

Polytechnic University of Puerto Rico – Orlando Campus
ME 3140 – Intermediate Fluid Mechanics

Homework N-02

Instructor: Dr. Joaquín Valencia

Estudiante: Antonio Pérez

ID: 158655

Fecha de entrega: 09 de diciembre de 2025

Enunciado del problema

La opción de impulsor de 11.25 in del modelo Taco 4013 FI Series se utiliza para bombear agua a 25 °C desde un reservorio cuya superficie libre está a 4 ft sobre el centro de la entrada de la bomba. La línea de succión está formada por 10,5 ft de tubería de hierro fundido con diámetro interno de 4 in y rugosidad interna $\varepsilon = 0,02$ in.

Hay varias pérdidas menores: entrada con borde afilado ($K_L = 0,5$), tres codos lisos de 90° ($K_L = 0,3$ cada uno) y una válvula de globo totalmente abierta ($K_L = 6,0$).

- Calcule manualmente el **NPSH disponible** para $Q = 650$ gpm. ¿Ocurre cavitación?
- Estime el **caudal máximo** (en gpm) que puede bombearse sin cavitación.
- Si el agua estuviera a 65 °C, ¿el caudal máximo aumentaría o disminuiría? ¿Por qué?
- Discuta cómo podría aumentarse el caudal máximo mientras se evita la cavitación.

Curvas de rendimiento y NPSH requerido

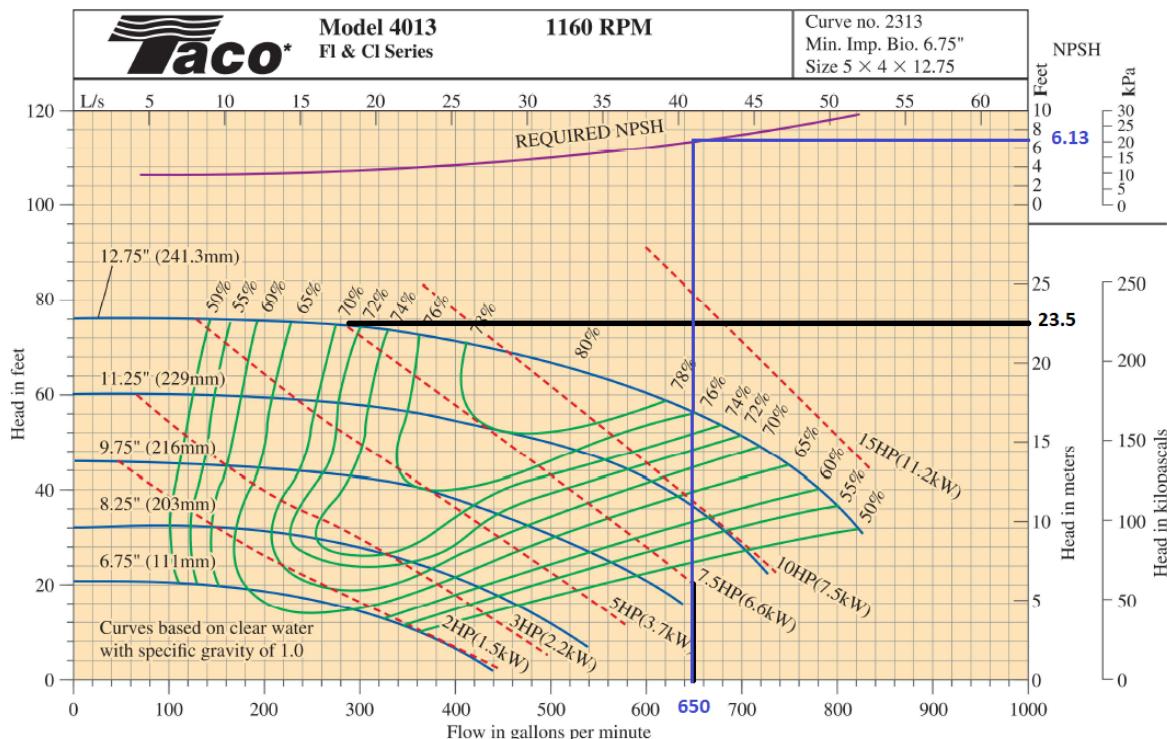


Figura 1: Curvas de rendimiento y NPSH requerido para la bomba Taco 4013 (impulsor 11.25 in, 1160 rpm). Se indican $Q = 650$ gpm, $NPSH_{req}$ y $NPSH_{avail}$.

Interpolación del NPSH requerido a $Q = 650$ gpm

El fabricante entrega una tabla de $NPSH_{req}$ en función del caudal:

Cuadro 1: NPSH requerido para el modelo 4013 (datos del fabricante).

Caudal (gpm)	$NPSH_{req}$ (ft)
79	2.85
159	2.94
238	3.11
317	3.38
396	3.82
476	4.34
555	5.04
634	5.92
713	6.97
793	8.20

Para $Q = 650$ gpm se interpola linealmente entre 634 y 713 gpm:

$$NPSH_{650} = NPSH_{634} + \frac{650 - 634}{713 - 634} (NPSH_{713} - NPSH_{634})$$

$$NPSH_{650} = 5,92 + \frac{16}{79}(6,97 - 5,92) = 5,92 + 0,21 = 6,13 \text{ ft}$$

$$NPSH_{req}(650 \text{ gpm}) \approx 6,13 \text{ ft}$$

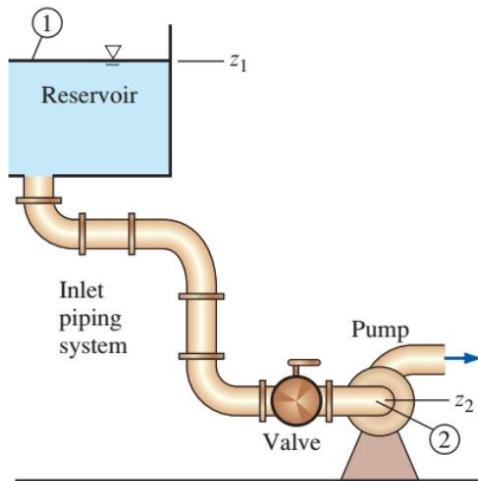


Figure 2. Inlet piping system from the reservoir (1) to the pump inlet (2).

Figura 2: Inlet piping system from the reservoir (1) to the pump inlet (2).

VARIABLES DE ENTRADA

Cuadro 2: Datos físicos y geométricos para el análisis del NPSH.

Variable	Valor	Descripción
D	4 in = 0.102 m	Diámetro interno de la tubería
L	10.5 ft = 3.20 m	Longitud de la línea de succión
ε	$0.02 \text{ in} = 5.08 \times 10^{-4} \text{ m}$	Rugosidad absoluta
z_1	4 ft = 1.219 m	Altura del reservorio sobre la bomba
Q	650 gpm	Caudal designado en (a)
ρ	997 kg/m ³	Densidad del agua a 25°C
μ	$0.891 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$	Viscosidad dinámica a 25°C
P_{atm}	$101,3 \times 10^3 \text{ Pa}$	Presión atmosférica
P_v (25°C)	$3,169 \times 10^3 \text{ Pa}$	Presión de vapor del agua
g	9.81 m/s ²	Aceleración de la gravedad
K_{in}	0.5	Entrada con borde afilado
K_{elbow}	0.3	Cada codo liso de 90°
N_{elbow}	3	Número de codos
K_{val}	6.0	Válvula de globo totalmente abierta
$\sum K_L$	7.4	Pérdidas menores totales

Ecuaciones

Cuadro 3: Ecuaciones de flujo interno y NPSH.

Ecuación	Descripción
$Q_{SI} = Q_{gpm} (6,309 \times 10^{-5})$	Conversión de caudal de gpm a m ³ /s.
$A = \frac{\pi D^2}{4}$	Área interna de la tubería.
$V = \frac{Q_{SI}}{A}$	Velocidad media en la tubería.
$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$	Número de Reynolds del flujo interno.
$\frac{\varepsilon}{D}$	Rugosidad relativa.
$f = f(Re, \varepsilon/D)$	Factor de fricción de Darcy–Weisbach (carta de Moody).
$h_L = \left[f \frac{L}{D} + \sum K_L \right] \frac{V^2}{2g}$	Pérdidas totales (mayores + menores) en la línea de succión.
$NPSH = \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z - \frac{P_v}{\rho g}$	Definición general de NPSH en una sección dada.
$NPSH_{avail} = \frac{P_{atm}}{\rho g} + z_1 + (1 - \alpha) \frac{V^2}{2g} - h_L - \frac{P_v}{\rho g}$	NPSH disponible en la entrada de la bomba (forma usada en clase para el tramo de succión).

Desarrollo

Parte (a) – Cálculo del NPSH disponible a 650 gpm

Paso 1. Conversión del caudal a unidades SI

$$Q_{SI} = 650(6,309 \times 10^{-5}) = 4,10 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$$

Paso 2. Área interna de la tubería

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0,102)^2}{4} = 8,17 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Paso 3. Velocidad media del agua

$$V = \frac{Q_{SI}}{A} = \frac{4,10 \times 10^{-2}}{8,17 \times 10^{-3}} = 3,085 \text{ m/s}$$

Paso 4. Número de Reynolds

$$\text{Re} = \frac{(997)(3,085)(0,102)}{0,891 \times 10^{-3}} = 3,52 \times 10^5 \Rightarrow \text{flujo turbulento}$$

Paso 5. Rugosidad relativa y factor de fricción

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{5,08 \times 10^{-4}}{0,102} \approx 0,005$$

Con $\text{Re} = 3,5 \times 10^5$ y $\varepsilon/D \approx 0,005$, de la carta de Moody se obtiene:

$$f \approx 0,025$$

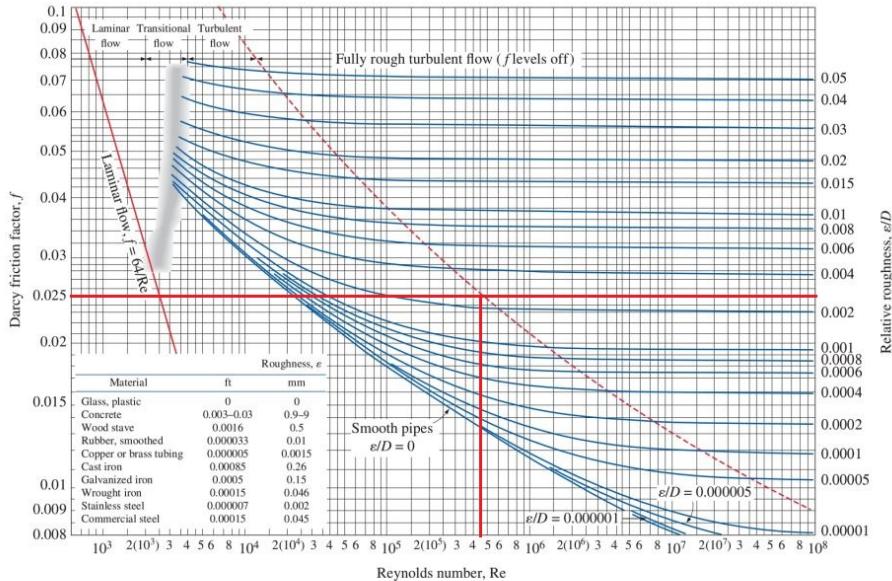


Figure 3. Moody Chart

Figura 3: Pump Performance Curves.

Paso 6. Pérdidas en la línea de succión

$$\frac{L}{D} = \frac{3,20}{0,102} = 31,4$$

$$h_L = \left[f \frac{L}{D} + \sum K_L \right] \frac{V^2}{2g} = [0,025(31,4) + 7,4] \frac{3,085^2}{2(9,81)}$$

$$h_L = (0,785 + 7,4) (0,485) \approx 3,97 \text{ m}$$

Paso 7. Cálculo del NPSH disponible

Usamos la forma de la ecuación de energía entre la superficie libre del reservorio (1) y la entrada de la bomba (2), con $P_1 = P_{atm}$, $P_2 \approx P_{atm}$, $z_1 = 1,219$ m, $z_2 \approx 0$ y velocidad despreciable en la superficie libre; se llega a:

$$NPSH_{avail} = \frac{P_{atm}}{\rho g} + \frac{V^2}{2g}(1 - \alpha) + z_1 - h_L - \frac{P_v}{\rho g}$$

Tomando $\alpha \approx 1,05$ para flujo turbulento uniforme:

$$\frac{P_{atm}}{\rho g} = \frac{101,3 \times 10^3}{(997)(9,81)} = 10,36 \text{ m}$$

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{3,085^2}{2(9,81)} = 0,485 \text{ m} \Rightarrow (1 - \alpha) \frac{V^2}{2g} \approx -0,05(0,485) = -0,024 \text{ m}$$

$$\frac{P_v}{\rho g} = \frac{3,169 \times 10^3}{(997)(9,81)} = 0,324 \text{ m}$$

Finalmente:

$$NPSH_{avail} = 10,36 - 0,024 + 1,219 - 3,97 - 0,324 = 7,26 \text{ m}$$

Conversión a pies: $7,26 \text{ m} \times 3,281 = 23,8 \text{ ft}$

$$NPSH_{avail}(650 \text{ gpm}) \approx 7,26 \text{ m} = 23,8 \text{ ft}$$

Comparación con el valor requerido

De la interpolación anterior:

$$NPSH_{req}(650 \text{ gpm}) \approx 6,13 \text{ ft}$$

$$NPSH_{avail} - NPSH_{req} \approx 23,8 - 6,13 \approx 17,7 \text{ ft} > 0$$

Con este margen, **no se presenta cavitación** a $Q=650$ gpm.

Parte (b) – Caudal máximo sin cavitación

El NPSH disponible de la instalación es prácticamente constante:

$$NPSH_{avail} \approx 23,8 \text{ ft}$$

La tabla del fabricante muestra que, aun para el caudal más alto listado ($Q = 793$ gpm):

$$NPSH_{req}(793 \text{ gpm}) = 8,20 \text{ ft}$$

$$23,8 \text{ ft} - 8,2 \text{ ft} \approx 15,6 \text{ ft} \Rightarrow NPSH_{avail} \gg NPSH_{req}$$

Por lo tanto, la **limitación real ya no viene del NPSH**, sino de la curva de head de la bomba (altura que la bomba puede suministrar para vencer las pérdidas del sistema). En la gráfica del fabricante, el rango típico de operación de esta bomba con este impulsor está por debajo de $Q \approx 900$ gpm.

$Q_{\text{máx, sin cavitación}} \approx 900$ gpm, es decir, *en todo el rango normal de operación la bomba no cava*.

Parte (c) – Efecto del aumento de temperatura

Si la temperatura del agua aumenta a 65°C :

$$T \uparrow \Rightarrow P_v \uparrow$$

En la expresión del NPSH disponible:

$$NPSH_{avail} = \frac{P_{atm}}{\rho g} + z_1 - h_L - \frac{P_v}{\rho g} + \dots$$

un incremento de P_v implica que el término $\frac{P_v}{\rho g}$ aumenta y, por tanto, el NPSH disponible disminuye.

Parte (d) – Cómo aumentar el caudal máximo evitando cavitación

A partir de la forma general:

$$NPSH_{avail} = \frac{P_{atm}}{\rho g} + z_1 - h_L - \frac{P_v}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} (1 - \alpha)$$

las estrategias para aumentar el NPSH disponible y, por ende, el caudal máximo libre de cavitación son:

- **Aumentar z_1 :** bajar físicamente la bomba para que esté más cerca del nivel del reservorio (mayor carga estática disponible).
- **Aumentar la presión absoluta en el tanque de succión** (operar el reservorio ligeramente presurizado en lugar de a presión atmosférica).
- **Reducir las pérdidas h_L :** usar tubería de mayor diámetro, minimizar el número de codos, sustituir la válvula de globo por una válvula de menor pérdida, y elegir materiales más lisos.
- **Disminuir la temperatura del líquido** o mantenerlo lo más frío posible, de manera que la presión de vapor P_v sea menor.

En resumen: para aumentar el caudal máximo se debe elevar la presión absoluta en succión y/o reducir las pérdidas en la línea de succión.