



Método para determinar el diámetro óptimo de un sistema de transporte de fluidos no newtonianos

Method for determining the optimal diameter a system transport of non-Newtonian fluids

Carlos Miguel Chuquilín Terán¹, Víctor Raúl Coca Ramírez¹, Edelmira Torres Corcino¹

RESUMEN

Objetivos: El estudio se realizó para obtener un modelo teórico que permita determinar parámetros de flujo generalizados aplicables a fluidos no newtonianos (Herschel - Bulkley, Bingham, seudoplásticos) que permitan obtener la energía de bombeo y el mejor diámetro del sistema de flujo en régimen laminar. **Métodos:** Mediante la aplicación de la ecuación de Rabinowitsch - Monney a los modelos reológicos de los fluidos en estudio se obtuvieron los parámetros generalizados de flujo y con ellos la energía de bombeo y el mejor diámetro del sistema de flujo para régimen laminar para los fluidos Bingham seudoplásticos (Herschel-Bulkley) para los cuales no alcanza el procedimiento gráfico de Levenspiel que es aplicable solo para fluidos seudoplásticos y Bingham plásticos. Las aplicaciones y validación se realizaron en base a las referencias bibliográficas Gardea (2008) y Díaz & Hechevarría (1999). **Resultados:** El método desarrollado arroja resultados de la potencia de flujo y del diámetro de conducción concordantes con los correspondientes de las referencias bibliográficas Gardea (2008) y Díaz & Hechevarría (1999). **Conclusiones:** La aplicación de la ecuación de Rabinowitsch-Monney a los modelos reológicos de los fluidos en estudio constituye un procedimiento aceptable para obtener los parámetros generalizados de flujo. El método para determinar la pérdida de carga del transporte de un fluido no newtoniano, en general, es idéntico al caso del transporte de un fluido newtoniano de viscosidad constante, sin embargo, para cálculos de flujo en aquel debe utilizarse la viscosidad efectiva.

Palabras Clave: fluidos no newtonianos, lodos residuales, flujo viscoso, pérdida de carga.

ABSTRACT

Objectives: The study was performed to obtain a theoretical model to determine generalized flow parameters applicable to non-Newtonian fluids (Herschel-Bulkley, Bingham, pseudoplastic) which allow to obtain the pumping power and the best diameter of the flow system laminar regime.

¹ Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica.



Methods: By means of the application of Rabinowitsch-Monney's equation to the rheological models of the fluids in study, the flow generalized parameters were obtained and with them the energy of pumping and the best diameter of the system of flow for laminar flow for the fluids Bingham seudoplástico (Herschel-Bulkley) for which it does not reach Levenspiel's graphical procedure that is applicable only for seudoplásticos and plastic Bingham fluids. Applications and validation were performed based on the references Gardea (2008) and Diaz & Hechevarría (1999). **Results:** The developed method provides results of the power flow and the diameter of driving consistent with the corresponding literature references Gardea (2008) and Diaz & Hechevarría (1999).

Conclusions: The application of Rabinowitsch-Monney's equation to rheological modelos of the fluids in study constitutes an acceptable procedure to obtain the widespread parameters of flow. The method to determine the loss of load of the transport of a not Newtonian fluid, in general, is identical to the case of the transport of a Newtonian fluid of constant viscosity, nevertheless, for the calculations of flow in those one must use the effective viscosity.

Keywords: Non-Newtonian fluids, sludges, viscous flow, loss of load.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los estudios de estos fluidos son diversos y requieren de la implementación experimental respectiva. Así por ejemplo en el caso de los lodos de perforación de pozos petroleros, por la importancia del rubro se han realizado muchos estudios experimentales específicos tal es así que actualmente cuentan con modelos empíricos de fácil manejo, funcionales para sus objetivos y con resultados aceptables (Zhongying & Songran, 1982), (Naturel, Ch.1982).

También el artículo de Kovacs y Vivar (1991), donde presenta una visión del problema del transporte de los lodos por tuberías a grandes distancias, obviamente se trata de un caso muy presente y cada vez más álgido por el vertiginoso crecimiento poblacional y de la industria, sugiere el abordaje mediante los métodos analíticos como una forma de dar mayor alcance a los procedimientos. El concluye que los lodos de aguas de ciudad presenta un modelo reológico plástico de Bingham (Kovacs & Vivar, 1991).

En base a los dos amplios campos, transporte de lodos, de perforación y residuales de ciudades o de fábricas, que tienen entre otros de común el ser fluidos no newtonianos, el presente estudio se orienta principalmente a dimensionar el diámetro óptimo de la tubería de transporte, evidentemente este objetivo pasa por la evaluación de la pérdida de carga por efecto del traslado del fluido y por ende de la potencia que debe desarrollar el sistema de bombeo.

El estudio se aborda mediante la aplicación de las expresiones generalizadas de la Mecánica de fluidos para el transporte de fluidos, adecuada a fluidos no newtonianos haciendo uso de la ecuación de Metzner y Reed que constituye la generalización de la fórmula de Rabinowitsch (J. Harris 1963), (Díaz & Hechevarría, 1999).

Parámetros Reológicos (Jiménez & Agudelo, 1996)

La definición de los parámetros reológicos se hace tomando como base el flujo laminar, en el cual se entiende el fluido como el deslizamiento de las capas de fluido una sobre otra, así tenemos:

Esfuerzo de Corte (τ): Resistencia del fluido al movimiento deslizante de sus capas cuando se aplica una fuerza en forma tangencial a su superficie laminar. Tiene unidades de fuerza sobre área.

Tasa de Corte ($\dot{\gamma}$): Diferencia entre las velocidades de dos capas dividida entre la distancia que las separa. Tiene unidades de velocidad sobre longitud.

Viscosidad (μ): Resistencia que opone un fluido a ser deformado. En términos matemáticos es la relación de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte.

En la Figura 1 se aprecian los tipos de viscosidad a tratar en este trabajo.

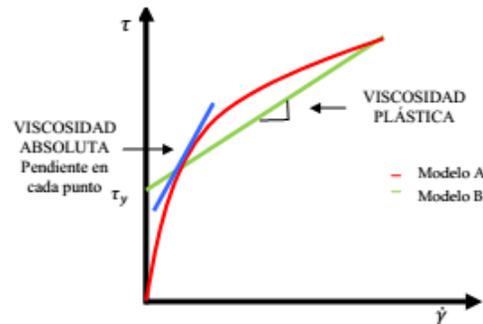


Figura 1: Presentación gráfica de los tipos de viscosidad

Cuando un fluido es no newtoniano y no lineal presenta una viscosidad diferente para cada tasa de corte, esta es llamada viscosidad absoluta. La viscosidad plástica es generalmente explicada como la parte de la resistencia al flujo causada por fricción mecánica y es afectada por la concentración de sólidos, el tamaño y la forma de las partículas sólidas y la viscosidad de la fase fluida (Gardea, 2008).

Punto de Cedencia (τ_y): Esfuerzo cortante mínimo requerido para que se dé la deformación del fluido. Representa el valor del esfuerzo de corte para una velocidad de deformación igual a cero.

Índice de Comportamiento (n): Indica la desviación del comportamiento reológico del fluido con respecto a los fluidos newtonianos.

Índice de Consistencia (k): Caracterización numérica de la consistencia del fluido, es decir, es una medida indirecta de la viscosidad, pero sus unidades dependen de n.

Modelos Reológicos (Jiménez & Agudelo, 1996) (Gardea, 2008)



Los modelos reológicos son una relación matemática que permite caracterizar la naturaleza reológica de un fluido, estableciendo la relación entre la deformación dada a una tasa de corte específica.

Entre los modelos reológicos de fluidos no newtonianos pueden citarse:

Modelo Plástico de Bingham (Jiménez & Agudelo, 1996)

Es un modelo de dos parámetros muy usado en la industria, su expresión es:

$$\tau = \tau_y + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Un fluido Plástico de Bingham no comienza a fluir hasta que el esfuerzo de corte aplicado exceda el valor mínimo τ_y . A partir de este punto el cambio en el esfuerzo de corte es proporcional a la tasa de corte y la constante de proporcionalidad es la viscosidad plástica (μ_p).

Ley de Potencia

Es un modelo de dos parámetros, según el cual la viscosidad absoluta disminuye a medida que la tasa de corte aumenta. La relación entre la tasa de corte y el esfuerzo de corte es:

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

No existe un término para el punto de cedencia, es decir los fluidos cuyo comportamiento es acorde con este modelo comienzan a fluir a una tasa de corte cero.

Modelo de Casson

La relación característica de este modelo es:

$$\tau^{1/2} = \tau_y^{1/2} + (\mu_p \dot{\gamma})^{1/2} \quad (3)$$

Modelo de Herschel–Bulkley

Es el resultado de la combinación de aspectos teóricos y prácticos de los modelos Plástico de Bingham y Ley de Potencia. La siguiente ecuación describe el comportamiento de un fluido regido por este modelo:

$$\tau = \tau_y + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (4)$$

En este modelo los parámetros “n” y “k” se definen igual que en Ley de Potencia. Como casos especiales se tienen que el modelo se convierte en Plástico de Bingham cuando $n = 1$ y en Ley de Potencia cuando $\tau_y = 0$.

Perdidas de Carga por Rozamiento (White, 1983)

En el caso de un flujo de un fluido concreto, los distintos parámetros reológicos (τ y η o k y n) deben determinarse, por ajuste de curvas, a partir de reogramas (relaciones de tensión cortante–deformación tangencial) obtenidos de mediciones viscosimétricas.

En caso de diseño de plantas nuevas, cuando aún no se conoce el lodo, pueden utilizarse valores generalizados deducidos de investigaciones anteriores, similares a los que se incluirán más abajo o realizar mediciones experimentales a condiciones similares al proceso que ha de implementarse.

Número de Reynolds Generalizado



En una tubería circular de diámetro D en la cual se desplaza un fluido cualquiera, produciéndose una pérdida de presión Δp debido al rozamiento a lo largo de una distancia L , el equilibrio de las fuerzas internas y externas puede expresarse:

$$\tau_w(\pi DL) = \Delta p \pi D^2/4$$

En donde τ_w es la tensión cortante en la pared del tubo. Δp es la pérdida de presión en (Pa), D es el diámetro del tubo (m). Por despeje:

$$\tau_w = \frac{\Delta p D}{4L}$$

O introduciendo el concepto de pérdida de carga, $\Delta h = \Delta p/(g\rho)$:

$$\tau_w = \frac{\rho g \Delta h D}{4L} \quad (5)$$

En donde Δh es la pérdida de carga por rozamiento (mCA), ρ es la masa específica del fluido (kg/m^3) y g la aceleración de la gravedad en ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Para un fluido newtoniano la relación entre la tensión cortante en la pared del tubo y la velocidad media de la sección viene dada por la ecuación de Rabinowitsch (Metzner, 1961):

$$\tau_w = \mu \left(\frac{8V}{D} \right) \quad (6)$$

Donde el término $\left(\frac{8V}{D} \right)$ es la denominada característica de flujo (s^{-1}), V es la velocidad media de la sección (m/s) y μ la viscosidad definida por la ecuación 6. Por analogía, puede definirse una viscosidad eficaz para fluidos no newtonianos:

$$\tau_w = \mu_e \left(\frac{8V}{D} \right) \quad (7)$$

Y definiendo el parámetro, número de Reynolds generalizado.

$$\text{Re}_g = \frac{D V \rho}{\mu_e} \quad (8)$$

$$\mu_e = \tau_w / \left(\frac{8V}{D} \right) \quad (9)$$

Ecuación de Rabinowitsch-Mooney (Díaz & Hechevarría, 1999)

Esta ecuación se usa para determinar la relación entre $(8V/D)$ y $\dot{\gamma}$, cualquiera que sea el modelo reológico del fluido y viene dado por:

$$\left(\frac{8V}{D} \right) = \frac{4}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 \dot{\gamma} d\tau \quad (10)$$

Expresión que aplicándola al modelo de un plástico Bingham, aproximadamente se obtiene

$$\tau_w = \frac{8V}{D} \left(\eta + \frac{1}{6} \frac{\tau_y D}{V} \right) \quad (11)$$

Donde



$$\mu_e = \eta + \frac{\tau_y}{\left(\frac{8V}{D}\right)} \quad (12)$$

Sin embargo para los plásticos Bingham descritos por la ecuación de Buckingham, la expresión del esfuerzo en la pared del conducto es:

$$\tau_w = \tau_y + \eta_p \left(\frac{8V}{D}\right) \quad (13)$$

Con la Con la cual la viscosidad eficaz será:

$$\mu_e = \eta_p + \frac{\tau_y}{\left(\frac{8V}{D}\right)} \quad (14)$$

Por lo tanto para un plástico de Bingham, el número de Reynolds generalizado es:

$$Re_g = \frac{\rho D V}{\eta_p + \frac{\tau_y}{\left(\frac{8V}{D}\right)}} \quad (15)$$

En caso de fluidos de la ley de potencia, la relación $\tau_w = f \left(\frac{8V}{D}\right)$ (16) puede expresarse mediante la ecuación de Metzner y Reed que constituye la generalización de la fórmula de Rabinowitsch (Metzner, 1961):

$$\tau_w = k \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n \left(\frac{8V}{D}\right)^n \quad (17)$$

Con lo cual:

$$\mu_e = k \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n \left(\frac{8V}{D}\right)^{n-1} \quad (18)$$

Y el número de Reynolds generalizado para fluidos de la ley de potencia se obtiene:

$$Re_g = \frac{\rho D V}{\mu_e} = \frac{\rho D V}{k} \left(\frac{4n}{3n+1}\right)^n \left(\frac{8V}{D}\right)^{1-n} \quad (19)$$

Modelo seudoplástico de Bingham

Se procedió en forma similar que los casos anteriores, así mediante la aplicación de la ecuación de Rabinowitsch-Mooney y descartando términos no significativos numéricamente y haciendo $\alpha = 1/n$ se obtuvo:

$$\left(\frac{8V}{D}\right) = \frac{4}{k^\alpha(\alpha+1)} \left[\frac{(\tau - \tau_y)^{\alpha+1}}{\tau} - \frac{2}{\tau^{2(\alpha+2)}} (\tau - \tau_y)^{\alpha+2} \right] \quad (20)$$

Y por lo tanto la viscosidad eficaz, es,

$$\mu_e = \frac{\tau}{\left(\frac{8V}{D}\right)} \quad (21)$$

Movimiento Laminar (Shames, 1970)

El transporte de fluidos no newtonianos por ser viscosos, generan altas pérdidas de fricción, éstas se incrementan si la velocidad crece, por ello es recomendable operar en régimen laminar; teniendo presente que si el flujo es muy lento podrían propiciarse



incrustaciones u obstrucciones en el sistema. De allí que la operación transporte de este tipo de fluidos debe llevarse a cabo en las cercanías al límite del régimen laminar.

Igualando las ecuaciones 5 y 6, tomando en cuenta ecuación (21), multiplicando ambos lados por V y despejando Δh , se obtiene la pérdida de carga por fricción para un fluido no newtoniano en movimiento laminar:

$$\Delta h = \frac{32}{g} \frac{\mu_e}{\rho D V} \frac{L}{D} v^2$$

Que puede transformarse en la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$\Delta h = f_D \frac{L}{2gD} v^2 \quad (22)$$

En donde el coeficiente de rozamiento tiene la misma forma que la fórmula de Hagen-Poiseuille para fluidos newtonianos

$$f_D = \frac{64}{Re_g} \quad (23)$$

O también en la ecuación de Fanning:

$$\Delta h = f_F \frac{2L}{gD} v^2 \quad (24)$$

$$f_F = \frac{16}{Re_g} \quad (25)$$

Siendo entonces $f_D = 4 f_F$ (26)

Velocidades de transición entre mecanismo laminar y turbulento. (White, 1983) (Shames, 1970)

Es conocido que el paso del régimen laminar al turbulento, depende de la estabilidad del régimen laminar, que se caracteriza por el adimensional denominado número de Reynolds ($Re_g \leq 2300$) el mismo que cuando las fuerzas viscosas son superiores a las fuerzas inerciales, el movimiento es laminar y se convierte en turbulento cuando el número de Reynolds supera un valor crítico ($Re_g \geq 4000$).

Potencia del sistema de bombeo

En el sistema de tuberías, por el que se desplaza un fluido desde el punto 1 al 2 más elevado, se establece un balance de energía mecánica y se obtiene la expresión siguiente:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + z_1 g + (-w) = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + z_2 g + h \quad (\text{J/Kg}) \quad (27)$$

$$h = h_p + h_s \quad (28)$$

$$h_p = \frac{f L V^2}{2gD} \quad (29a)$$

$$h_s = k \frac{V^2}{2g} \quad (29b)$$



$$h = \frac{V^2}{2g} \left[\frac{fL}{D} + \sum k_i \right] \quad (30)$$

$$h = [-W] \quad (31)$$

$$\text{Potencia de la bomba: } \text{Pot} = \frac{|-W| Q \rho}{\eta} \quad (32)$$

Donde:

h: carga por fricción del sistema

h_p y h_s representan pérdida de carga primaria (tubería recta) y secundarias (accesorios y otros).

k_i : Constante del accesorio

f: factor de fricción Darcy generalizado

En el caso de los lodos de perforación de pozos de petróleo, por la importancia que este material implica actualmente, han elaborado expresiones empíricas que satisfacen los requerimientos técnicos para la evaluación de la pérdida de carga del transporte del lodo a través de un pozo de perforación de petróleo para los diversos regímenes de flujo. Sin embargo también pueden aplicarse las expresiones analíticas antes mencionadas.

El diámetro óptimo, se obtiene a partir del trabajo que debe realizar el sistema de bombeo para el funcionamiento previsto del sistema de flujo; así:

$$\text{El costo de bombeo se define mediante: } C_B = C_e t \text{ Pot} \quad (\$/\text{año}) \quad (33)$$

$$\text{Donde: } \text{Pot} = \frac{|-W| Q \rho}{\eta}$$

$$\text{Cálculo de los costes fijos: } C_F = K_f L \quad (34)$$

$$K_f = \frac{C_i + C_{\text{mant}}}{V_u} \quad (35)$$

$$\text{Haciendo } C_{\text{mant}} = 0,40 C_i \quad (36)$$

$$C_F = \frac{1,4 C_i L}{V_u} \quad (\$/\text{año}) \quad (37)$$

$$C_T = C_F + C_B \quad (\$/\text{año}) \quad (38)$$

Donde:

C_e : Costo medio de la energía eléctrica durante la vida útil, ($\$/\text{kW-h}$)

C_i : Costo de tubería instalada, ($\$/\text{m}$)

C_{mant} : Costo mantenimiento, $\$/\text{año}$

t: horas de funcionamiento anual

V_u : Tiempo de vida útil del sistema: (años)

MATERIAL Y METODOS:

En el transporte de fluidos no newtonianos, existen sistemas de diversas dimensiones. Tienen especial importancia el transporte de los lodos de la perforación de los pozos de petróleo, el transporte de los lodos de aguas con cierta concentración de sólidos a través de tuberías a zonas de tratamiento o en general a los puntos de descarga. Uno de los factores que determinantes del sistema operativo es la denominada pérdida de presión por efectos de fricción, factor que se encuentra relacionado con el factor de fricción, con el gasto de fluido y por ende con el diámetro de la conducción.



En un sistema de flujo laminar específico, lo primero que se hizo fue determinar el modelo reológico del fluido, que se obtiene mediante mediciones viscosimétricas que permitan obtener los parámetros reológicos del modelo.

Luego, a partir de la ecuación de Rabinowitsch-Monney y sus respectivas consideraciones, se desarrolló el modelo de Bingham pseudoplástico (Herschel-Bulkley). Con un procedimiento accesible de cálculo, se validaron los desarrollos de los modelos reológicos, plástico de Bingham y Ley de potencia (seudoplástico). Resaltando que para los dos últimos modelos indicados, el procedimiento de desarrollo vigente es el de Levenspiel (Gardea, 2008).

Diámetro económico (óptimo)

El diámetro económico de la tubería se obtuvo mediante la evaluación del sistema de bombeo para varios diámetros propuestos, eligiéndose el que genera menos costo total. El costo total lo constituye la suma de los costes anuales de explotación y de los costes de amortización de la inversión de todo el sistema.

Sin embargo, debe mencionarse que la elección del diámetro de la conducción es el resultado de un compromiso entre diversos aspectos que afectan el comportamiento del fluido y el funcionamiento del sistema, por ello es que además de las consideraciones sobre la velocidad de circulación deben contemplarse el tiempo de permanencia y el peligro de obstrucción.

Se plantearon casos de aplicación, para flujo laminar;

- Se propuso el desarrollo de un modelo para los fluidos cuyo comportamiento reológico es de Bingham pseudoplástico (Herschel-Buckley)
- Se aplicó al modelo del fluido y características de flujo de los casos presentados en la referencia Gardea (2008), cuyo enunciado es:

Caso 1: Calcular la potencia de bombeo para el proyecto cuyos datos se indican, utilizando un lodo residual que es un fluido tipo Bingham pseudoplástico. Los datos son los siguientes, (Gardea, 2008):

Modelo reológico: $\tau = 12,0 + 0,366 \dot{\gamma}^{0,664}$

$L = 12,000.00$ m; eficiencia de la bomba: $\eta_b = 0.68$; $H_{ET} = 80.00$ m (desnivel estático); $D = 0.2032$ m; $V = 1.54$ m/s; ($Q = 0.050$ m³/s); $p = 1,008.00$ Kg/m³; $K = 0.3660$ Pa.sⁿ; $n = 0.664$; $\tau_y = 12.00$ Pa.

Considerando que el método disponible de Levenspiel no alcanza al modelo real (Herschel-Buckley) del sistema en estudio, para la solución, Gardea (2008) propone adecuar el modelo real usando dos alternativas cuyos modelos si son abordados por el método de Levenspiel; en una, lo ajusta al modelo de plástico de Bingham ($\tau = 12 + 0,1075 \dot{\gamma}$) y en la otra, al modelo de la ley de potencia ($\tau = 11,25 \dot{\gamma}^{0,103}$). Los resultados de estas dos alternativas los utilizamos para la validación de nuestros desarrollos de los modelos correspondientes.

Caso 2: Seleccionar el diámetro de una tubería para transportar una suspensión a razón de 12 m³/h de un tanque a otro a través de una tubería de 560 m de

longitud. El nivel de líquido en el tanque receptor se encuentra 5m más elevado que el de origen (Díaz & Hechevarría, 1999).

Modelo reológico del fluido a la temperatura de operación: $\tau = 0,75 \dot{\gamma}^{0,7}$

Horas de funcionamiento anual: 2 500 h, 18 h/d

Vida útil de la instalación: 12 años

Valor medio de la energía eléctrica durante la vida útil: 0,09 \$/kW-h

Densidad: 1 810 kg/m³

El costo de la tubería viene dado por: $\frac{C_L}{L} = 0,7 D_N^{1,5}$

La alternativa analítica se aplicó para régimen laminar, el desarrollo del modelo se aplicó al caso del problema respectivo de la referencia (Díaz & Hechevarría, 1999) y el procesamiento se realizó con aplicación del programa de cálculo Polymath, en forma directa se obtuvieron, el número de Reynolds generalizado, el factor de fricción generalizado de Darcy (f), el trabajo del sistema de bombeo, el diámetro óptimo. La validación del procedimiento se realizó comparando los resultados con los de la referencia.

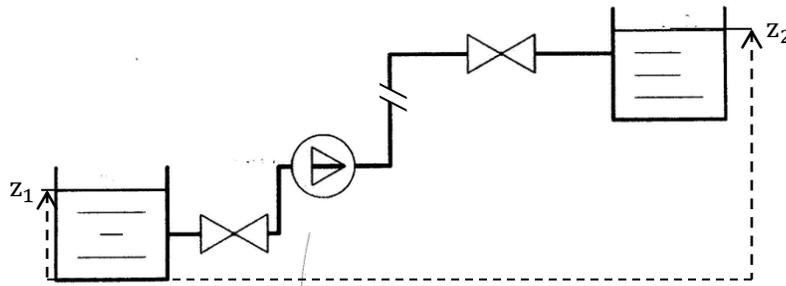


Figura 2. Esquema de un sistema de flujo

El procedimiento se delineó tomando un esquema general como el de la figura 2, y fue el siguiente

Con ayuda de la figura que sigue se detalla el procedimiento general seguido:

- Se definió un modelo reológico del fluido no newtoniano a estudiar
- Se definieron las condiciones operativas, con los datos característicos del fluido (densidad, viscosidad) y del sistema de flujo establecido (geometría, dimensiones, material, accesorios, posición, longitud, gasto, etc.).
- Se calculó la tensión de corte en la pared del tubo y la viscosidad eficaz del fluido
- Se halló el número de Reynolds generalizado y se definió el régimen de flujo.
- Se obtuvo el factor de fricción generalizado "f" de acuerdo al ítem inmediato anterior
- Se aplicó el balance de energía mecánica del sistema, de acuerdo al régimen de flujo que se acaba de definir, para obtener el trabajo que debe desarrollar el sistema de bombeo de tal manera que el proceso ocurra como fue previsto.
- Para varios diámetros de tubería propuestos, se obtuvieron las pérdidas de carga y por ende el trabajo del sistema de bombeo y su respectivo costo total anual.
- Mediante los resultados del paso anterior se identificó el sistema que arrojó el mejor diámetro de tubería (el más económico sin desnaturalizar el funcionamiento) para el sistema de flujo.

Con ayuda del programa Polymath, se obtuvieron los reportes respectivos para cada caso, así para el modelo Hershel-Buckley (del caso 1) y del caso 2 se presentan las figuras, 3 y 4, respectivamente.

Figura 3: Reporte de resultados para el modelo Herschel-Bulkley

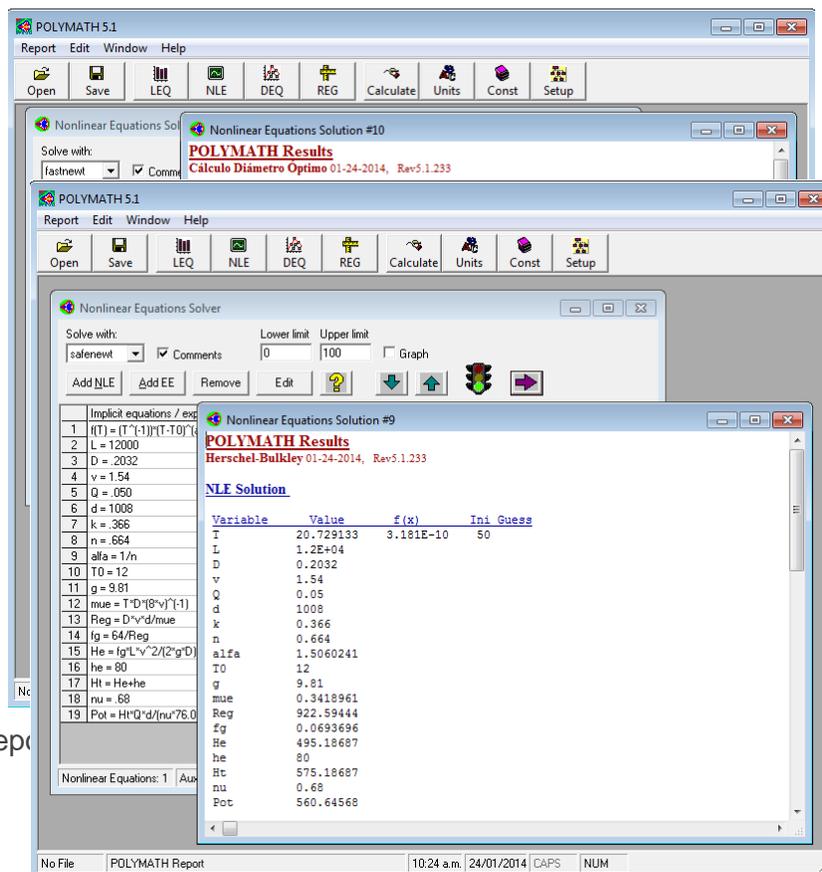


Figura 4: Repor

onómico



RESULTADOS

Tabla 1: Potencia del sistema de bombeo, para los modelos reológicos adecuados y del modelo real CASO 1:

MODELO	POTENCIA (HP)		
	Gardea (2006)	Estudio	Diferencia %
Plástico Bingham	524,45	509,15	2,91
Ley de potencia	528,44	528,3	0,03
	-----	560,65	
Herschel-Buckley	Respecto al Plástico Bingham		6,46
	Respecto a la Ley de potencia		5.74

Tabla 2: Valores de los cálculos del diámetro óptimo CASO 2:

D_N (pulg)	3	4	6
C_B (\$/año)	409.60	287.10	191.48
C_F (\$/año)	212.18	326.67	600.12
C_T (\$/año)	621.78	613.76	791.60

Tabla 3: Comparación de Potencia y diámetro económico CASO 2:

MODELO	POTENCIA (kW)		DIÁMETRO ECONOMICO (pulg)	
	Díaz & Hechevarría (1999)	Estudio	Díaz & Hechevarría (1999)	Estudio
Ley de potencia	1,25	1,27	4	4
Diferencia %	1,65		0	

DISCUSIÓN

El método para obtener la pérdida de carga, del sistema de flujo en régimen laminar, es general por lo que puede aplicarse a cualquier tipo de fluido, newtoniano o no newtoniano, cualquiera que sea su modelo reológico.

El transporte de fluidos viscosos para una distancia definida, acarrea una pérdida de carga altamente dependiente del diámetro de la conducción, esto se debe a que cada



diámetro genera un gradiente de velocidad particular, originado por la velocidad media adquirida por el fluido al mantenerse constante el flujo volumétrico. En el caso, los resultados que se presentan en la tabla 3 son equivalentes a los obtenidos en la referencia (Díaz & Hechevarría, 1999).

Así mismo, se aprecia similitud de los costos totales anuales en los límites del diámetro óptimo (3 y 6 pulgadas) lo que hace posible tomar decisiones técnicas sin mayores problemas desde el punto de vista económico.

Conclusiones

La aplicación del desarrollo propuesto para obtener la pérdida de carga y por lo tanto la potencia de bombeo para fluidos del modelo Herschel–Bulkley, arroja resultados concordantes con los modelos adaptados (Plástico de Bingham y de ley de potencia (seudoplásticos)) del autor (Gardea, 2008), por lo tanto se considera que tiene validez.

El método para determinar la pérdida de carga del transporte de un fluido no newtoniano, en general, es idéntico al caso del transporte de un fluido newtoniano de viscosidad constante, sin embargo, para cálculos de flujo en aquel debe utilizarse la viscosidad efectiva.

Los procedimientos de este estudio para evaluar la viscosidad efectiva de fluidos de los modelos reológicos Herschel–Bulkley, plásticos de Bingham y seudoplásticos, son aceptables.

El diámetro económico obtenido con el procedimiento desarrollado, es concordante con la referencia respectiva (Díaz & Hechevarría, 1999), en consecuencia es válido.

El diámetro económico calculado no es absoluto para un sistema dado, muy por el contrario está sujeto a los costos variables del sistema.

Recomendaciones

El transporte de los fluidos no newtonianos es dependiente del modelo reológico del fluido, por lo tanto los resultados que se obtengan están sujetos a la confiabilidad del modelo del fluido. Estos modelos deben ser principalmente de origen experimental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bourgoyne, A.T., Millheim, K.K. & Chenever, M.E. (1986) *Applied Drilling Engineering*. Texas: Textbook series, SPE.

Díaz, A. & Hechevarría T. (1999) Selección de diámetro óptimo, *Tecnología química* 19(1).

Gardea, H. (2008) Dos propuestas para el proyecto del bombeo de fluidos no newtonianos. Caso de los lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas negras. *Ingeniería. Investigación y Tecnología* 9(2) 87 - 97.

Harris, J. (1963). A note on the generalized Reynolds number in non-Newtonian flow, *Br. J. Appl. Phys.* **14** 817. doi:10.1088/0508-3443/14/11/421. Received 1 August 1963.

Hemphill, T., Campos, W. & Pilehvari, A. (1993) Yield-Power Law Model More Accurately Predicts Mud Rheology. *Oil & Gas Journal*. 91(34) 45-50.



Honey, H. & Pretorius, W. (2000) Laminar flow pipe hydraulics of pseudoplastic–thixotropic sewage sludges. *Water SA*. 26(1).

Jiménez, J. & Agudelo W. (1996) Reología de Fluidos Newtonianos y No Newtonianos.

Kovacs, Z. & Vivar, J. (1991). Bombeo de fangos a gran distancia, *Revista de Obras públicas*. (Enero). 23-39. Recuperado de http://www.aquaplan.es/DOC/Bombeos_de_fangos.pdf.

Naturel, Ch.(1982) Drilling Mud and Cement Slurry Rheology Manual. *Gulf Publishing*.

Shames, I. (1970) *Mecánica de los fluidos*. Ed. del Castillo, S.A.

White, F. (1983) *Mecánica de fluidos*. , México: McGraw-Hill

Zhongying, W. & Songran, T. (1982). Casson Rheological Model in Drilling Fluid Mechanics. Paper SPE 10564 presented at the International *Petroleum Exhibition and Technical Symposium*, Beijing, Marzo 17-24