



REDISEÑO HIDRÁULICO Y SELECCIÓN DEL EQUIPO DE BOMBEO PARA EL MANEJO DE COMBUSTÓLEO EN UNA REFINERÍA DE LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA NACIONAL

J. Santana Villarreal Reyes

*Instituto Politécnico Nacional-Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad
Azcapotzalco
svillarreal@ipn.mx*

Juan José Martínez Cosgalla

*Instituto Politécnico Nacional-Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad
Azcapotzalco
martinez_c_jj@ yahoo.com*

Gerardo Irving Arjona Ramírez

*Instituto Politécnico Nacional-Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad
Azcapotzalco
garjona@ipn.mx*

Resumen

En una planta reductora de viscosidad de la Industria Petroquímica Nacional se tuvo un problema en el sellado de la tubería de la línea de proceso lo que provocó una explosión que dejó fuera de operación la planta, dando como resultado pérdidas económicas a la empresa. Este trabajo trata del rediseño hidráulico, cálculo de las variables de flujo volumétrico y carga, para la selección del equipo de bombeo en el transporte y suministro de combustóleo de dicha planta cuidando que garanticen una operación segura y confiable, reduciendo los costos de operación y mantenimiento, apegándose a las normas nacionales e internacionales, con las ecuaciones fenomenológicas de continuidad y general de la energía o teorema de Bernoulli, así como las ecuaciones experimentales número de Reynolds, Darcy-Whesbach y diagrama de Moody, se valora la caída de presión por rozamiento para determinar las variables de caudal y carga.

Palabras clave: Combustóleo, carga de la bomba, flujo, caída de presión por rozamiento

Debido al incendio que se tuvo en la planta reductora de viscosidad de la Industria Petroquímica Nacional, quedó fuera de operación toda la refinera, por lo que se tiene una pérdida económica y producción. La figura 1 muestra la línea de succión de la bomba centrífuga de proceso para manejo de combustóleo que se quemó en el incendio.



Fig. 1 Línea de sección bomba centrífuga para manejo de combustóleo. Fuente: propia, Villarreal, Martínez, Arjona

Por esta razón se realiza un rediseño de la red hidráulica, así como a la selección del equipo de bombeo óptimo para el manejo de combustóleo, el cual es producido en esta refinera de la Industria Petroquímica Nacional. La selección se lleva a cabo siguiendo la normatividad y requerimientos para este tipo de trabajos, como son: las normas API-610, ISO-13709 y su equivalente norma de PEMEX NRF-050; el diseño del sistema anterior era obsoleto y su operación insegura, por lo tanto, se busca mejorar las condiciones de trabajo, seguridad, eficiencia y producción del nuevo equipo de bombeo.

Las condiciones a la que se enfrenta en el rediseño de la tubería son:

- Limitantes de espacio.
- Pérdidas primarias y pérdidas secundarias durante el proceso.
- Selección de la tubería de acuerdo a la norma API 60.

Esta planta reductora de viscosidad inició sus operaciones en 1976, y el día 30 de julio de 2011, se presentó una explosión e incendio; como consecuencia de este incidente se realizó un análisis de los equipos de bombeo de la planta de acuerdo con el tipo de fluido de bombeo, en las siguientes zonas: zet1, zet2, zet3, zet4, zet5 y zet6, zonas que no pertenecen a este trabajo de investigación.

Derivado del incendio y de acuerdo con lo anterior, las bombas 102-J/JA, 103-J/JA, 104-J/JA, 105-J/JA, 107-J/JA, 108-J/JA, 110-J/JA, 113-J/JA y 115-J/JA, quedaron ubicadas en la zona de exposición térmica (ZET). Las bombas instaladas se encuentran identificadas como lo muestra la tabla 1, la bomba 115-J/JA es el equipo de bombeo a rediseñar en este trabajo.

Tabla 1. Distribución de los Equipos de bombeo dañados después del incidente.

Fuente: propia, Villarreal, Martínez, Arjona

Tag	Cantidad	Tipo de bomba	Marca	Tamaño	Servicio	Líquido que maneja
102-J/JA	2	OH2	Byron Jackson	3x4x3H-SM proceso	Reflujo de la fraccionadora	Gasolina no estabilizada
103-J/JA	2	OH2	Bingham	12x12x17 Cap	Reflujo de gasóleo pesado	Diesel pesado
104-J/JA	2	BB2	Ingersoll rand	6 x16 J	Fondos de la fraccionadora	Residuo
105-J/JA	2	OH2	Bingham	2 x 4x 14 cap	Fondos de la agotadora	Diesel pesado
107-J/JA	2	OH2	Byron Jackson	1 1/2x2 1/2 x10 GSM process	Gasolina producto	Gasolina no estabilizada
108-J/JA	2	OH2	Bingham	6x6x17 H Cap	Agua de calderas	Agua tratada
110-J/JA	2	OH2	Byron Jackson	4x 68 1/2 I-SJ	Bomba de apagado	Diesel pesado
113-J/JA	1	OH2	Worthington	1 CNR-62	Bombas de agua amarga	Agua
115-J/JA	1	OH2	Byron Jackson	1 1/8x2x10 1/2	Combustóleo para planta combinada	Combustóleo

El objetivo principal de este proceso es reducir la viscosidad de los residuos, el cual puede ser aplicado al residuo atmosférico o de vacío.

El proceso de viscorreducción es un proceso de conversión muy sencillo; es la razón por la cual es muy atractivo debido a su bajo costo de inversión y su sencillez de operación, cuando los problemas de estabilidad están bien manejados.

Esta tecnología fue desarrollada en muchas refinerías porque las antiguas unidades de destilación atmosféricas fueron modernizadas y convertidas en viscorreductoras, modernizando su proceso para mejorar el rendimiento de estas refinerías y porque el tiempo de amortización de tal inversión es corto.

En todos los casos, el proceso de viscorrección se limita estrictamente a la conversión térmica suave, comparado con los otros principales procesos térmicos, como la coquización.

Los futuros desarrollos de este proceso, dependen de las tendencias en las especificaciones de los productos, especialmente del combustóleo.

La figura 2 muestra un esquema de un sistema reductor de viscosidad. En esta figura se observan las bombas que trabajan en parte de la refinería.

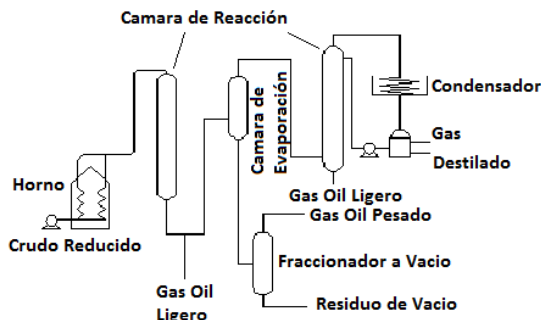


Fig.2. Diagrama de funcionamiento de una Reductora de Viscosidad. Fuente:

<https://www.google.com/search?q=Diagrama+de+funcionamiento+de+una+Reductora+de+Viscosidad.+Fuente:+Visbreaking&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj4nNua->

Ejemplar 22. Enero-junio de 2020

[fTnAhUBSK0KHeDZDpIO_AUoAXoECAsQAw&biw=1396&bih=686#imgrc=1w_30e34qJ1kUM](#)

La tabla 2 muestra los datos de diseño requeridos cuando de un inicio se puso en operación la refinería para el manejo del combustóleo, flujo volumétrico, carga, potencia, así como los demás datos importantes en la selección del equipo de bombeo.

Tabla 2 Datos de diseño en el inicio de la refinería para manejo de combustóleo.

Fuente: propia, Villarreal, Martínez, Arjona

Flujo volumétrico (gpm)	Norma: 90 a 103
Presión de descarga (psi _g)	115
Diferencia de Carga (ft)	265
NPSH disponible (ft)	amplio
SP GR a pt	1.0 Max. 0.99 Min
Presión de Vapor.(psi _g)	< 1.0
Viscosidad. a pt. (cp)	140
Potencia Hidráulica (HP)	6.9
Líquido	Combustóleo

Desarrollo de cálculo

Para el rediseño de red hidráulica en el transporte del combustóleo para el nuevo sistema de bombeo, es necesario determinar la carga de la bomba, conocer los requerimientos actuales de la planta como flujo volumétrico, temperatura de bombeo y las propiedades del líquido, la tabla 3 muestra los datos de diseño para el nuevo equipo de bombeo que se instalará.

Tabla 3 Datos de diseño para el nuevo equipo de bombeo de combustóleo.

Fuente: propia, Villarreal, Martínez, Arjona

Flujo Volumétrico	normal 90 hasta 5.678x10 ⁻³ m ³ /s
	103 gpm
Presión de Descarga	115 psi _g 7.93 bar
	8.0853 kg/cm ²
Diferencia de Carga	265 ft 80.77 m
NPSH	Amplio



Densidad Relativa	Normal= 1	
	Mínimo=0.99	
Temperatura del líquido de Bombeo	185 ° f	85° c
Presión de Vapor	1 psi _a	1 atm; 101.32 kPa
Viscosidad dinámica	140 cP	0.14 Pa.s
Viscosidad cinemática	1.4 Stokes = 648.9 SSU	0.00014 m ² /s
Densidad	10° API	998 kg/m ³

Cálculo y selección de tubería.

En referencia al material a usar en la tubería, se toma en cuenta las normas de diseño requeridas que señala las condiciones de diseño del mismo para el manejo de combustóleo.

Para identificar que parámetros de viscosidad posee el fluido a bombear, se toma en referencia la tabla del libro “HYDRAULIC INSTITUTE ENGINEERING DATA BOOK”, que basa la relación que existe entre la densidad en grados API y la gravedad específica (norm=1, min=0.99) se observa que el fluido muestra una densidad relativa similar a la del agua, por lo que se considera como un fluido poco viscoso.

Una vez conociendo el material a usar, de continuidad se propone un diámetro de pre diseño:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$$

Donde:

$$Q = 5.678 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

v = velocidad intermedia propuesta de acuerdo a la tabla 4, obtenida del libro Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, 4^a Ed., McGraw-Hill, 1991”

Tabla 4 Velocidades promedio permisibles para la succión y descarga de una bomba. Fuente: Operaciones Unitarias en Ingeniería Química

Fluido	Tipo de Flujo	Velocidad	
		f/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0.5 - 1	0.15 - 0.30
	Entrada de bomba	1 - 3	0.3 - 0.9
	Salida de bomba	4 - 10	1.2 - 3
	Línea de Conducción	4 - 8	1.2 - 2.4
Líquidos viscosos	Entrada de bomba	0.2 - 0.5	0.06 - 0.15
	Salida de bomba	0.5 - 2	0.15 - 0.6
Vapor de Agua		30 - 50	9 - 15
Aire o gas		30 - 100	9 - 30

Proponiendo una velocidad de entrada de bombeo, de 0.4 m/s de acuerdo a la tabla 4, se obtiene

$$D = \sqrt{\frac{4(5.678 \times 10^{-3})}{\pi 0.4}} = 0.1344 \text{ m} \approx 5.3 \text{ in}$$

Debido a que en el mercado, no existe una tubería de 5.3 in, de diámetro y dada a la naturaleza del fluido, se selecciona un diámetro inmediato superior, de 0.15451m (6 in) de diámetro nominal, acero al carbón.

Calculando la velocidad real de succión, de continuidad.

$$v_s = \frac{Q}{A_s} = \frac{5.678 \times 10^{-3}}{0.01875} = 0.33038 \text{ m/s}$$

Haciendo lo mismo para la descarga, tomando una velocidad de 1.8 m/s

$$D = \sqrt{\frac{4(5.678 \times 10^{-3})}{\pi 1.8}} = 0.0633 \text{ m} \approx 2.24 \text{ in}$$

Se toma una tubería de 0.0635 m (2.5 in)

$$v_d = \frac{Q}{A_d} = \frac{5.678 \times 10^{-3}}{3.1669 \times 10^{-3}} = 1.7929 \text{ m/s}$$

Calculo del número de Reynolds (Re), para la succión y descarga.

$$R_{esucc} = \frac{vD}{\nu} = \frac{0.33038 \times 0.15451}{0.00014} = 364.6$$

Se trata de un flujo laminar por lo que el coeficiente de rozamiento λ se determina de la siguiente forma:

$$\lambda_{succ} = \frac{64}{Re_{succ}} = \frac{64}{364.6} = 0.1755 \text{ ad}$$

$$Re_{des} = \frac{vD}{\nu} = \frac{1.7929 \times 0.0635}{0.00014} = 813.20$$

En la descarga se tiene también flujo laminar por lo que el coeficiente de rozamiento λ se calcula de la misma forma que para la succión.

$$\lambda_{des} = \frac{64}{Re_{des}} = \frac{64}{813.20} = 0.07870 \text{ ad}$$

Cálculo de las pérdidas en la succión.

$$H_{rsucc} = \lambda \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

$$= 0.1755 \frac{6.5}{0.15451} \times \frac{0.33038^2}{19.62} = 0.411 \text{ mcc}$$

Pérdidas en la descarga.

$$H_{rdes} = \lambda \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

$$= 0.0787 \frac{80}{0.0635} \times \frac{1.7929^2}{19.62} = 16.2 \text{ mcc}$$

Haciendo un análisis de los diferentes caudales que pueden pasar por las tuberías seleccionadas, se predice el comportamiento del equipo de bombeo que se seleccionará; dando valores distintos del caudal se determina la caída de presión, la tabla 5 muestra el concentrado de este análisis que se realizó utilizando la ecuación de pérdidas por rozamiento y la carga requerida para transportar el combustible, graficando esta tabla se obtiene la curva carga del sistema.

Tabla 5 Concentrado del análisis de carga para graficar la curva carga del sistema. Fuente: propia, Villarreal, Martínez, Arjona

flujo		Altura total en succión	Altura total en descarga	Altura de la bomba (H)	Pérdida por decremento de temperatura
gpm	m ³ /s (10 ⁻³)				
0	0	7	81.77	74.77	61.31
40	2.52	6.99	85.32	78.33	64.23
60	3.78	6.98	89.77	82.79	67.88
90	5.67	6.95	99.77	92.81	76.11
100	6.30	6.94	103.99	97.05	79.58
110	6.94	6.93	108.66	101.73	83.41

La carga de la bomba en cada caso de la tabla 5 la podemos determinar como

Altura de la bomba (H) = altura total de descarga - altura total de succión.

Por otro lado graficando la tabla 5 se obtiene la curva carga del sistema donde va a trabajar el equipo de bombeo, la figura 3 es el resultado de graficar los valores de la tabla 5 y muestra la curva carga del sistema, debido a que el flujo sufre una pérdida de calor, se genera una pérdida del 15% al 20% de la altura total, aun con el revestimiento térmico (se toma un valor intermedio de 18%).

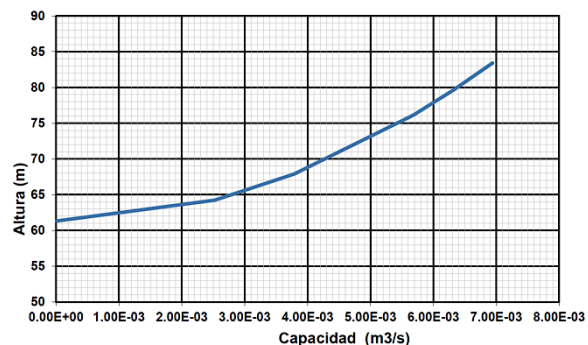


Fig. 3 Curva carga del sistema operativo. Fuente: propia, Villarreal, Martínez, Arjona

Selección del equipo de bombeo

De acuerdo con los resultados obtenidos en el desarrollo del cálculo, se realiza la selección del equipo hidráulico, teniendo en cuenta, los siguientes datos.

- $Q = 103 \text{ GPM}$
- $H = 265 \text{ ft}$
- Gravedad específica = 1
- Viscosidad dinámica = 140 cP
- Material de acuerdo a los requerimientos
- NPSH = Amplio

El dato de NPSH (amplio) significa que el sistema de succión está en carga, es decir, existe NPSH disponible grande y por tal motivo se tiene un bajo riesgo de cavitación, por lo cual no se calcula.

$NPSH_R$, se lee en la curva del fabricante que cotice la bomba, o si se adquiere es obligación del proveedor trazarlo en su curva característica de la bomba.

La bomba seleccionada es de la marca FLOWSERVE. S.A de C.V, la figura 4 muestra la curva de comportamiento, el punto de operación de Q vs H , Q vs η , Q vs BHP, y Q vs $NPSH_R$.

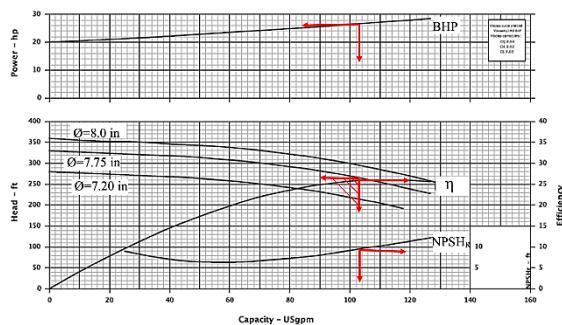


Fig. 4 Curva característica de la bomba seleccionada, para el bombeo de combustóleo. Fuente: catálogo del fabricante FLOWSERVE

Para facilitar la selección de una bomba centrífuga, se ha estandarizado que todas las curvas de las bombas centrífugas deben ser trazadas utilizando agua limpia como fluido, a una temperatura de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ y viscosidad igual a 1 centiPoise.

La figura 4 es la curva de comportamiento, está trazada en condiciones normales de ensayo, es decir, los fabricantes de equipos de bombeo, en sus catálogos de ingeniería muestran las curvas de comportamiento realizadas con agua limpia a 20°C y densidad absoluta (ρ) de 998.2 kg/m^3 . Debido a esto, cuando una bomba centrífuga va a trabajar en un sistema con un líquido de diferente viscosidad y peso específico, habrá que introducir las correcciones por viscosidad, necesarias para encontrar las nuevas curvas característica Q vs H , Q vs BHP, y Q vs η .

Estas características de trabajo sufren modificaciones cuando la bomba opera con fluidos muy viscosos. En general se produce una reducción de la eficiencia con un consecuente aumento de la potencia absorbida, una baja en el caudal y la altura manométrica. La caracterización de la naturaleza del producto a bombear es fundamental para el dimensionamiento del sistema.

No existe forma analítica, teórica en la que se pueda realizar estas correcciones, por ello se recurre a la experimentación, mostrando en gráficos los datos obtenidos (coeficientes de corrección) y deduciendo de los mismos los valores a emplear, para encontrar el nuevo comportamiento de una bomba centrífuga trabajando con líquidos de naturaleza diferente al agua.

Estos coeficientes de corrección afectan al caudal, carga y rendimiento.

Con caudal cero, la altura de presión a válvula cerrada por una bomba trabajando a una cierta velocidad angular es la misma cualquiera que

sea la viscosidad del líquido. Cuando se establece la corriente de circulación la curva Q vs H esta tendrá mayor pendiente a medida que la viscosidad del fluido aumenta.

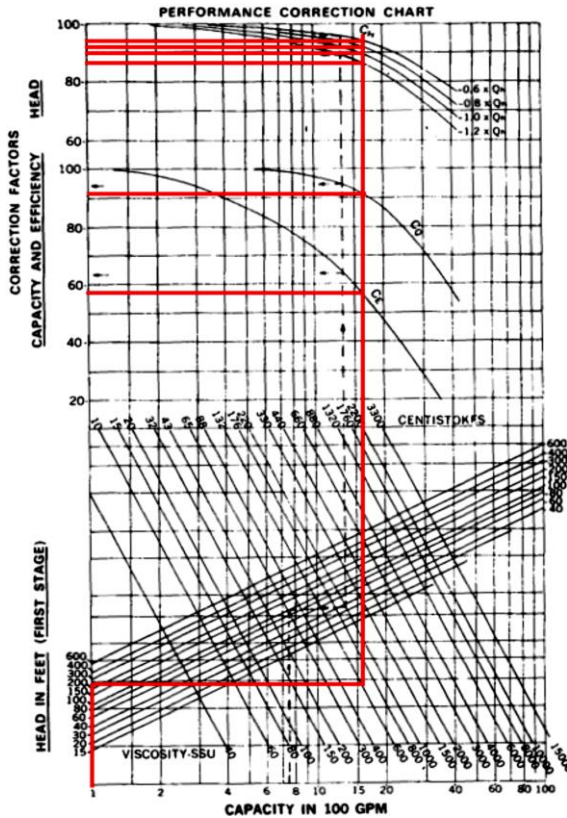


Fig.5 Carta de comportamiento del IH para determinar los factores de corrección del combustóleo. Fuente: Instituto de Hidráulica Americano (IH)

La figura 5 se debe a ensayos realizados en el Instituto de Hidráulica de Estados Unidos (IH por sus siglas en inglés), y en ella podemos encontrar los factores necesarios para realizar la modificación de la característica Q vs H de una bomba, en función de la viscosidad del líquido, altura de presión y caudal, para el punto de máximo rendimiento.

La curva f_H nos da el valor del factor para la corrección del rendimiento.

Las distintas curvas f nos indican los factores para la corrección de la carga en función de los caudales $1.0Q$ (máximo rendimiento), $0.6Q$, $0.8Q$ y $1.2Q$.

La curva f_q nos da el valor del factor para la corrección del caudal. Una vez señalados los nuevos puntos en el diagrama $Q-H$, podemos trazar la curva corregida, correspondiente al combustóleo de que se va a bombear.

Los factores de corrección observados en la figura 5 son:

- $C_E = 0.57$
- $C_Q = 0.92$
- $C_H 120\% = 0.86$
- $C_H 100\% = 0.90$
- $C_H 80\% = 0.92$
- $C_H 60\% = 0.95$

La tabla 6 es el resultado de aplicar la corrección por viscosidad del combustóleo y con ella se realiza la gráfica de Q vs H , Q vs BHP y Q vs η .

Tabla 6 Corrección por viscosidad del combustóleo. Fuente: propia, Villarreal, Martínez, Arjona

	0.6xQ	0.8xQ	1xQ	1.2Q
Caudal de agua Q	61.8 gpm	82.4 gpm	103 gpm	123 gpm
Carga de agua H	308.8 ft	289 ft	265 ft	259 ft
Rendimiento con agua η	20 %	24 %	26 %	23.3 %
Viscosidad del líquido cSt	140	140	140	140
C_Q	0.92	0.92	0.92	0.92
C_H	0.95	0.92	0.90	0.86
C_η	0.57	0.57	0.57	0.57
Caudal líquido viscoso $Q \times C_Q$	58.85 gpm	75.81 gpm	94.76 gpm	113.16 gpm



Carga de líquido viscoso $H \times C_H$	293.36 ft	265.88 ft	238.5 ft	105.78 ft
Rendimiento del líquido viscoso $\eta \times C_\eta$	11.4 %	13.68 %	14.8 %	13.28%
Gravedad específica	0.99	0.99	0.99	0.99
Potencia en el eje para líquido viscoso P_a	37.86 hp	36.86 hp	38.17 hp	22.5 hp

La potencia al freno (BHP) aumenta proporcionalmente a la viscosidad, mientras que el caudal, la carga y el rendimiento disminuyen como lo muestra la figura 6.

Conclusión

El desarrollo analítico del rediseño de la red hidráulica como es la ingeniería de tuberías en la succión y descarga para una bomba centrífuga de proceso, así como el cálculo de la carga de la bomba atendiendo al caudal de diseño, determinó la propuesta que presenta este trabajo, la selección de la bomba se realizó para agua a 20 °C. En este trabajo se muestra la problemática que conlleva el bombeo de un fluido con propiedades diferentes al agua, el mayor reto es conocer las propiedades mecánicas del fluido a bombear sobre todo la viscosidad dinámica o cinemática, la densidad relativa (gravedad específica) y, la temperatura de bombeo, para llevar a cabo la corrección de las curvas de comportamiento como son: Q-H, Q- P_a , y Q- η de la bomba, uno de los problemas que se tienen en la actualidad es la poca información en el diseño de la red hidráulica, selección y operación de las bombas que trabajen con líquidos altamente viscosos que llegan a ocasionar como es el caso de esta planta el incendio completo, Esta refinería de la

industria petroquímica nacional es la segunda más grande con que se cuenta, tiene una capacidad de procesamiento de 315,000 barriles por día, según datos obtenidos de planta, dicha reductora de viscosidad produce 80,000 barriles por día el mantenerla fuera de operación genera pérdidas económicas muy grandes a la empresa.

Este trabajo sirve como apoyo para otros investigadores que se enfrenten a problemas similares a este, el combustóleo es un fluido newtoniano que su corrección se realiza como lo muestra este trabajo. Queda pendiente para quien quiera abordar, investigar la corrección por viscosidad para fluidos reológicos.

Referencias

- American National Standard/Hydraulic Institute. *Rotodynamic Pump for Hydraulic Test Performance*. ANSI/HI 9.1-9.5
- Forsthoffer, W. E. (2005). *Pumps: Forsthoffer's Rotating Equipment Handbooks*. USA: Elsevier Science & Technology Books
- Mataix, C. (2011). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. México: Alfa omega, Oxford.
- McCabe, W. L. Smith, J. C. and Harriott, P. (1991). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. España. McGraw-Hill.
- Sulzer. (1995). *Centrifugal Pump Handbook*. London and New York: Elsevier Applied Science.
- Viejo, M. y Álvarez, J. (2003). *Bombas, teoría, diseño y selección*. México: Limusa, S.A de C.