

Análisis de las Condiciones de Operación en Estado Estable de Estaciones Reductoras de Presión en Oleoductos

Moreira, Angel¹; Mena, Santiago¹

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador

Resumen: El estudio trata de las condiciones de operación de estaciones Reductoras de Presión en Estado Estable y en estado transitorio abordadas desde el punto de vista hidrodinámico – térmico. Con el fin desarrollar un modelo hidrodinámico para flujo en tuberías, y determinar una fórmula para el gradiente hidráulico para cualquier posición. Además de realizar un análisis de la influencia de las estaciones reductoras de presión en la hidrodinámica de un ducto de transporte de fluido, con la finalidad de establecer las bases y elaborar un modelo que caracterice hidrodinamicamente el SOTE, sistema en el cual se harán algunos análisis. Así mismo con el modelo hidrodinámico – energético de una estación reductora de presión tanto en estado estable como en transitorio. Se simulan algunos escenarios de operación de SOTE y sus estaciones reductoras de presión.

Palabras clave: Hidrodinámico, Estaciones Reductoras, Estable, Transitorio, SOTE.

Analysis of Conditions of Operation in Stable State of Reduction Stations of Pressure in Pipelines

Abstract: This study deals with the operating conditions of pressure reducing stations in stable state and transient approached from the hydrodynamic point of view - heat. In order to develop a hydrodynamic model for flow in pipes, and determine a formula for the hydraulic gradient for any position. Likewise an analysis of the influence of pressure reducing stations hydrodynamics of a fluid transport duct. To lay the groundwork and develop a hydrodynamic model characterizing the SOTE system in which some analysis will be made. Likewise with the hydrodynamic model - energy from a pressure reducing station both steady state and transient. Some scenarios SOTE operation and pressure reducing station are simulated.

Keywords: Hydrodynamic Stations Reducing, Stable, Transitional, SOTE.

1. INTRODUCCION

La siguiente información es producto de un trabajo de Titulación de Maestría, en Transportación de Petróleo y Derivados en la Escuela Politécnica Nacional de Quito – Ecuador por ello, en la bibliografía especializada se tiene poca información de las condiciones de operación de estaciones reductoras de presión, en especial de sistemas de transporte de crudo. Un análisis hidrodinámico y térmico de las condiciones en varios escenarios es necesario para asegurar la correcta operación de un sistema de transporte de crudo. Por lo que técnicamente, las condiciones de operación de estaciones reductoras son importantes en el análisis tanto termodinámico -hidrodinámico como de integridad de un oleoducto.

El control de los parámetros que influyen sobre el comportamiento del sistema permite la seguridad en el manejo de un sistema de transporte. Varios de estos parámetros se controlan en las estaciones reductoras de presión.

El trabajo se enfocó en determinar un modelo que represente las condiciones de operación en estado estable y transitorio de

una estación reductora incluyendo todas las variables que influyen en el sistema.

Se analizaron las condiciones de operación del SOTE, las cuales desde su inicio de operaciones a finales de la década de los 70's, han cambiado considerablemente. Se desarrolló un programa en Matlab para analizar varias de las condiciones actuales de operación y los riesgos en la integridad del sistema.

2. ECUACIONES PARA EL TRANSPORTE DE FLUIDO EN TUBERIA

Partiendo de la ecuación de la energía en un ducto (ver Figura 1) (STREETER 2000)

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + gH_p \quad (1)$$

Donde:

p: presión en la entrada y salida del ducto o tubería $\left[\frac{N}{m^2}\right]$

ρ : densidad del fluido a la entrada del ducto $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

g : aceleración de la gravedad, $9.8 \left[\frac{m}{s^2}\right]$

z : altura con respecto al nivel de referencia $[m]$

H_p : representa las pérdidas de energía debido al rozamiento y accesorios $[m]$

Se asume que el valor de la densidad no varía entre el estado del punto 1 y del punto 2.

Las pérdidas de energía del fluido, asociadas con el rozamiento, se determinan con la ecuación:

$$H_p = f \frac{L V^2}{D 2g}; [m] \quad (2)$$

Donde:

f : Factor de fricción – adimensional.

El factor de fricción se determina con la ecuación de Colebrook – White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right] \quad (3)$$

ε/D : rugosidad relativa, adimensional.

Re : Número de Reynolds, adimensional con la relación:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4)$$

Donde:

μ : viscosidad dinámica $[Pa \cdot s]$

L : longitud total de la tubería $[m]$

D : diámetro interior de la tubería $[m]$

ya no es necesaria, está definida arriba

V : velocidad promedio del flujo $\left[\frac{m}{s}\right]$

Las pérdidas de energía en la tubería, como se puede observar en la ecuación 2, dependen proporcionalmente de la longitud de la tubería L . Para el caso de cualquier posición x , se tiene la siguiente relación (ver figura 1).

Figura 1: Referencia gráfica para la ecuación 5 y 6.

$$H_p(x) = f \frac{x V^2}{D 2g}; [m] \quad (5)$$

Esta ecuación representa las pérdidas de energía, en altura hidráulica, debidas al rozamiento.

Si $x=L$, se tiene la pérdida total en la longitud de la tubería (y la ecuación queda como la ecuación 2; no es pertinente repetir demasiado la misma ecuación).

$$H_p = f \frac{L V^2}{D 2g}; [m] \quad (6)$$

La velocidad, en función del caudal y del diámetro interior de la tubería, es:

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2}; \left[\frac{m^3}{s}\right] \quad (7)$$

Reemplazando la ecuación 7 en la ecuación 5, se tiene:

$$H_p(x) = f \frac{x}{D^5} \cdot \frac{1}{2g} \cdot \frac{16Q^2}{\pi^2}; [m] \quad (8)$$

Las pérdidas de energía, en altura hidráulica, en función de la posición x , se obtiene dividiendo la ecuación 1 para la aceleración de la gravedad, así:

$$\left[\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + g z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + g z_2 + g H_p \right] \div g \quad (9)$$

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + H_p;$$

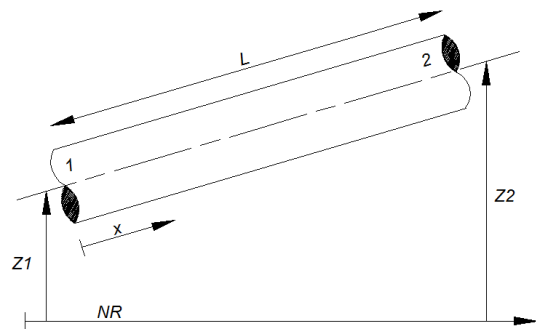


Figura 1. Velocidad del flujo en los puntos 1 y 2

Las velocidades en los puntos 1 y 2 son iguales (ver Figura 1), por lo que se pueden eliminar en ambos lados de la ecuación 9:

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + H_p; [m] \quad (10)$$

Si se agrupan los términos del lado izquierdo de la ecuación en una sola variable, se tiene:

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 = H_1; [m] \quad (11)$$

Donde H_1 es la altura Piezométrica y, agrupando los términos del lado derecho:

$$\frac{p_2}{\rho g} + z_2 = H_2; [m] \quad (12)$$

Al sustituir las ecuaciones 8, 11 y 12 en la ecuación 10, se tiene para cualquier abscisa x :

$$H_2(x) = H_1 - f \frac{x}{D^5} \cdot \frac{1}{2g} \cdot \frac{16Q^2}{\pi^2}; [m] \quad (13)$$

Si se llama constante c al siguiente grupo de factores:

$$c = \frac{f}{D^5} \cdot \frac{1}{2g} \cdot \frac{16Q^2}{\pi^2} \quad (14)$$

La ecuación 13 se transforma en:

$$H_2(x) = H_1 - cx; [m] \quad (15)$$

La ecuación 15 representa la Piezométrica, en función de la posición x a lo largo del ducto o tubería.

En el caso de flujo de tuberías, de diferente diámetro, la ecuación 15 se puede generalizar como (ver Figura 2):

$$H_j(x) = H_i - c_k(x_j - x_i); [m] \quad (16)$$

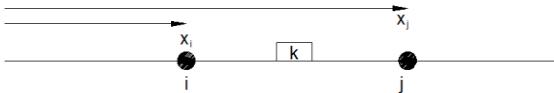


Figura 2. Flujo de tubería de diferentes diámetros

3. ESTACIONES REDUCTORAS DE PRESION Y SU INFLUENCIA EN OLEODUCTOS

Las estaciones reductoras, colocadas en ciertas ubicaciones de un oleoducto de alta presión, tienen la finalidad de:

- Reducir la presión hasta márgenes seguros de operación.
- Proteger el oleoducto, aguas abajo de la estación, de presiones altas no deseadas.
- Controlar el perfil hidrodinámico del oleoducto.

En este trabajo se revisó la protección del oleoducto mediante las estaciones reductoras (ver Tabla 1). (www.eppetroecuador.ec 2012)

Tabla 1. Ubicaciones de Estaciones Reductororas de Presión y Altitud sobre el Nivel del mar para el SOTE

Estación	Ubicación con respecto a Lago Agrio (Km)	Altitud (msnm)
San Juan	261.68	3497
Chiriboga	273.62	1998
La Palma	295.96	1613
Sto. Domingo	329.87	566

3.1 Características de Funcionamiento de una Estación Reductora de presión en Estado Estable

Una estación reductora de presión se puede modelar como una válvula de control de presión. Para efectos de modelación, en este trabajo, se toman las relaciones entre Kv y el porcentaje de apertura de acuerdo al tipo de válvula (ver Figura 3). (Smith 2004)

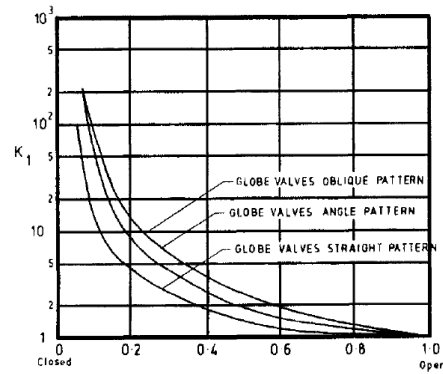


Figura 3. Curvas características de una válvula de globo, variación de kv con el porcentaje de apertura

4. MODELO HIDRODINAMICO ENERGETICO DE UNA ESTACION REDUCTORA DE PRESION

4.1 Modelo Hidrodinámico Energético de una Estación Reductora de Presión en Estado Estable.

La función de la estación reductora de presiones reducir la presión hasta un valor determinado con respecto a la presión de ingreso. La energía de presión que se “pierde” se transforma en calor debido a las pérdidas internas dentro de la válvula.

La energía producida en forma de calor tiene dos vías para evacuar del volumen de control: por conducción – convección a través del cuerpo de la válvula y por convección con el fluido que sale. (Frank P. Incropera 1999)

Cuando el calor se ha transferido por conducción hasta la superficie de la válvula de control comienza la transferencia de calor por convección con el ambiente, es decir el aire que la rodea.

En base a los argumentos expuestos se puede realizar el balance energético en una estación reductora (o válvula de control de presión) en estado estable: (Pazmiño 1993)

$$\dot{Q} - \dot{W} = \int_{sc} h_o \rho \bar{V} \cdot d\bar{A} + \dot{W}_p; [W] \quad (17)$$

Para hallar la presión a la salida se parte de la ecuación de la energía (ecuación 1):

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + gH_p$$

Con la ecuación de la energía para un volumen de control se determina la temperatura de salida:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} e \rho dV + \int_{sc} h_o \rho \bar{V} \odot d\bar{A} + \dot{W}_p; [W] \quad (18)$$

Despejando la temperatura de salida T2 de la válvula reductora se tiene:

$$T_2 = \left[\frac{1}{C_p + \frac{UA}{2\dot{m}}} \right] \left[-\frac{UAT_1}{2\dot{m}} + \frac{UAT_\infty}{\dot{m}} + H_p + C_p T_1 \right]; \text{ } ^\circ\text{C} \quad (19)$$

4.2 Modelo Hidrodinámico – Energético de una Estación Reductora de Presión en Estado Transitorio

La ecuación de la energía para un volumen de control de una válvula:

$$\dot{Q} - \dot{W}_{ejes} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{vc} \rho p dV + \int_{sc} h_o \rho \vec{V} \odot d\vec{A} + \dot{W}_p; [W] \quad (20)$$

$$\dot{W}_{ejes} = 0$$

$$\dot{Q} = -UA(T - T_\infty) \quad (21)$$

$$\dot{W}_p = \dot{m} \frac{k_v V^2}{2} = -\dot{Q}_{gen}; \quad (22)$$

asumiendo que el calor específico es constante, la ecuación 20 se transforma en:

$$k_v \frac{V^2}{2} \dot{m} - UA(T - T_\infty) = \rho Vol C_p \frac{dT}{dt} + \int_{sc} h_o \rho \vec{V} \cdot d\vec{A}; \quad (23)$$

$$k_v \frac{V^2}{2} \dot{m} - UA(T - T_\infty) = \rho Vol C_p \frac{dT}{dt} + \dot{m}(h_2 - h_1); \quad (24)$$

$$K_v \frac{V^2}{2} \dot{m} - UA(T - T_\infty) = \rho Vol C_p \frac{dT}{dt} + \dot{m} C_p (T - T_1) \quad (25)$$

$$\frac{du}{dT} = C_p \quad (26)$$

Si se agrupa así:

$$A = \left(k_v \frac{V^2}{2} \dot{m} + UAT_\infty + \dot{m} C_p T_1 \right) \quad (27)$$

$$B = (UA + \dot{m} C_p) \quad (28)$$

$$C = \rho Vol C_p \quad (29)$$

La ecuación diferencial toma la forma:

$$A - BT = C \frac{dT}{dt} \quad (30)$$

Se lleva la ecuación diferencial a una forma conveniente para poder aplicar la transformada de Laplace:

$$C \frac{dT}{dt} + BT = A(t) \quad (31)$$

$$\frac{dT}{dt} + \frac{BT}{C} = \frac{A(t)}{C} \quad (32)$$

Si a B/C=a, a A(t)/C=b, se tiene:

$$y' + ay - b = 0 \quad (33)$$

Aplicando la transformada de Laplace se tiene:

$$sT(s) - T(0) + aT(s) - b \left(\frac{1}{s} \right) = 0 \quad (34)$$

$$T(s)(s + a) = T(0) + \frac{b}{s} \quad (35)$$

Después de agrupar, resolver las fracciones parciales y agrupar términos se tiene:

$$\mathcal{L}^{-1}\{T(s)\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{ \frac{T(0)}{(s + a)} \right\} + \mathcal{L}^{-1}\left\{ \frac{b}{as} \right\} - \mathcal{L}^{-1}\left\{ \frac{b}{a(s + a)} \right\} \quad (36)$$

$$y(t) = y(0)e^{-at} + \frac{b}{a} - \frac{b}{a}(1 - e^{-at}) \quad (37)$$

$$y(t) = y(0)e^{-at} + \frac{b}{a}(1 - e^{-at}); \quad (38)$$

Si los coeficientes a y b se reemplazan por sus equivalentes le ecuación se transforma en:

$$y(t) = y(0)e^{-\frac{Bt}{C}} + \frac{A}{B} \left(1 - e^{-\frac{Bt}{C}} \right) \quad (39)$$

Un ejemplo de solución gráfica de la ecuación 39 en la figura 4.

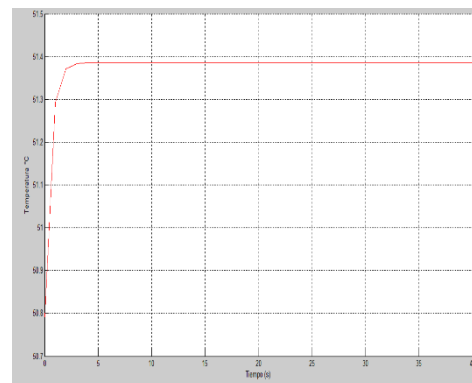


Figura 4. Solución grafica de la ecuación 39 (Sistema de primer orden. Temperatura inicial 50.8 °C, Temperatura final 51.39°C)

5. ESCENARIOS DE OPERACIÓN DEL SOTE

Condiciones de operación: Normal

Como partida para la simulación de posibles escenarios de operación del SOTE se consideraron los parámetros de operación real. Los escenarios analizados fueron:

5.1 Primer Escenario

Grado API: 24

Temperatura de crudo SOTE: 50 °C

Flujo volumétrico: 367920 BBLs/día

Se puede observar en el gráfico el Gradiente Hidráulico, el Perfil Orográfico y el MAOP para las condiciones de operación indicadas (ver figura 5).

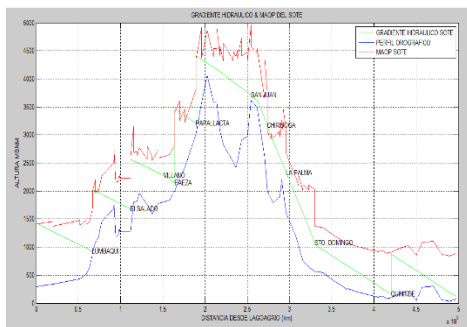


Figura 5. Gradiente Hidráulico & MAOP Escenario #1

5.2 Segundo Escenario

Variación de API desde 24 a 30: se observa que un crudo más liviano que el de operación normal puede ser transportado con menores presiones de bombeo. A las presiones de bombeo normal, el Gradiente Hidráulico es mayor que el MAOP de la tubería en varios puntos (ver figura 6).

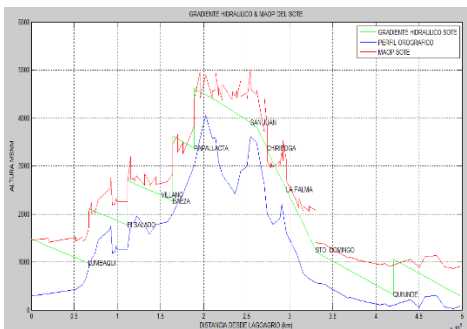


Figura 6. Gradiente Hidráulico & MAOP Escenario #2

5.3 Tercer Escenario

Variación de Temperatura de Crudo SOTE (desde 50 °C a 60 °C): El incremento de la temperatura disminuye la viscosidad del crudo, por lo que, las presiones de operación normal no son adecuadas para un crudo a 60°C. En varios puntos sobrepasa el MAOP de la tubería (ver figura 7).

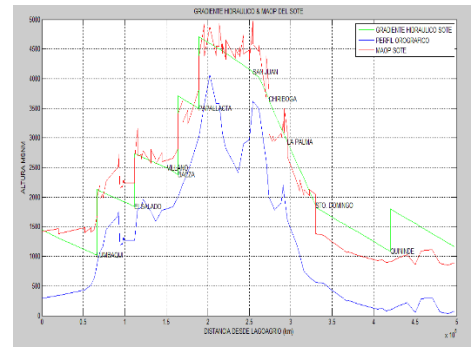


Figura 7. Gradiente Hidráulico & MAOP Escenario #3

5.4 Cuarto Escenario

Variación del caudal de VILLANO (desde 2000 BBLs/h a 3000 BBLs/h): las presiones de bombeo normal para el aumento en el caudal desde Villano no son suficientes para el transporte a través de la cordillera, en especial desde Santo Domingo (ver figura 8).

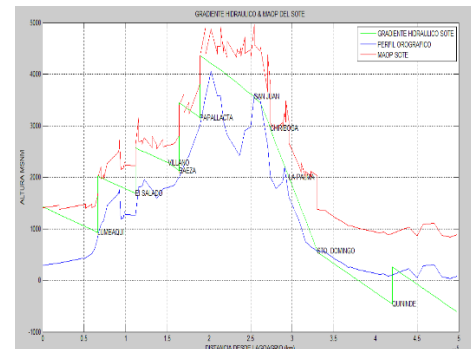


Figura 8. Gradiente Hidráulico & MAOP Escenario #4

6. CONCLUSIONES

Se obtuvieron los modelos matemáticos para una estación reductora tanto para el estado estable como en estado transitorio.

Se determinó que la temperatura a salida de la estación reductora depende en gran medida del constante Kv porcentaje de apertura de la válvula de una estación reductora.

En el caso de SOTE se encontró que en los puntos después del TIE – IN de Villano al SOTE y a la descarga de la estación reductora de CHIRIBOGA la presión de las condiciones de operación actualmente está cerca de MAOP del SOTE.

El crudo del cual se obtuvo la curva de Presión vs Temperatura no tiene cambio de fase o alguno del hidrocarburo disuelto no llega a su fase de vapor, en ningún lugar del SOTE para las condiciones de operación simuladas.

En las estaciones reductoras, para las condiciones de operación simuladas no hay cambio de fase ni alguno de los hidrocarburos disueltos llega a su fase de vapor.

Se justifica el uso de una estación de bombeo en Quindindé debido a que el API es mayor al del diseño original del SOTE

El incremento de temperatura a la salida de las estaciones Reductoras de Presión no es significativo para las condiciones de operación simulada, inclusive con un volumen de control adiabático.

REFERENCIAS

- Pazmiño, Jorge. Sistemas para diseñar instalaciones superficiales de producción. Quito: Petroecuador, 1993.
- Smith, Peter. Valve Selection Handboo. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- Çengel, yunus, michael a boles. Termodinamica. Mexico: mcgraw-hill., 1999.
- Frank P. Incropera, David P. DeWitt. Fundamentos de Transferencia de Calor . Mexico: Prentice Hall, 1999.
- Streeter, v. L., & wylie e. Benjamin coaut. Mecanica de los fluidos . Santafe de bogota: mcgraw-hill interamericana, 2000.
- www.eppetroecuador.ec. 4 de enero de 2012. www.eppetroecuador.ec (último acceso: 6 de junio de 2015).

BIOGRAFÍAS



Moreira Romero Ángel Fabián.

Nacido en Manta el 20 de octubre de 1983, graduado como Ingeniero Industrial en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí ULEAM en el año 2008. Sus áreas de interés son la Mecánica de Fluidos y Transferencia de Calor, docente de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí desde el 2009 hasta la actualidad, obtuvo su Maestría de Transportación de

Petróleo y Derivados en la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador en diciembre del 2015, Magister en Procesos Industriales en la Universidad Central del Ecuador en septiembre de 2016, Cursando PhD. En la Universidad Mayor Nacional de San Marcos en Lima Perú.



Mena Maldonado Santiago Alberto.

Nacido en Quito el 3 de octubre de 1981 en la ciudad de Quito, graduado como Ingeniero Mecánico en la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son la Mecánica de Fluidos, Turbo Maquinaria y Termodinámica. Obtuvo su maestría en la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador en diciembre del 2015, se ha desempeñado como jefe de proyecto en Loja gas y

actualmente se desempeña como coordinador de materiales de ingeniería de facilidades de la empresa Andespetroleum en la misma desde el 2013