Universidad de los Andes
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Caso 2
Infraestructura en recursos hídricos
Proyecto de Infraestructura Hidráulica

Profesor:
Oscar Loyola

Alumnos:
Bernardo Caprile Canala-Echevarría
Pedro Valenzuela Béjares
Francisco Zegers

18 de noviembre de 2025

Resumen Ejecutivo

Índice

Introducción

1. Marco Teórico

El diseño del sistema de impulsión para el transporte de agua recuperada desde el Tranque Ovejería hacia la Planta de Procesos requiere la aplicación integrada de principios de mecánica de fluidos, diseño de tuberías, selección de equipos de impulsión y normas de ingeniería como ASME B31.4. A continuación, se presenta el marco teórico utilizado para el modelamiento hidráulico y estructural del sistema.

1.1. Caudal y Velocidad de Flujo

El caudal total requerido para el sistema es:

$$Q = 0{,}8 \text{ m}^3/\text{s}$$

La velocidad media en una tubería de diámetro D se determina mediante:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

donde A es el área transversal de la tubería.

1.2. Número de Reynolds

El régimen de flujo se caracteriza con el Número de Reynolds:

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

donde:

- V: velocidad media del fluido,
- ν: viscosidad cinemática del agua.

1.3. Factor de Fricción de Swamee–Jain

Para flujo turbulento, el factor de fricción de Darcy–Weisbach se obtiene con la ecuación explícita de Swamee–Jain:

$$f = \frac{0{,}25}{\left[\log_{10}\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7D} + \frac{5{,}74}{Re^{0{,}9}}\right)\right]^2}$$

donde:

- ε: rugosidad absoluta interna de la tubería,
- D: diámetro interno,
- Re: número de Reynolds.

1.4. Pérdidas por Fricción en Tuberías

Las pérdidas por fricción de Darcy–Weisbach se determinan mediante:

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

donde:

- L: longitud del tramo,
- g: aceleración de gravedad.

Las pérdidas menores se modelan como:

$$h_m = K\frac{V^2}{2g}$$

donde K es el coeficiente equivalente de pérdidas locales.

1.5. Head Total Requerido (TDH)

El head dinámico total requerido para vencer desnivel y pérdidas es:

$$H_{\text{total}} = H_{\text{estático}} + \sum h_f + \sum h_m$$

donde:

$$H_{\text{estático}} = z_{\text{final}} - z_{\text{inicial}}$$

1.6. Curva Característica de la Bomba

Cada bomba multietapa modelo Goulds 3600 presenta curvas digitizadas de:

$$H(Q), \qquad \eta(Q), \qquad P(Q)$$

Estas curvas se interpolaron linealmente entre puntos obtenidos del catálogo.

El head proporcionado por N bombas en serie es:

$$H_{\text{serie}} = N_{\text{est}}\, H_b$$

y el caudal por bomba operando en paralelo:

$$Q_b = \frac{Q_{\text{total}}}{N_{\text{par}}}$$

La potencia total instalada:

$$P_{\text{total}} = N_{\text{par}}\, N_{\text{est}}\, P_b$$

1.7. Cálculo de NPSHr y NPSHa

El NPSH requerido proviene del catálogo:

$$NPSH_r = f(Q)$$

El NPSH disponible en succión se calcula como:

$$NPSH_a = \frac{p_{\text{atm}}}{\rho g} + z_s - h_f - \frac{p_v}{\rho g}$$

donde:

- p_{atm}: presión atmosférica,
- p_v: presión de vapor,
- z_s: cota del nivel libre del estanque.

La condición para evitar cavitación es:

$$NPSH_a > NPSH_r$$

1.8. Golpe de Ariete (Estimación Simplificada)

Para un cierre rápido de válvula, la sobrepresión estimada:

$$\Delta P = \rho a \Delta V$$

donde:

- a: velocidad de propagación de onda (acero),
- ΔV: cambio instantáneo en la velocidad.

El head equivalente del golpe de ariete:

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\rho g}$$

1.9. Espesor Mínimo según ASME B31.4 (API 5L X65)

El esfuerzo circunferencial (hoop stress) para tuberías sometidas a presión interna:

$$\sigma_h = \frac{PD}{2t}$$

La norma ASME B31.4 establece que:

$$\sigma_h \leq F_1 S_y$$

por lo tanto, el espesor requerido es:

$$t_{\text{req}} = \frac{PD}{2F_1 S_y}$$

donde:

- P: presión interna,
- D: diámetro exterior,
- S_y: límite de fluencia del acero X65,
- F_1: factor de diseño (0.72 para oleoductos).

La utilización de espesor:

$$U_t = \frac{t_{\text{req}}}{t_{\text{adoptado}}}$$

Y la utilización de esfuerzo:

$$U_\sigma = \frac{\sigma_h}{F_1 S_y}$$

1.10. Dimensionamiento de Estanques de Amortiguación

El volumen requerido para un tiempo de autonomía T:

$$V = Q\,T$$

Asumiendo estanques cilíndricos verticales:

$$V = \pi \frac{D_t^2}{4} H_t$$

y despejando diámetro:

$$D_t = \sqrt{\frac{4V}{\pi H_t}}$$

donde H_t es la altura útil adoptada del estanque.

1.11. Línea de Energía (EGL) y Línea Piezo–métrica (HGL)

En cada punto:

$$E = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g}$$

La línea de energía se construye acumulando head estático y pérdidas.

Las estaciones de bombeo agregan head discreto:

$$E_{\text{post-bomba}} = E_{\text{pre-bomba}} + H_b$$

1.12. Interpolación de Curvas del Fabricante

Para cada parámetro $y = H, \eta, P$, se utilizó interpolación lineal:

$$y(Q) = y_i + (y_{i+1} - y_i)\frac{Q - Q_i}{Q_{i+1} - Q_i}$$

con extrapolación lineal controlada fuera de rango.

1.13. Selección Óptima de Bombas

Se minimiza:

$$P_{\text{total}}(N_{\text{par}}, N_{\text{est}})$$

sujeto a:

$$N_{\text{est}} H_b \geq H_{\text{total}}$$

y

$$Q_{\min} \leq Q_b \leq Q_{\max}$$

obtenidos de la curva de la bomba.