fluidos parece que tienen una memoria que se desvanece con el tiempo. Velocidad de cizalladura = función de τ según su historia pasada (Gardea-Villegas, 2007).

La figura 2 muestra la representación de la variación de τ frente al tiempo para tres tipos de fluidos, con $\dot{\gamma}$ constante (Bergadá-Grañó, 2012).

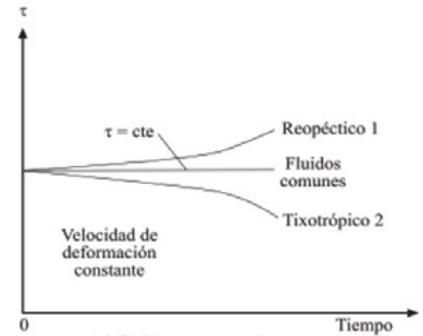


Figura 2. Diagrama de variación del esfuerzo cortante frente al tiempo.

Estos tipos de fluidos NN son los siguientes:

1. Tixotrópicos: disminución reversible del esfuerzo cortante con el tiempo cuando $\dot{\gamma}$ es constante, por ejemplo: manteca, pintura y tinta (Navarro et al., 2007).
2. Reopécticos: aumento reversible del esfuerzo cortante con el tiempo cuando $\dot{\gamma}$ es constante (Navarro et al., 2007; Ramiro Betancourt-Grajales, 2022).

2. Objetivos

El objetivo de este artículo ha sido realizar el cálculo teórico de la pérdida de carga y energía asociadas a la impulsión de fangos deshidratados a partir de datos referenciados de viscosidad dinámica y aplicación de las ecuaciones clásicas de la mecánica de fluidos para flujo laminar. Estos resultados han sido comparados con valores reales obtenidos durante la operación de la EDAR de Burgos en el mes de marzo del año 2016 con objeto de poder establecer la viabilidad del procedimiento matemático adoptado durante el proceso de cálculo. Se ha desarrollado un análisis de sensibilidad de la impulsión para estudiar el comportamiento del flujo de fango y la variación de diversos factores operacionales de las bombas de impulsión. Finalmente, se ha calculado el diámetro económico de la impulsión.

3. Metodología

3.1. Descripción del escenario

La impulsión de fangos deshidratados objeto de análisis ha sido la existente en la EDAR de Burgos. La capacidad de tratamiento de aguas residuales en el año 2016 era de 118.000 m³/día y 833.000 habitantes equivalentes (EDAR, 2022).

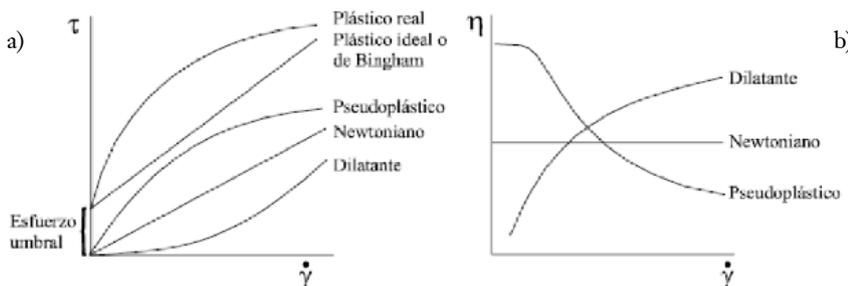


Figura 1. Diagramas de comportamiento de fluidos NN. a) Tensión cortante y b) viscosidad dinámica aparente en función ambos de la velocidad de deformación.

La figura 3 representa el diagrama de operación del bloque deshidratación de fangos. Con objetivo de regular convenientemente el flujo de fango digerido de entrada, se dispone de un depósito tampón desde el cual unas bombas de tornillo impulsan el fango a las bombas centrífugas en las que se añade una solución de polielectrolito y agua. El fango una vez deshidratado es enviado al silo de fangos por medio de un tornillo transportador y dos bombas de tornillo helicoidal. Los centrados originados son enviados a los decantadores primarios por gravedad, con objeto de ser recirculados nuevamente al proceso.

La figura 4 indica un esquema funcional del bombeo de fangos deshidratados al silo, que ha constituido el escenario de cálculo y donde se puede observar todo el equipamiento necesario para efectuar la deshidratación.

3.2 Equipamiento y datos de producción de fango

La tabla 1 indica las características principales del equipamiento necesario para efectuar la deshidratación.

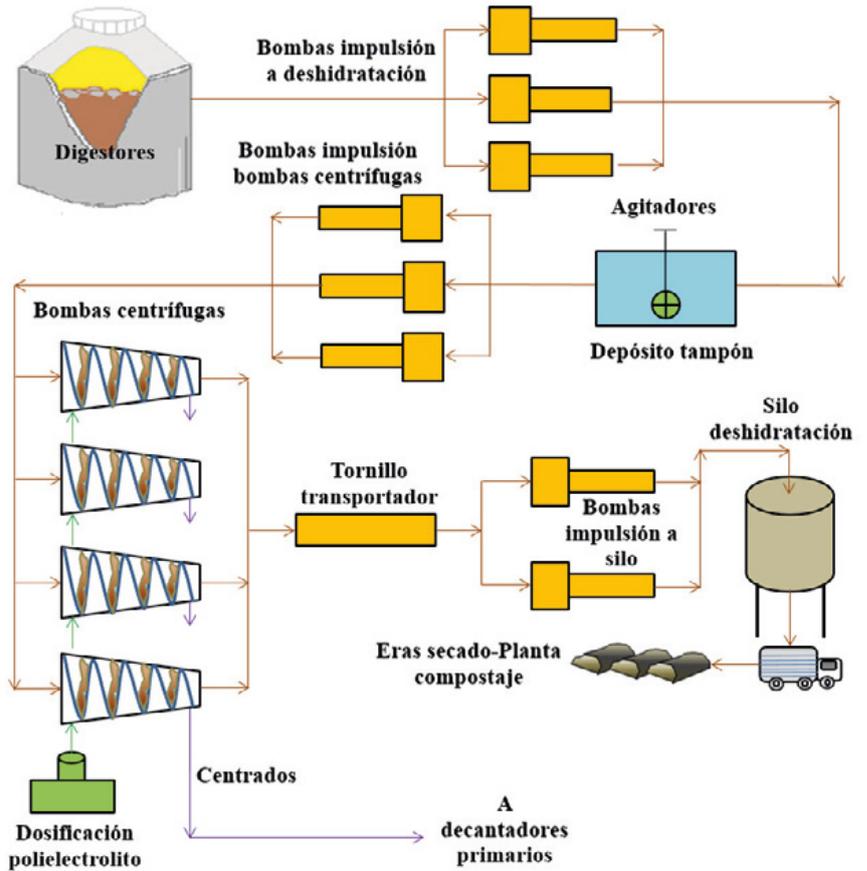


Figura 3. Diagrama de operación de la deshidratación de fangos.

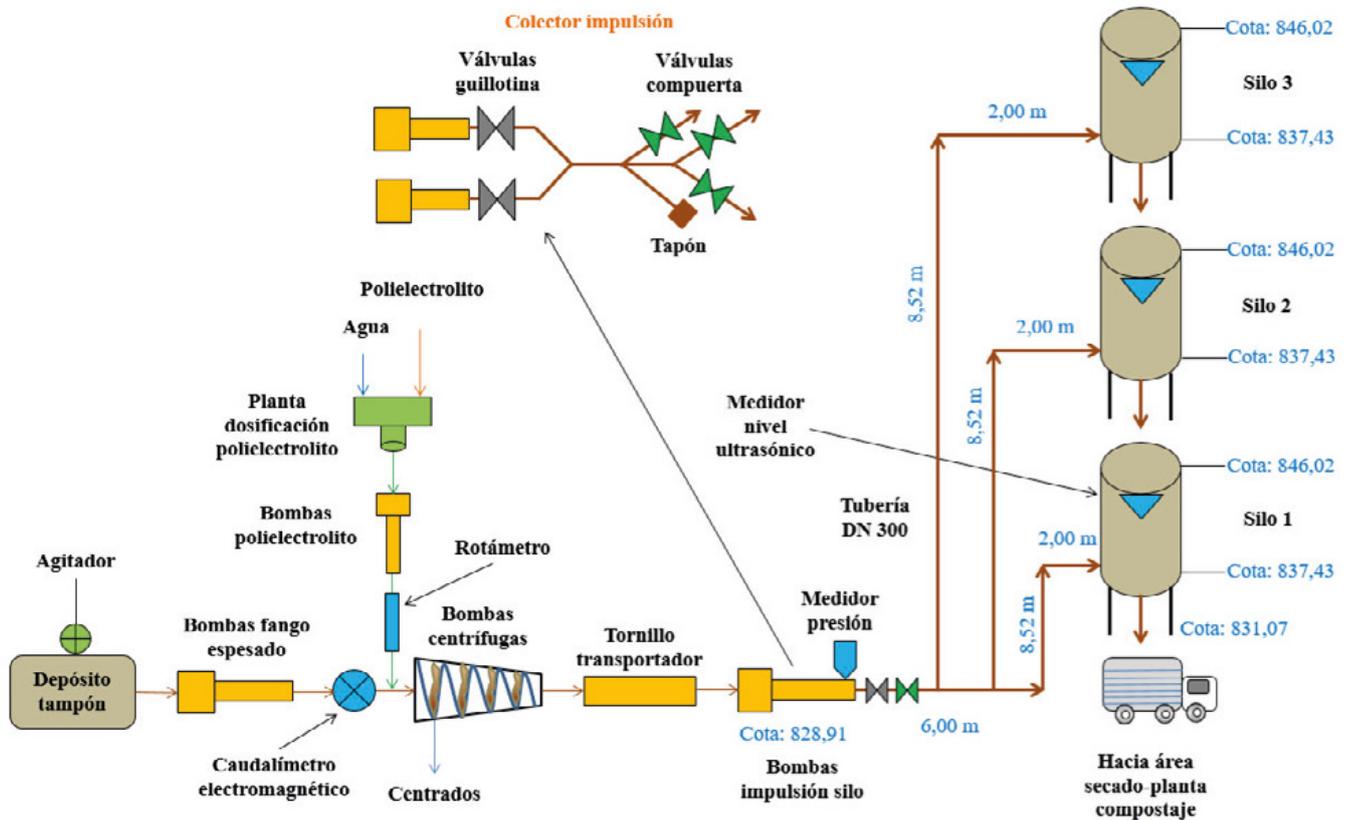


Figura 4. Diagrama del proceso del bombeo de fangos deshidratados.

Equipo	Valor	Equipo	Valor
Bombas centrífugas		Bombas de impulsión	
Número (uds)	4	Número (uds)	2
Rendimiento (%)	90	Caudal (m³/h)	18
Caudal nominal entrada (m³/h)	34,6	Velocidad (r.p.m)	60
ST entrada (%)	3,5	Diámetro impulsión (mm)	200
ST salida (%)	30	Presión (bar)	24
Velocidad (r.p.m)	3.800	Potencia instalada (kW)	45
Potencia instalada (kW)	37,5	Silo	
Tornillo Transportador		Número (uds)	3
Número (uds)	1	Capacidad (m³)	125
Caudal (m³/h)	17	Diámetro (m)	4
Velocidad (r.p.m)	26	Altura (m)	10
Potencia instalada (kW)	7,5	Potencia instalada (kW)	6,25
<i>Rendimiento mecánico bombas de tornillo: 50% (Albosa 2021)</i>			

Tabla 1: Equipamiento de deshidratación (EDAR, 2022)

La tabla 2 muestra los valores medios de ST y caudal de los diferentes tipos de fangos producidos en la EDAR durante los años 2010-2016 (EDAR, 2022). Los datos del fango deshidratado constituyen el denominado punto de operación (PO), objeto de análisis.

La tabla 3 presenta los datos de caudal de fango deshidratado, ST y altura media de impulsión tomada in situ en la EDAR durante el mes de marzo de 2016 agrupados en 4 semanas, con objeto de comparar, posteriormente, los resultados teóricos y experimentales.

Se han establecido 4 escenarios de análisis: el escenario 1 contempla la comparación entre los valores teóricos obtenidos y los experimentales de

de la presión media de impulsión acontecidos durante el mes de marzo de 2016; el escenario 2 estudia la variación de una serie de parámetros con el valor ST en PO en función del caudal de fango deshidratado; el escenario 3 representa el análisis de sensibilidad de la impulsión variando el diámetro, ST y la longitud equivalente en función del caudal de fango deshidratado. Por último, el escenario 4 permite calcular el diámetro económico de la tubería de impulsión.

3.3. Ecuaciones necesarias

La ecuación (13) indica el cálculo de la altura total de impulsión (htotal, m). La ecuación (14) permite obtener la pérdida de carga que experimenta un fluido al circular por una tubería según la ecuación de Darcy-Weisbach.

Fango	ST (%)	Caudal
Primario	4,7	17,6
Secundario	6,7	10,1
Mixto	5,4	27,7
Digerido	3,6	27,3
Deshidratado	20,3	4,3
Centrados	0,4	24,5

Tabla 2. Datos analíticos medios de los fangos.

Días	Fango deshidratado (m³/h)	ST (%)	Altura media medida (m)
1-7	4,3	20,9	53
8-14	4,9	22,4	57
15-22	5,1	22,4	57
23-30	4,4	21,4	50
Media	4,7	21,8	54,2

Tabla 3. Datos medios semanales de caudal de fango deshidratado, ST y altura media de impulsión tomada en campo en marzo de 2016 (EDAR, 2022).

La ecuación (15) permite calcular la pérdida de carga directamente partiendo de las ecuaciones de Darcy-Weisbach, Poiseuille y número de Reynolds (Re, adimensional) considerando régimen laminar. La ecuación (16) indica el cálculo de la longitud equivalente de tubería (Leq, m) y la ecuación (17) el Re. Normalmente, al ser la velocidad máxima recomendable de circulación del fango deshidratado por las tuberías de impulsión de 0,06 m/s (Albosa, 2021), resulta $Re < 2.300$, lo que significa circulación en régimen laminar y se traduce en un valor para f establecido según la ecuación (18) de Poiseuille. La ecuación (19) indica la potencia teórica necesaria (P, kW) para bombear el fango deshidratado.

$$h_{total} = h_{geo} + \Delta h \tag{13}$$

$$\Delta h = f \cdot \frac{L_{eq}}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \tag{14}$$

$$\Delta h = \frac{4,16 \cdot \mu \cdot L_{eq} \cdot Q_{fa}}{\rho \cdot D^4 \cdot 3.600} \tag{15}$$

$$L_{eq} = L_{tub} + L_{acc} \tag{16}$$

$$Re = \frac{V \cdot D \cdot \rho}{\mu} \tag{17}$$

$$f = \frac{64}{Re} \tag{18}$$

$$P = \frac{Q_{fa} \cdot \rho \cdot g \cdot h_{total} \cdot 10^{-3}}{3.600 \cdot \delta_b} \tag{19}$$

Donde h_{geo} es la altura geométrica (m); Δh , la pérdida de carga (m); L_{tub} , la longitud de la tubería de impulsión (m); L_{acc} , la longitud equivalente de los accesorios (m); μ (η), la viscosidad dinámica (Pa.s) del fango; ρ , su densidad (kg/m^3); Q_{fa} , su caudal (m^3/h); D , el diámetro de la tubería de impulsión (m); V , la velocidad (m/s); g , la aceleración de la gravedad (m/s^2), y δ_b , el rendimiento mecánico de la bomba (%).

Para el cálculo de las pérdidas singulares se ha utilizado el método de la longitud equivalente aplicando los valores obtenidos del ábaco del Hydraulic Institute (Hydraulic Institute, 2022) en función del tipo de elemento singular considerado y de su diámetro.

3.4. Viscosidad dinámica

La tabla 4 indica los valores analíticos de la viscosidad absoluta del fango deshidratado en función de ST basados en datos suministrados por la empresa británica Mono, una de las líderes mundiales en la fabricación de bombas de cavidad progresiva y piezas afines

ST (%)	15	16	16,8	17,8	19	20	21,8	23,5	25,8	28	31	35
μ tubería (Pa·s)	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
ST (%)	15	20	25	30	35							
μ tubería (Pa·s)	25	70	110	140	170							

Tabla 4. Viscosidad absoluta del fango deshidratado en tubería y cavidad de la bomba en función de ST.

Diámetro (m)	Tubería (€/ml)	Ampliaciones (€/ud)	Tes (€/ud)	Codos (€/ud)	Guillotinas (€/ud)	Compuertas (€/ud)
0,15	168,44	112,88	44,02	102,27	337,59	261,70
0,20	214,08	148,72	61,42	157,76	537,84	375,15
0,25	247,52	184,55	71,40	268,91	744,92	675,86
0,30	286,91	261,84	80,24	406,64	1.134,00	854,22
0,35	412,42	326,40	92,48	482,80	2.393,04	2.042,97
0,40	471,34	380,80	111,93	774,30	2.439,10	2.782,42
0,45	565,08	421,60	124,17	847,28	2.914,95	3.400,00
0,50	636,65	462,40	147,15	897,60	3.390,80	4361,61

Tabla 5. Precios unitarios. Referencia de precios de acero inoxidable: (Almesa, 2022). Referencia de precios unitarios de válvulas: (Talis Belgicast, 2022).

(Albosa, 2021). En dichos datos, no se han tenido en cuenta la acción de factores como la temperatura, los sólidos volátiles, el pH, etc.

3.5. Diámetro económico

Se define la función coste anual de la impulsión de fango deshidratado C (€) mediante la ecuación (20) (Bernis, 2020), en la que C₁ (€) es el coste correspondiente al consumo de energía eléctrica anual expresado en la ecuación (21) y C₂ (€) es el coste anual de la inversión en tuberías, piezas especiales y válvulas indicado según la ecuación (22). Por otro lado, la ecuación (23) representa el valor del tipo de amortización de la inversión realizada (a, s.u.) (Bernis, 2020).

$$C = C_1 + C_2 \tag{20}$$

$$C_1 = \frac{Q_{fa} \cdot \rho \cdot g \cdot (l_{geom} + \frac{4,16 \cdot \mu \cdot L_{eq} \cdot Q_{fa}}{\rho \cdot D^4 \cdot 3.600}) \cdot 10^{-3}}{3.600} \cdot N_{horas} \cdot P_{EE} \tag{21}$$

$$C_2 = [L_{tub} \cdot P_{tub} + N_{ampl} \cdot P_{ampl} + N_{tes} \cdot P_{tes} + N_{codos} \cdot P_{codos} + N_{guill} \cdot P_{guill} + N_{comp} \cdot P_{comp}] \cdot a \tag{22}$$

$$a = \frac{r \cdot (1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \tag{23}$$

Donde, N_{horas} es el número de horas anuales de funcionamiento de la impulsión (h), P_{EE} es el precio unitario del suministro de energía eléctrica (€/kWh), P_{tub}, P_{ampl}, P_{tes}, P_{codos}, P_{guill}, P_{comp} son los precios unitarios de las tuberías (€/ml), ampliaciones de diámetro, tes, codos, válvulas de guillotina y compuerta (€/ud), N_{ampl}, N_{tes}, N_{codos}, N_{guill}, N_{comp} son el número de unidades de cada pieza especial (uds), r es el tipo de interés anual (s.u.) y t es el número de años de amortización (años).

Se ha considerado que las bombas de fango deshidratado operan durante 8.760 h/año (50% bomba 1 y 50% bomba 2, caso real en la EDAR de Burgos), un precio de la energía eléctrica, solo término de energía, media de los 6 periodos P1-P6 tarifa ATR 6.2 (EDAR, 2022) de 0,1858 €/kWh (AEGE, 2022), un tipo de interés anual del 3% (Banco de España, 2017) y un periodo de amortización estimado de 25 años. La tabla 5 indica el valor del precio unitario de las tuberías, piezas especiales y válvulas en función del diámetro.

4. Resultados y discusión

4.1. Variación de ST del agua residual y fango

La figura 5a indica la variación de ST en las aguas residuales desde su entrada como agua bruta hasta su salida como depurada, mientras que la figura 5b presenta la variación del mismo parámetro para el fango (EDAR, 2022). La

disminución de ST en el agua residual es del 96,8%, lo que da una idea de la efectividad del tratamiento realizado. El incremento de ST en el fango primario y secundario en los espesadores de gravedad y flotación es del 859% y del 2.691%, mientras que para el fango deshidratado es del 463,9%.

4.2. Viscosidad absoluta del fango en tubería y cavidad de la bomba

La figura 6a muestra la variación de la viscosidad del fango deshidratado en tubería y bomba en función de ST.

La velocidad en la hidráulica de la bomba es mucho mayor que en la tubería. Por eso, su viscosidad es mucho menor, lo que, junto con el valor elevado del par de arranque, constituye un comportamiento típico del modelo de Herschel-Bulkley. Cuando ST es un 20%, la viscosidad en la bomba es 70 Pa·s y en la tubería 500 Pa·s, un valor el 614,3% superior. La viscosidad

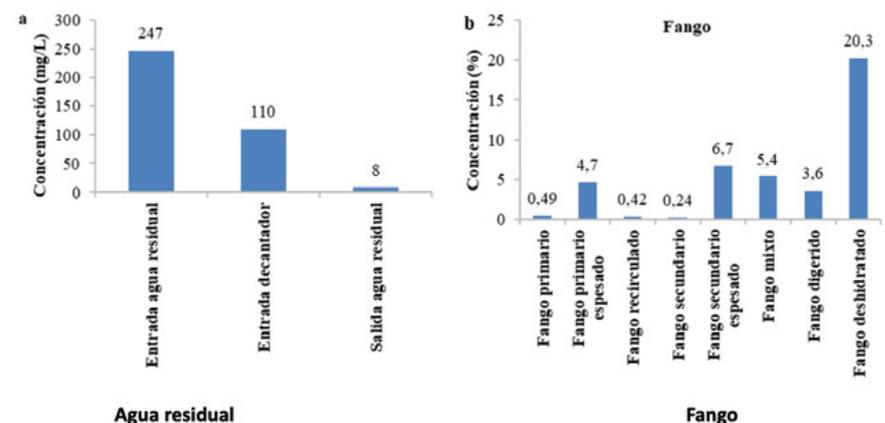


Figura 5. Variación de ST. a) Agua residual y b) fango.

dentro de la bomba puede variar dentro de un estrecho margen de valores, 25-175 Pa·s, mientras que en la tubería varía entre 250 y 800 Pa·s. La figura 6b presenta los resultados de la curva $d(\eta)/d(ST)$ en función de ST en tubería y bomba, donde se aprecia que el incremento relativo de la viscosidad en tubería es mucho más elevado para valores bajos que altos, puesto que la curva se va aplanando progresivamente a valores crecientes de ST, mientras que, en la bomba, este valor se mantiene constante.

4.3. Pérdida de carga y energía

La tabla 6 indica los datos comunes de partida y los valores obtenidos para el cálculo de los escenarios 1, 2, 3 y 4. La viscosidad cinemática del fango para ST del 20,3% es 0,4741 m²/s, mientras que la del agua a 20 °C es de 1,008·10⁻⁶ m²/s, o sea 470,337 veces más elevada, lo que da una idea de las enormes fuerzas de cizalla existentes en las paredes de las tuberías que se oponen al movimiento del fluido. El colector de salida, con todas las piezas especiales y válvulas, origina una elevada pérdida de carga del orden del 71,1% del total. A continuación, en orden de magnitud, se encuentran los 3 codos de radio largo de 90 grados, que originan unas pérdidas de carga del 13%. La longitud equivalente del circuito supone el 88,7% del total, lo que indica la gran importancia que tiene la correcta predisposición de los elementos singulares para reducir la pérdida de carga.

La tabla 7 muestra los resultados obtenidos de forma teórica y experimental de la altura de impulsión acontecidos

La tabla 8 representa los resultados teóricos obtenidos de pérdida de carga y energía en la impulsión del escenario 2 para el caso ST 20,3% en función del caudal de fango deshidratado. Los resultados obtenidos en el PO de la planta han sido señalados en negrita.

Cuando operan 3 bombas centrífugas a caudal nominal impulsando por una sola tubería, la velocidad es de 0,073 m/s, el 21,7% superior a la máxima recomendada de 0,06 m/s. La velocidad en PO es 0,017 m/s < 0,06 m/s, el 71,7%. Sin embargo, al estar las tuberías dispuestas en paralelo, el máximo caudal que puede circular por cada una de ellas es 5,5 m³/h, que es la capacidad nominal de cada bomba centrífuga, aunque se ha analizado el caso de fluir todo el caudal por una sola tubería.

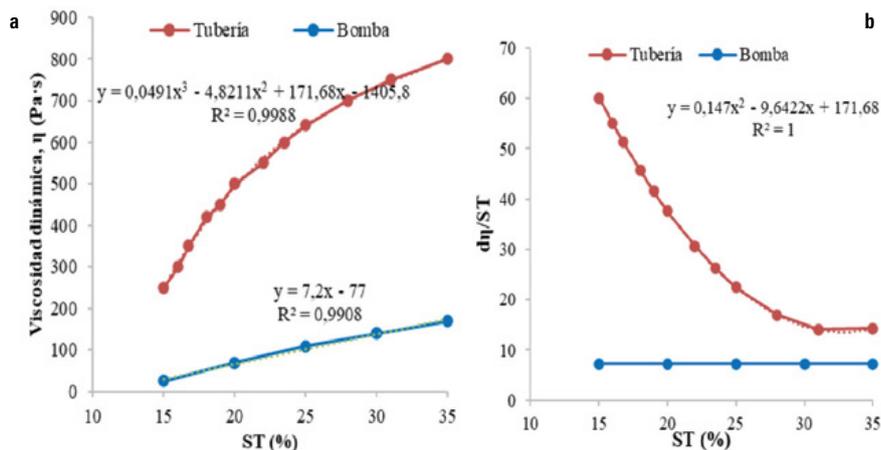


Figura 6. Variación en función de ST. a) Viscosidad dinámica. b) $d(\eta)/d(ST)$.

Parámetro	Datos comunes partida	Longitud equivalente (m)
Diámetro tubería (m)	0,300	...
Longitud tubería (m)	14,36	...
Ampliaciones diámetro (uds)	1	2,5
Codos 90° (uds)	3	16,5
Válvulas guillotina (uds)	1	1,6
Válvulas compuerta (uds)	1	1,6
Tes (uds)	5	90
Altura geométrica media (uds)	12,82	...
ST(%)	20,3	...
Viscosidad dinámica (Pa·s)	490,7	...
Densidad (Kg/m ³)	1.061	...
Viscosidad cinemática (m ² /s)	04741	...
Parametro	Valores comunes	
Longitud equivalente (m)	112,20	
Longitud total (m)	126,56	
Leq/Ltot (%)	88,7	

Tabla 6. Escenarios 1, 2, 3 y 4: datos de partida, longitud equivalente y valores comunes obtenidos.

Q (m ³ /h)	V (m/s)	V (m ² /s)	Re (s.u)	f (s.u.)	Δh (m)	h_{total} media teórica	h_{total} media real (m)
4,3	0,017	0,4929	0,010	6.249	38,1	50,9	53
4,9	0,019	0,5356	0,011	5.894	47,7	60,5	57
5,1	0,020	0,5356	0,011	5.698	49,3	62,1	57
4,4	0,017	0,5080	0,010	6.264	40,4	53,2	50
4,7	0,018	0,5188	0,011	6.014	43,8	56,7	54,2

Tabla 7. Escenario 1: resultados teóricos y experimentales obtenidos de la altura de impulsión.

Parámetro	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
Caudal	2,48	4,3	6,21	8,69	12,41	14,90	18,62
Nº bombas centrífugas (uds)	1	1	1	2	2	3	3
Nº bombas impulsión (uds)	1	1	1	1	1	1	1
Velocidad (m/s)	0,010	0,017	0,024	0,034	0,049	0,059	0,073
Número Reynolds (s.u)	0,06	0,011	0,015	0,022	0,031	0,037	0,046
Coefficiente rugosidad (s.u.)	10.373	5.982	4.142	2.960	2.73	1727	1.382
Pérdida de carga (m)	21,23	36,80	53,15	74,38	106,22	127,54	159,38
Altura total media (m)	34,04	49,62	65,97	87,20	119,04	140,35	172,19
Potencia media absorbida (kW)	0,49	1,23	2,37	4,38	8,53	12,08	18,52

Tabla 8. Escenario 2: pérdida de carga y potencia absorbida para ST 20,3% en función del caudal de fango deshidratado.

Resultan unos valores de Re muy bajos, del orden de 0,011, muy distantes del valor de 2.300 que marca la separación entre flujo laminar y turbulento. Esto indica una muy clara circulación en régimen laminar. El valor de f es 5.982, muy elevado en comparación con los obtenidos normalmente para el caso del agua de 0,010-0,020. El valor de f es tanto más grande cuanto más pequeño sea el caudal, pues f es inversamente proporcional al valor del Re , que sigue la tendencia contraria. Por otro lado, f disminuye proporcionalmente al aumentar el caudal; sin embargo, la pérdida de carga aumenta en función de su cuadrado, por lo que esta variable en su conjunto aumenta.

4.4. Estudio de sensibilidad

La figura 7 representa los resultados del escenario 3. Las figuras 7a y 7b

visualizan la variación de la pérdida de carga y la potencia media consumida en función del caudal de fango deshidratado variando el diámetro. La figura 7c y 7d indica lo mismo, variando ST. Finalmente, la figura 7e y 7f, ídem modificando la longitud equivalente.

En todos los casos se puede observar la variación lineal de la pérdida de carga con el caudal. Sin embargo, la potencia absorbida varía de forma cuadrática, pues depende de Qfa^2 . La altura máxima total de bombeo para caudal máximo y ST 30% (ST máximo de las bombas centrífugas) alcanza el valor de 225 m en PO, valor que identifica plenamente la instalación de esta bomba de 24 bares de presión. Destaca la reducción en la pérdida de carga al modificar el diámetro, por

ejemplo, de 300-350 mm (incremento $D = 16,7\%$), pues disminuye el 46,1% y la potencia absorbida, el 45%. Por otro lado, se observa el gran incremento en la pérdida de carga cuando se disminuye el diámetro a 250 mm, aumentando el 107,3% y la potencia el 95%. Se

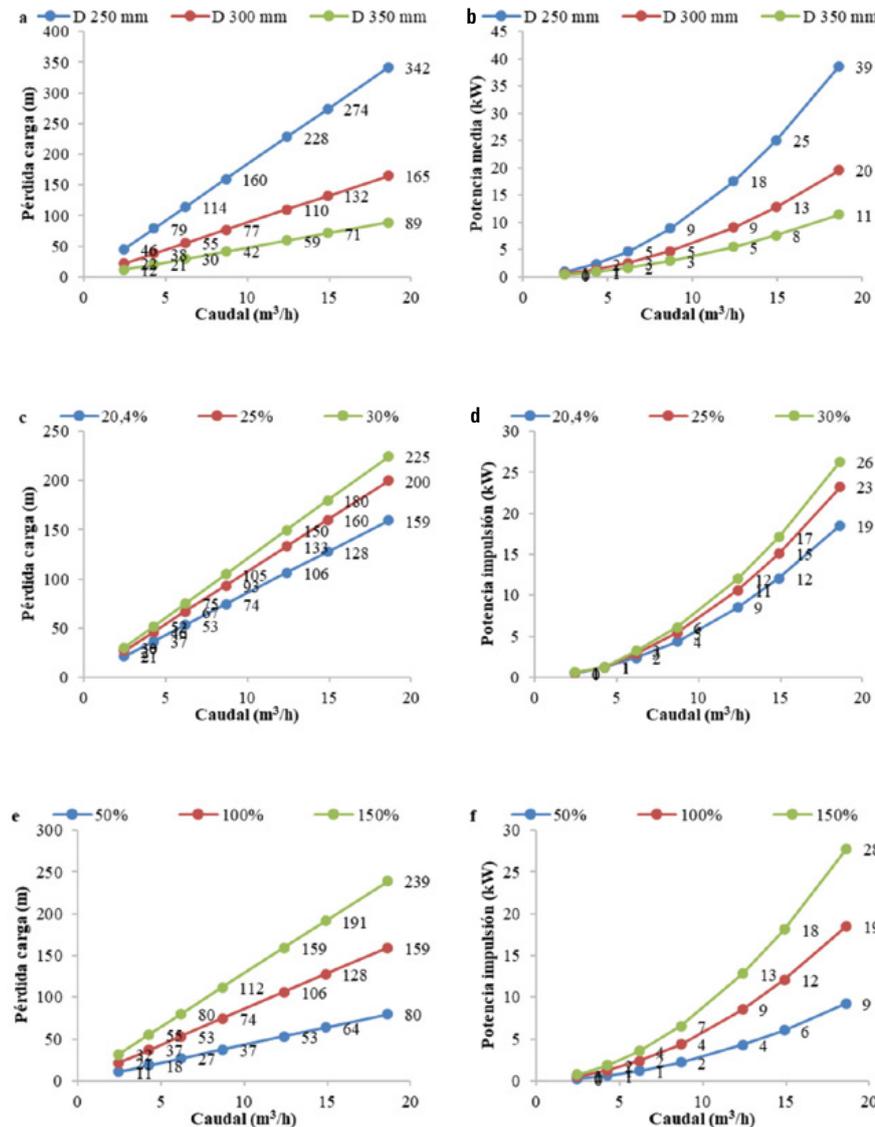


Figura 7. Escenario 3: pérdida de carga y potencia absorbida en función del caudal de fango deshidratado. a) y b) Variación del diámetro. c) y d) ST y e) y f) longitud equivalente.

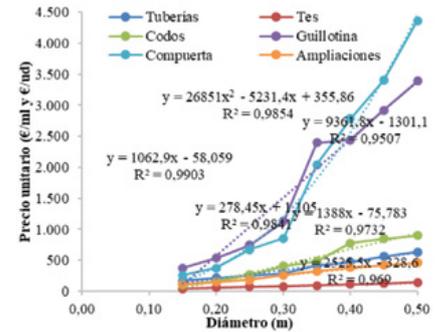


Figura 8. Líneas de tendencia y R^2 del precio unitario de los elementos de la impulsión en función del diámetro.

observa que cuanto mayor es ST, menor es el incremento relativo en la pérdida de carga, pues sigue la curva $\eta = f(ST)$. El incremento o disminución de la longitud equivalente influye de forma directamente proporcional en la pérdida de carga con iguales incrementos.

4.5. Diámetro económico

La figura 8 representa las líneas de tendencia y coeficientes de correlación R^2 del precio unitario de las tuberías, piezas especiales y válvulas en función del diámetro de la tubería. Se observa el comportamiento lineal de cinco de los seis precios unitarios representados en función de D , y solo resulta el precio de las válvulas de compuerta con una variación de tipo cuadrática.

Para calcular el diámetro económico de la impulsión, se deriva la función C con respecto a D e iguala a cero, o sea:

$$\frac{dC}{dD} = 0$$

Posteriormente, se sustituye D en la segunda derivada:

$$\frac{d^2C}{dD^2}$$

Y si el resultado obtenido es mayor que cero, entonces D hará que el valor de la función C sea mínimo, y se denomina diámetro económico D_{econ} (m)

de la impulsión.

La ecuación (24) indica el valor de C en función del diámetro de la tubería D.

$$C = \frac{Q_{fa} \cdot \rho \cdot g \cdot (h_{geom} + \frac{4,16 \cdot \mu \cdot L_{eq} \cdot Q_{fa}}{\rho \cdot D^4 \cdot 3.600}) \cdot 10^{-3}}{3.600} \cdot$$

$$N_{horas} \cdot P_{EE} + [L_{tub} \cdot (1.670 \cdot D - 151) + N_{ampl} \cdot (245 \cdot D) + N_{tes} \cdot (1.500 \cdot D) + N_{codos} \cdot (1.000 \cdot D) + N_{guill} \cdot (8.332 \cdot D + 0,4) + N_{sosep} \cdot (5.480 \cdot D - 924)] \cdot a$$

Derivando la ecuación (24) con respecto a D y se iguala a cero, resulta la ecuación (25).

$$\frac{dC}{dD} = Q_{fa} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{-4 \cdot 4,16 \cdot \mu \cdot L_{eq} \cdot Q_{fa}}{\rho \cdot D^5 \cdot 3.600^2} \cdot$$

$$10^3 \cdot N_{horas} \cdot P_{EE} + [L_{tub} \cdot (1.670) + N_{ampl} \cdot 245 + N_{tes} \cdot (1.500) + N_{codos} \cdot 1.000 + N_{guill} \cdot (8.332) + N_{comp} \cdot (5.480)] \cdot a = 0$$

Derivando nuevamente la ecuación (25) con respecto a D se obtiene la ecuación (26).

$$\frac{d^2C}{dD^2} = Q_{fa} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{-4 \cdot 5 \cdot 4,16 \cdot \mu \cdot L_{eq} \cdot Q_{fa}}{\rho \cdot D^6 \cdot 3.600^2} \cdot 10^3 \cdot N_{horas} \cdot P_{EE}$$

Sustituyendo el D calculado según la ecuación (25) en la ecuación (26), se puede observar que:

$$\frac{d^2C}{dD^2} > 0$$

luego indica que D_{econ} es un valor que

hace mínima la función C, coste de la impulsión.

La figura 9a representa las tres funciones de coste anteriores, C₁, C₂ y C = C₁ + C₂ y la figura 9b su derivada con respecto a D, ambas en función de D, con los valores del PO.

Se observa en la figura 9a la variación prácticamente lineal creciente del coste de la inversión en tuberías, piezas especiales y válvulas, en contraste con el carácter potencial decreciente de la función coste de la energía eléctrica. El valor del diámetro económico que ha hecho mínimo el coste anual de la impulsión operando durante un periodo de 25 años ha resultado ser D_{econ}=0,450 m. La figura 9b indica claramente que cuando:

$$D \text{ tiende a } \infty, \frac{dC_1}{dD} \approx 0 \text{ y } \frac{d[C_1 + C_2]}{dD} \approx \frac{dC_2}{dD}.$$

La tabla 9 muestra cómo varía Decon en función del incremento de 10 variables presentes en las ecuaciones (21) y (22). De las

variables incrementadas, el Decon aumenta con seis de ellas, disminuye en tres y no le afecta en una.

5. Conclusiones

La gran diferencia entre los valores de la viscosidad dinámica en tubería y bomba demuestran fielmente el carácter no newtoniano del fango deshidratado. Su tendencia a la disminución no lineal al incrementarse la velocidad de deformación junto con la necesidad de un elevado par de arranque en la bomba para vencer la tensión umbral, indican claramente que este fluido sigue el modelo de Herschel-Bulkley. La pérdida de carga es directamente proporcional al valor del caudal, viscosidad y longitud equivalente, e inversamente proporcional al diámetro elevado a la cuarta potencia mientras la pérdida de energía es directamente proporcional al cuadrado del caudal de fango deshidratado a igualdad

Variable (incremento)	D _{econ}
Caudal de fango	Incremento
Altura geométrica	No afecta
Viscosidad dinámica/densidad	Incremento
Longitud equivalente	Incremento
Número de horas de funcionamiento	Incremento
Precio de la energía eléctrica	Incremento
Longitud de tubería	Decremento
Coste de piezas especiales y válvulas	Decremento
Tipo de interés anual	Decremento
Número de años amortización	Incremento

Tabla 9. Variación del diámetro económico.

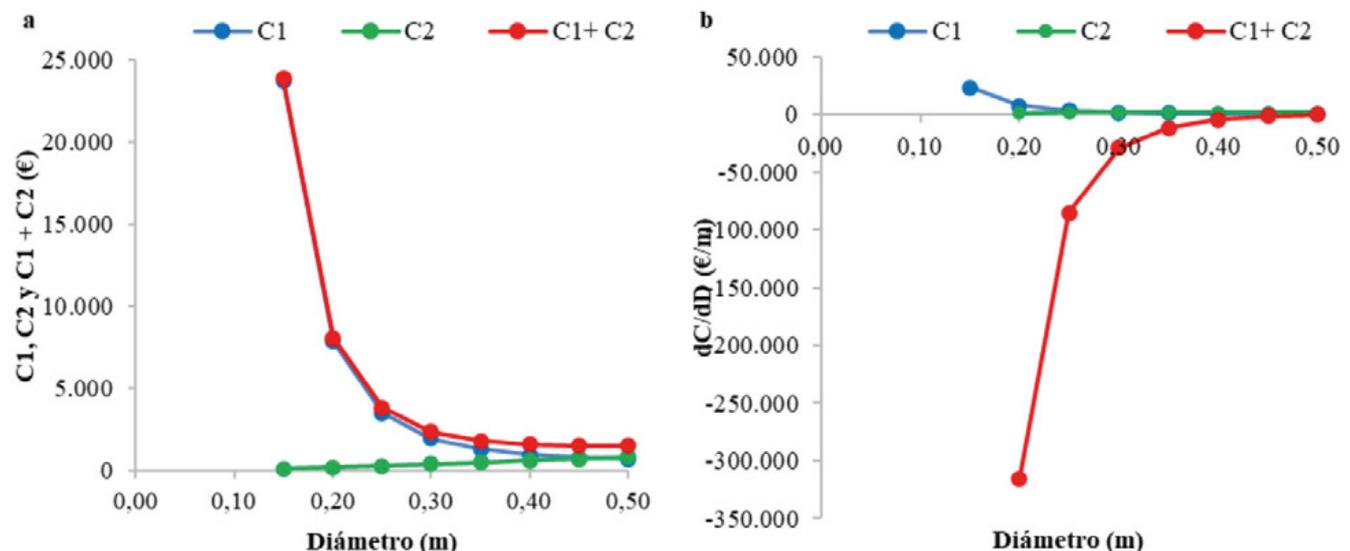


Figura 9. Variación en función de D. a) Costes de energía eléctrica C₁, elementos de impulsión C₂ y total C₁ + C₂. b) dC/dD.

de los demás parámetros. Las tes, codos y demás piezas especiales son los principales responsables de las pérdidas de carga en la impulsión, alcanzando hasta el 90% del total. Se puede afirmar que tanto la elección de las piezas especiales como el diámetro de la tubería son los factores más importantes a tener en cuenta en el diseño de una impulsión de fango deshidratado. El cálculo del diámetro económico depende de un total de 10 variables independientes, que deben ser elegidas convenientemente. El valor del precio actual de la electricidad distorsiona el valor del diámetro económico hacia valores más altos que cuando su precio era inferior.

Agradecimientos

Desearía dar las gracias a D. Pablo Piedras Romero, director de la empresa Alternativas de Bombeo S.A. y a D. Arsenio Costilla Rodríguez, jefe de planta de la EDAR de Logroño (anteriormente de Burgos), por la inestimable ayuda recibida a la hora de conseguir los datos necesarios para poder elaborar este artículo.

Referencias

- AEGE (2022). Barómetro energético en España. <https://www.aege.es/barometro-energetico-espana/>, acceso septiembre 2022.
- Albosa (2021). Análisis del transporte de fango deshidratado. Cortesía de Albosa.
- Almesa (2022). Tuberías de acero inoxidable. www.almesa.com, acceso agosto 2022.
- Banco de España (2017). Tabla de tipos de interés. http://www.bde.es/cliente-banca/es/areas/Tipos_de_Interes /Tipos_de_interes/Otros_tipos_de_i/ otros-tipos/Tabla _ tipos_de_interes_legal.html, acceso agosto 2022.
- Bergadá-Grañó J. (2012). Mecánica de fluidos. Breve introducción teórica con problemas resueltos. <https://www.researchgate.net/profile/JBergada/publication/262698142>, acceso agosto 2022.
- Bernis F (2020). Diseño económico de tuberías. Diámetro óptimo en impulsiones. https://www2.uned.es/ca-tortosa/Biblioteca_Digital/Biblio/JM_Franquet/Disen_economico.pdf, acceso agosto 2022. Betancourt-Grajales R (2022). Fenómenos de transferencia. Transferencia molecular de calor masa y cantidad de movimiento. <https://pdf-coffee.com>, acceso agosto 2022.
- EDAR (2022). Estación depuradora de aguas residuales de Burgos.
- Gardea-Villegas H (2008). Dos propuestas para el proyecto del bombeo de fluidos no newtonianos. Caso de los fangos residuales de plantas de tratamiento de aguas negras. Ingeniería, investigación y tecnología IX, 2, 87-97. <https://www.redalyc.org/pdf/404/40490201.pdf>.
- Haldenwang R, Sutherland APN, Fester VG, Holm R and Chhabra RP (2012). Sludge pipe flow pressure drop prediction using composite power-law friction factor-Reynolds number correlations based on different non-Newtonian Reynolds numbers. ISSN 0378-4738 (Print) = Water SA Vol. 38 No. 4 July 2012. <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v38i4.17>. Hong E, Yeneneh AM, Sen TK, Ang HM, Kayaalp A (2017). The relationship between physico-chemical and rheological characteristics of digested sludge, biosolid, centrate and the effects on dewatering performance (A case study). Journal of Water Process Engineering, 19, 193-204. <https://espace.curtin.edu.au/bitstream/handle>.
- Hydraulic Institute (2022). The Global Authority on Pumps and Pumping Systems. <https://www.pumps.org>, acceso agosto 2022.
- Hydraulic Institute (2022). The Global Authority on Pumps and Pumping Systems. <https://www.pumps.org>, acceso agosto 2022.
- Levenspiel (2022). Capítulo 5. Fluidos no newtonianos. http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/hja/file/Mec_Fluid_CBS/Fluidos_No_Newtonianos_Levenspiel.pdf, acceso agosto 2022.
- Martín I, Salcedo R, Font R (2011). Mecánica de fluidos. Tema1. Flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles. <https://rua.ua.es/dspace/bitstream>, acceso agosto 2022.
- Navarro S, Almera J, Botero F, Vargas P (2007). Unidad 1, Fenómenos de transporte. Hidrostática. <https://marcanord.files.wordpress.com/2012/11/unidad>, acceso agosto 2022.
- Panchi Guanoluisa AN (2013). Determinación de parámetros reológicos en bebidas de frutas con diferentes concentraciones de sólidos solubles mediante el uso del equipo universal TA-XT2I. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream>, acceso agosto 2022.
- Seysieq I, Ferrasse JH, Roche N (2003). State-of-the-art: rheological characterisation of wastewater treatment sludge. Biochemical Engineering Journal 16 (2003) 41-56. Doi: 10.1016/S1369-703X(03)00021-4.
- Talis Belgicast (2022). www.belgicast.eu, acceso agosto 2022.

Lista de símbolos

a : tipo de amortización de la inversión realizada (s.u.)	N_{tes} : número de tes (uds)
A : constante	P : potencia teórica necesaria (kW)
A₁ : constante	P_{ampl} : precio unitario de ampliaciones de diámetro (€/ud)
A₂ : constante	P_{comp} : precio unitario de válvulas de compuerta (€/ud)
B : constante	P_{codos} : precio unitario de codos (€/ud)
C : coste anual de la impulsión de fango deshidratado (€)	P_{EE} : precio unitario de energía eléctrica (€/kWh)
C₁ : coste anual del consumo de energía eléctrica (€)	P_{guill} : precio unitario de válvulas de guillotina (€/ud)
C₂ : coste anual de la inversión en tuberías, piezas especiales y válvulas (€)	PO : punto de operación
D : diámetro de la tubería de impulsión (m)	P_{tes} : precio unitario de tes (€/ud)
D_{econ} : diámetro económico de la impulsión (m)	P_{tub} : precio unitario de tuberías (€/ml)
du/dy : velocidad de deformación por unidad de longitud (s ⁻¹)	Q_{fa} : caudal de fango (m ³ /h)
EDAR : estación depuradora de aguas residuales	r : tipo de interés anual (s.u.)
f : factor de fricción (s.u.)	R² : coeficiente de correlación
g : aceleración de la gravedad (m/s ²)	Re : número de Reynolds (s.u.)
h_{geo} : altura geométrica (m)	ST : sólidos totales (%)
h_{total} : altura total de impulsión (m)	t : tiempo de amortización (años)
K : índice de consistencia (Pa·s ⁿ)	T : temperatura absoluta (K)
K₁ : constante	V : velocidad (m/s)
K₂ : constante	γ : velocidad de deformación (s ⁻¹)
L_{acc} : longitud equivalente de accesorios (m)	δ_b : rendimiento mecánico de la bomba (%)
L_{eq} : longitud equivalente de tubería (m)	Δh : pérdida de carga (m)
L_{tub} : longitud de la tubería de impulsión (m)	η : viscosidad aparente (Pa·s)
m : constante de velocidad (s.u.)	η_B : viscosidad límite de alta cizalladura (Pa·s)
N : newtoniano	λ : constante de tiempo (s)
n : índice de flujo (s.u.)	μ₀ : viscosidad aparente de cizalladura inicial (Pa·s)
NN : no newtoniano	μ_∞ : viscosidad aparente en el límite (Pa·s)
N_{ampl} : número de ampliaciones de diámetro (uds)	μ : viscosidad dinámica (Pa·s)
N_{codos} : número de codos (uds)	v : viscosidad cinemática (m ² /s)
N_{comp} : número de válvulas de compuerta (uds)	ρ : densidad del fango (kg/m ³)
N_{guill} : número de válvulas de guillotina (uds)	τ : tensión cortante (Pa)
N_{horas} : número de horas anuales de funcionamiento (h)	τ₀ : tensión umbral (Pa)