UPV/EHU OCW 2018
CARACTERIZACIÓN Y LOGÍSTICA DE COMBUSTIBLES DE ORIGEN FÓSIL

TEMA 2: COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

ACTIVIDADES PRÁCTICAS (SOLUCIONES)

Aitziber Iriondo Hernández
Blanca Mª Caballero Iglesias
Maite de Blas Martín

Escuela de Ingeniería de Bilbao
Ingeniería Química y del Medio Ambiente

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

SOLUCIÓN A LAS ACTIVIDADES PRÁCTICAS

I) Ejercicios numéricos:

Ejercicios 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4

Imagen publicada en Pixabay bajo dominio público [1]

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.1. SOLUCIÓN (I)

a) El diámetro de primera aproximación

El cálculo del diámetro interno de primera aproximación se realiza mediante la ecuación:

$$\boxed{D\ (mm) = 18{,}8\ \sqrt{\frac{Q\ (m^3/h)}{v\ (m/s)}}}$$

Sustituyendo en ella los datos que el enunciado del problema proporciona y el dato de la velocidad, que en este caso se supondrá un valor de 1,5 m/s, ya que la velocidad en un oleoducto suele está comprendida entre 1-2 m/s, el resultado obtenido es:

$$D = 18{,}8\ \sqrt{\frac{330}{1{,}5}} = 278{,}85\ mm = \boxed{0{,}279\ m}$$

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.1. SOLUCIÓN (II)

b) La rugosidad relativa de la tubería

La rugosidad relativa es un parámetro adimensional que se define como el cociente entre la rugosidad absoluta (ε) y el diámetro interno. Es decir, que su cálculo se rige por la siguiente ecuación:

$$\boxed{\text{Rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon(\text{m})}{\text{D}(\text{m})}}$$

Teniendo en cuenta que el enunciado del problema proporciona el dato de rugosidad absoluta en "mm" se deberá de sustituir en la ecuación el dato del diámetro *(calculado en el apartado a))* en "mm" o, hacer un cambio de unidades de la rugosidad relativa en "m" para que ambos parámetros estén en las mismas unidades, y de esta forma la rugosidad relativa sea adimensional. En este caso se emplean "mm" como unidades para la rugosidad relativa y para el diámetro interno.

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{0{,}045}{278{,}85} = \boxed{1{,}61 \cdot 10^{-4}}$$

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.1. SOLUCIÓN (III)

c) El número de Reynolds (Re), indicando el tipo de régimen del fluido

El Re, parámetro adimensional como la rugosidad relativa, se puede calcular a partir de dos ecuaciones. Sin embargo, debido a que el dato de viscosidad cinemática que aporta el enunciado está en cSt (mm²/s), la ecuación a emplear es:

$$\boxed{Re = 354\frac{Q\ (m^3/h)}{D\ (m)\cdot \upsilon (cSt)}}$$

Conocidos los datos para el caudal, diámetro interior de la tubería *(calculada en el apartado a))* y viscosidad cinemática, se obtiene el siguiente resultado para el número de Reynolds:

$$Re = 354\frac{330}{0{,}279\cdot 7} = 59815{,}68 = \boxed{6{,}0\cdot 10^4} \geq 4000\text{, entonces régimen turbulento}$$

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.1. SOLUCIÓN (IV)

d) El factor de fricción mediante el diagrama de Moody

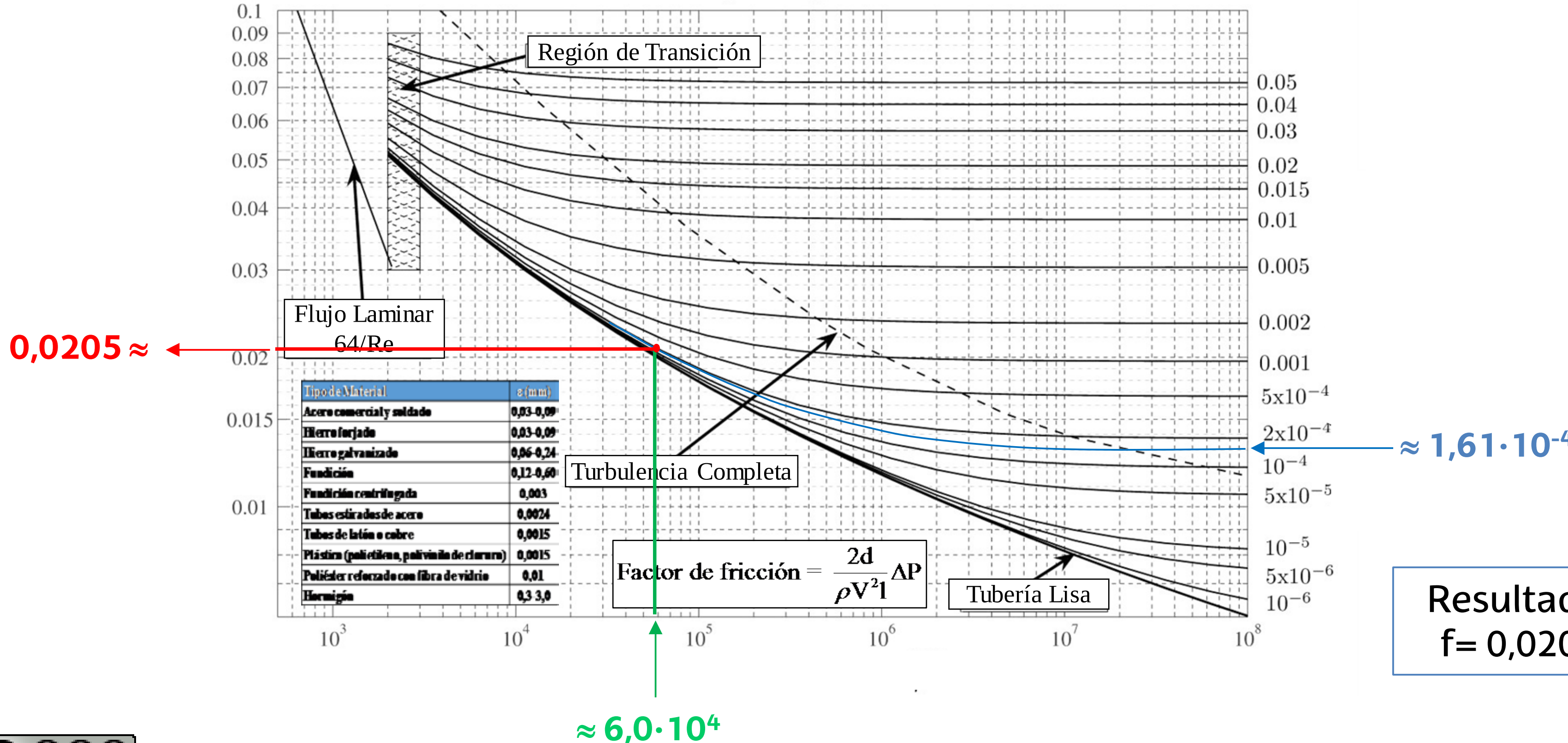
El factor de fricción se puede calcular numéricamente o gráficamente. El método más extendido es el gráfico, para lo cuál se hace uso del diagrama de Moody (Figura 2A). Para ello es necesario conocer la rugosidad relativa *(calculada en el apartado b)* y el número de Reynolds *(determinado en el apartado c))*.

Con el valor de la rugosidad relativa se entra por la ordenada de la derecha de la gráfica, siguiendo las curvas del diagrama *(en color azul)*. Y con el valor del número de Reynolds, se entra por la abscisa y se sigue mediante línea recta *(en color verde)* hasta el cruce con el valor de la rugosidad relativa. El valor del punto de corte entre la curva (rugosidad relativa) y la recta (número de Reynolds) se lee en la ordenada de la izquierda *(en color rojo)* que hace referencia al factor de fricción, “f”.

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.1. SOLUCIÓN (V)

d) El factor de fricción mediante el diagrama de Moody (cont.)



Resultado:
f= 0,0205

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.2. SOLUCIÓN (I)

a) El diámetro de primera aproximación, la rugosidad relativa y el número de Reynolds

Para calcular los parámetros que se piden es necesario seguir las mismas explicaciones que aparecen incluidas en el ejercicio 2.1, apartados a), b) y c). Asimismo, se debe considerar que la rugosidad absoluta del acero comercial es de 0,03-0,09 mm (según aparece indicado en la tabla 2.9 del material de estudio del tema 2). Y suponiendo un valor promedio, la rugosidad absoluta sería 0,06.

$$\boxed{D\ (\text{mm}) = 18{,}8\sqrt{\frac{Q\ (\text{m}^3/\text{h})}{v\ (\text{m/s})}}} \Rightarrow D = 18{,}8\sqrt{\frac{970}{1{,}5}} = 478{,}01\ \text{mm} = \boxed{0{,}478\ \text{m}}$$

$$\boxed{\text{Rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon(\text{mm})}{D(\text{mm})}} \Rightarrow \text{Rugosidad relativa} = \frac{0{,}06}{478{,}01} = \boxed{1{,}25 \cdot 10^{-4}}$$

$$\boxed{Re = 354\frac{Q\ (\text{m}^3/\text{h})}{D\ (\text{m}) \cdot \upsilon(\text{cSt})}} \Rightarrow Re = 354\frac{970}{0{,}478 \cdot 8} = 89796{,}02 = \boxed{9{,}0 \cdot 10^{4}}$$

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

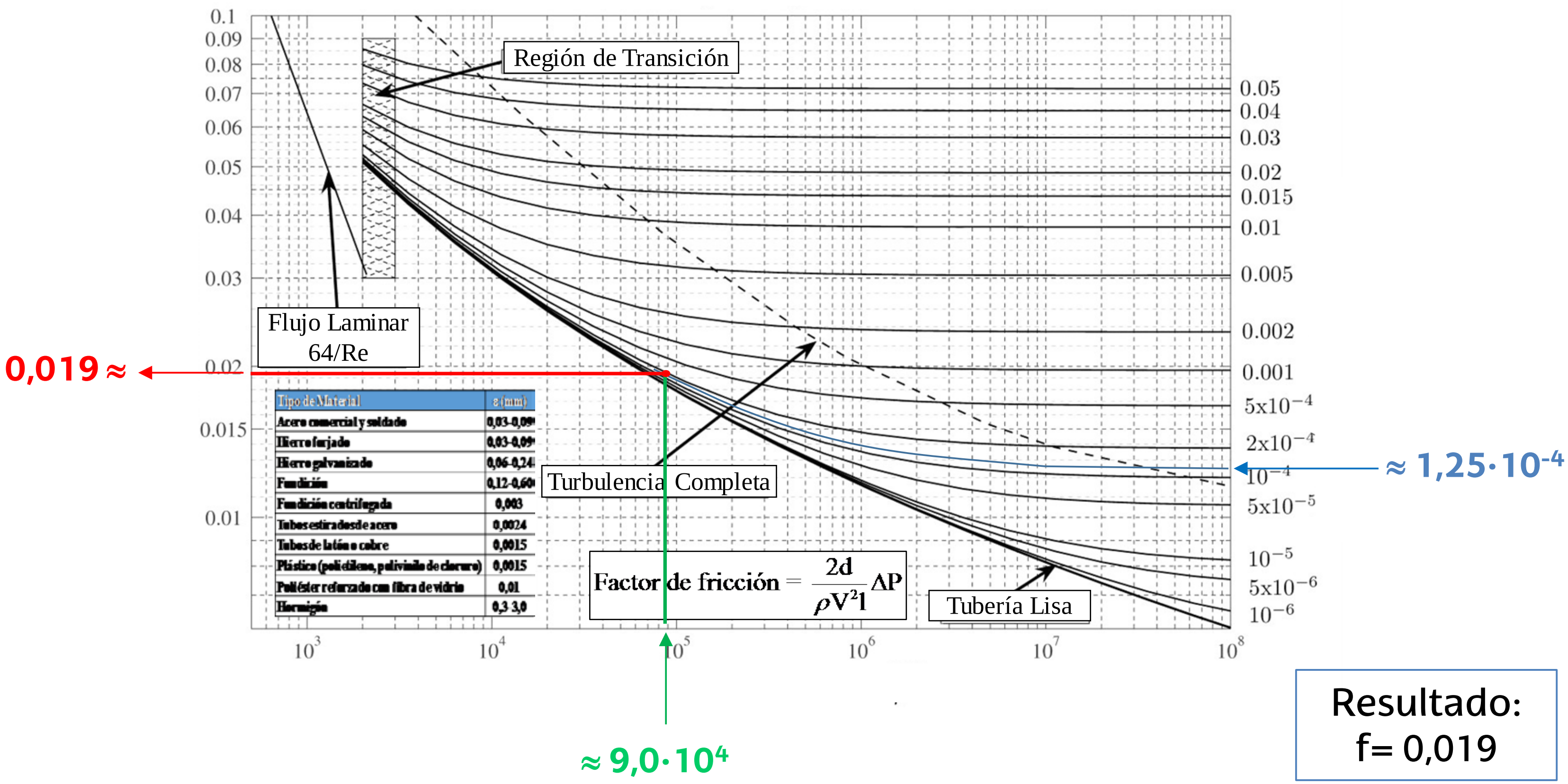
EJERCICIO 2.2. SOLUCIÓN (II)

b) El factor de fricción. ¿Qué pasaría con este factor si las características del sistema se mantienen pero el caudal disminuye a 22 m^3/h?

Para calcular el factor de fricción se dispone de los datos de rugosidad relativa y del número de Reynolds calculados en el apartado a). Con éstos, el diagrama de Moody (Figura 2A) y las explicaciones dadas en el apartado d) del ejercicio 2.1, se calcula gráficamente el factor de fricción.

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.2. SOLUCIÓN (III)



Resultado:
f= 0,019

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.2. SOLUCIÓN (IV)

Para poder responder a la pregunta sobre qué ocurriría si el caudal disminuyese manteniendo el resto de características iguales, hay que considerar que en estas nuevas condiciones lo único que cambiaría sería el número de Reynolds y por tanto, el factor de fricción. Es decir, que: D= 0,478 m, υ = 8,0 cSt y ε/D = $1{,}25\cdot10^{-4}$, mientras que habría que calcular primero el número de Reynolds y posteriormente, mediante Moody, el factor de fricción.

$$\boxed{Re = 354\,\frac{Q\ (m^3/h)}{D\ (m)\cdot\upsilon(cSt)}} \Rightarrow Re = 354\,\frac{22}{0{,}478\cdot 8} = \boxed{2036{,}61}$$

El valor obtenido se sitúa entre los siguientes valores: 2000 ‹ Re = 2036,61 ≤ 4000, indicativo de un régimen de transición o crítico. Este hecho no permite el cálculo del factor de fricción, y por tanto no se podría realizar el dimensionamiento. En caso de que se requiriese dimensionar la tubería, se debería modificar alguna propiedad del fluido o de la tubería para poder establecer un régimen laminar o turbulento que permita el cálculo del factor de fricción.

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.2. SOLUCIÓN (V)

c) La pérdida de presión por rozamiento que se produce por km de tubería teniendo en cuenta el valor del factor de fricción calculado en el apartado b) para un caudal de 970 m³/h

La pérdida de presión por rozamiento se calcula mediante la ecuación:

$$\boxed{h_f = 6395 \cdot 10^6 \cdot f\ (\text{factor de fricción}) \cdot L(\text{km}) \frac{Q(\text{m}^3/\text{h})^2}{D(\text{mm})^5}}$$

Sustituyendo los valores de los parámetros que aparecen incluidos en la ecuación se obtiene que:

$$h_f = 6395 \cdot 10^6 \cdot 0{,}019 \cdot 200 \frac{(970)^2}{(478{,}01)^5} = 916{,}18\ \text{m}$$

Para calcular la pérdida de presión por km de tubería, se debe dividir el dato de h_f obtenido por km de tubería, siendo el valor de este último 200 km.

$$\frac{h_f(\text{m})}{L(\text{km})} = \frac{916{,}18}{200} = \boxed{4{,}6\ \text{m/km}}$$

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.3. SOLUCIÓN (I)

a) El diámetro de primera aproximación, la rugosidad relativa, el número de Reynolds y el factor de fricción

Al igual que en los casos anteriores, el cálculo de los parámetros que se piden requieren del seguimiento de los mismos pasos y del empleo de las mismas ecuaciones y diagrama.

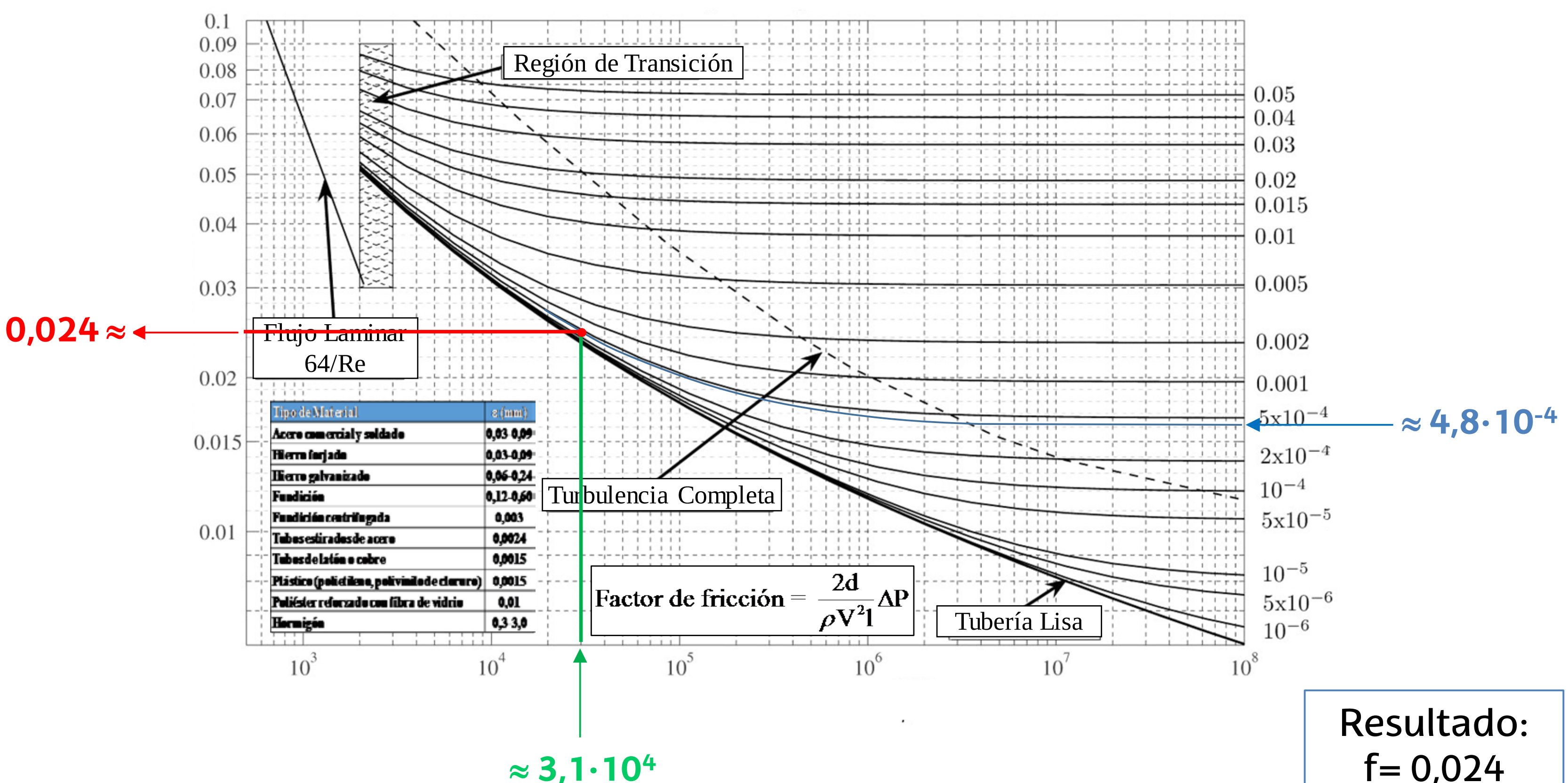
$$\boxed{D\ (mm) = 18{,}8\sqrt{\frac{Q\ (m^3/h)}{v\ (m/s)}}} \Longrightarrow D = 18{,}8\sqrt{\frac{150}{1{,}5}} = 188{,}00\ mm = \boxed{0{,}188\ m}$$

$$\boxed{\text{Rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon(mm)}{D(mm)}} \Longrightarrow \text{Rugosidad relativa} = \frac{0{,}09}{188{,}00} = \boxed{4{,}79\cdot 10^{-4}}$$

$$\boxed{Re = 354\frac{Q\ (m^3/h)}{D\ (m)\cdot \upsilon(cSt)}} \Longrightarrow Re = 354\frac{150}{0{,}188\cdot 9} = 31383{,}00 = \boxed{3{,}1\cdot 10^{4}}$$

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.3. SOLUCIÓN (II)



Resultado:
f= 0,024

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.3. SOLUCIÓN (III)

b) La presión en la estación “B”. ¿Qué pasaría en la estación “B” si el caudal se corta después de esta estación, debido al cierre de una válvula, y se mantiene la presión de la estación “A”?

El cálculo de la pérdida de presión entre dos puntos que presentan diferente cotas se realiza mediante la ecuación de Bernoulli, cuya expresión matemática se indica a continuación:

$$\frac{P_A(kN/m^2)}{\gamma(kN/m^3)}+\frac{{v_A}^2(m/s)^2}{2\cdot g\,(m/s^2)}+Z_A(m)+H_p\ (m)=\frac{P_B(kN/m^2)}{\gamma(kN/m^3)}+\frac{{v_B}^2(m/s)^2}{2\cdot g(m/s^2)}+Z_B(m)+h_f\ (m)$$

En principio todos los parámetros son conocidos, debido a que son datos que aporta el enunciado del problema. En este sentido, como el caudal y el diámetro no se modifican a lo largo de la tubería, la velocidad tampoco, y por tanto los términos de velocidad en la ecuación de Bernoulli se anularían. Lo mismo pasa con Hp, que al no indicar que hay bombas en la instalación, éste término se puede suponer nulo.

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.3. SOLUCIÓN (IV)

Por otro lado, se debe calcular h_f. Al igual que en el apartado c) del ejercicio 2.2, éste se calcula siguiendo la siguiente ecuación:

$$\boxed{h_f = 6395 \cdot 10^6 \cdot f\ (\text{factor de fricción}) \cdot L(km) \frac{Q(m^3/h)^2}{D(mm)^5}}$$

$$h_f = 6395 \cdot 10^6 \cdot 0{,}024 \cdot 39 \frac{(150)^2}{(188{,}00)^5} = 573{,}47\ m$$

Conocidos todos los valores asociados a los diferentes términos de la ecuación de Bernoulli, es posible el cálculo de la presión en la estación "B". Tal y como se muestra a continuación algunos de los términos de la ecuación mencionada se anulan.

$$\frac{P_A(kN/m^2)}{\gamma(kN/m^3)} + \cancel{\frac{v_A^2(m/s)^2}{2 \cdot g\ (m/s^2)}} + Z_A(m) + \cancel{H_p}\ (m) = \frac{P_B(kN/m^2)}{\gamma(kN/m^3)} + \cancel{\frac{v_B^2(m/s)^2}{2 \cdot g(m/s^2)}} + Z_B(m) + h_f\ (m)$$

0

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.3. SOLUCIÓN (V)

$$P_B(kN/m^2) = \gamma(kN/m^3) \cdot \left[\frac{P_A(kN/m^2)}{\gamma(kN/m^3)} + Z_A(m) - \left(Z_B(m) + h_f(m)\right)\right]$$

$$\gamma = \delta\ (kg/m^3) \cdot g(m/s^2) = 825 \cdot 9{,}81 = 8093{,}25\ N/m^2 = 8{,}09\ kN/m^2$$

$$P_A = 45{,}7\ kg/cm^2 \cdot \frac{98{,}07\ kN/m^2}{1\ kg/cm^2} = 4481{,}80\ kN/m^2$$

$$P_B = 8{,}09 \cdot \left[\frac{4481{,}80}{8{,}09} + 550 - \left(75 + 573{,}47\right)\right] = \boxed{3685{,}2\ kN/m^2 = 37{,}6\ kg/cm^2}$$

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.3. SOLUCIÓN (V)

En el caso de que el caudal se cortase, este hecho implicaría que el término asociado a la pérdida de presión por rozamiento, es decir h_f se anularía. Por consiguiente en la ecuación de Bernoulli solo se considerarían los términos asociados a la presión y a la cota de los diferentes puntos.

$$\frac{P_A(kN/m^2)}{\gamma(kN/m^3)}+\cancel{\frac{v_A{}^2(m/s)^2}{2\cdot g\,(m/s^2)}}+Z_A(m)+\underbrace{\cancel{H_p\,(m)}}_{0}=\frac{P_B(kN/m^2)}{\gamma(kN/m^3)}+\cancel{\frac{v_B{}^2(m/s)^2}{2\cdot g(m/s^2)}}+Z_B(m)+\underbrace{\cancel{h_f\,(m)}}_{0}$$

$$P_B = P_A+\gamma(Z_A-Z_B)= 4481{,}8+8{,}09\cdot(550-75) = \boxed{8324{,}5\ kN/m^2 = 84{,}9\ kg/cm^2}$$

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

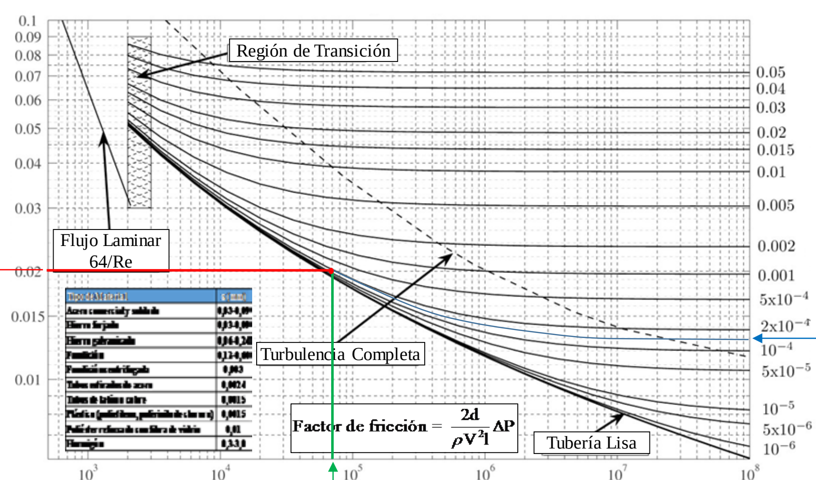
EJERCICIO 2.4. SOLUCIÓN (I)

a) La presión en la estación “B”

En este apartado se debe seguir el mismo procedimiento que en el ejercicio 2.3.

$$\boxed{D\ (mm) = 18{,}8\sqrt{\frac{Q\ (m^3/h)}{v\ (m/s)}}} \Rightarrow D = 18{,}8\sqrt{\frac{300}{2}} = 230{,}25\ mm = \boxed{0{,}230\ m}$$

$$\boxed{Re = 354\frac{Q\ (m^3/h)}{D\ (m)\cdot\upsilon(cSt)}} \Rightarrow Re = 354\frac{300}{0{,}230\cdot 6{,}5} = 71036{,}79 = \boxed{7{,}1\cdot 10^4}$$



0,02 ≈

≈ $1{,}5\cdot10^{-4}$

≈ $7{,}1\cdot10^{4}$

Resultado:
f= 0,02

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.4. SOLUCIÓN (II)

$$\boxed{h_f = 6395\cdot 10^6 \cdot f\,(\text{factor de fricción})\cdot L(\text{km})\,\frac{Q(\text{m}^3/\text{h})^2}{D(\text{mm})^5}}$$

$$h_f = 6395\cdot 10^6\cdot 0{,}02\cdot 46{,}5\,\frac{(300)^2}{(230{,}25)^5} = 827{,}12\ \text{m}$$

La presión en la estación “B” se calcula por la ecuación de Bernoulli, donde los términos de velocidad se anulan, por no haber modificación del caudal ni del diámetro de la tubería entre las dos estaciones. Y también se puede suponer nulo el término asociado a las bombas porque el ejercicio no indica nada de ellas.

$$\boxed{\frac{P_A(\text{kN/m}^2)}{\gamma(\text{kN/m}^3)} + \cancel{\frac{v_A{}^2(\text{m/s})^2}{2\cdot g\ (\text{m/s}^2)}} + Z_A(\text{m}) + \cancel{H_p\ (\text{m})} = \frac{P_B(\text{kN/m}^2)}{\gamma(\text{kN/m}^3)} + \cancel{\frac{v_B{}^2(\text{m/s})^2}{2\cdot g(\text{m/s}^2)}} + Z_B(\text{m}) + h_f(\text{m})}$$

0

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.4. SOLUCIÓN (III)

Teniendo en cuenta la ecuación anterior y los siguientes datos:

$$\gamma = \delta\ (kg/m^3) \cdot g(m/s^2) = 720 \cdot 9{,}81 = 7063{,}2\ N/m^2 = 7{,}06\ kN/m^2$$

$$P_A = 25\ kg/cm^2 \cdot \frac{98{,}07\ kN/m^2}{1\ kg/cm^2} = 2451{,}75\ kN/m^2$$

El valor de la presión en la estación "B" sería de:

$$P_B = P_A + \gamma(Z_A - Z_B - h_f) = 2451{,}75 + 7{,}06 \cdot (1050 - 600 - 827{,}12) = \boxed{-210{,}7\ kN/m^2 = 2{,}15\ kg/cm^2}$$

Según el resultado obtenido, la presión en la estación "B" es negativa, y esto no tiene sentido físico. Esta situación sugiere que a esta estación no llega la gasolina con suficiente presión, probablemente debido a elevadas pérdidas de presión por rozamiento.

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.4. SOLUCIÓN (IV)

b) Indicar si sería necesaria incluir alguna bomba y si es así, calcular su potencia teniendo en cuenta que el rendimiento es del 75% y que es necesario alcanzar una presión en la estación "B" de 0,18 kPa

Para que haya suficiente presión en esta estación sería necesario instalar una bomba. Y la potencia que debe tener esta bomba para alcanzar un presión en "B" de 0,18 kPa, se calcularía mediante la siguiente ecuación, donde la incógnita es el término H_p (m):

$$\boxed{P_h(\mathrm{CV})=\frac{\delta(\mathrm{kg/m^3})\cdot Q(\mathrm{m^3/h})\cdot H_p(\mathrm{m})}{75\cdot 3600\cdot \eta}}$$

EJERCICIOS DE DISEÑO DE OLEODUCTOS

EJERCICIO 2.4. SOLUCIÓN (V)

H_p (m) se calcula a través de la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{P_A(kN/m^2)}{\gamma(kN/m^3)}+\cancel{\frac{v_A{}^2(m/s)^2}{2\cdot g\,(m/s^2)}}+Z_A(m)+H_p\ (m)=\frac{P_B(kN/m^2)}{\gamma(kN/m^3)}+\cancel{\frac{v_B{}^2(m/s)^2}{2\cdot g(m/s^2)}}+Z_B(m)+H_f(h_f)\ (m)$$

$$P_A=0{,}18\ kg/cm^2\cdot\frac{98{,}07\ kN/m^2}{1\ kg/cm^2}=17{,}65\ kN/m^2$$

$$H_P=\left(\frac{P_B-P_A}{\gamma}\right)+Z_B+h_f-Z_A=\left(\frac{17{,}65-2451{,}75}{7{,}06}\right)+600+827{,}12-1050=32{,}32\ m$$

Una vez calculada H_p (m), el valor se sustituye en la ecuación de la potencia de la bomba y se calcula, obteniendo el siguiente valor:

$$P_h=\frac{720\cdot300\cdot32{,}32}{75\cdot3600\cdot0{,}75}=\boxed{34{,}5\ CV}$$