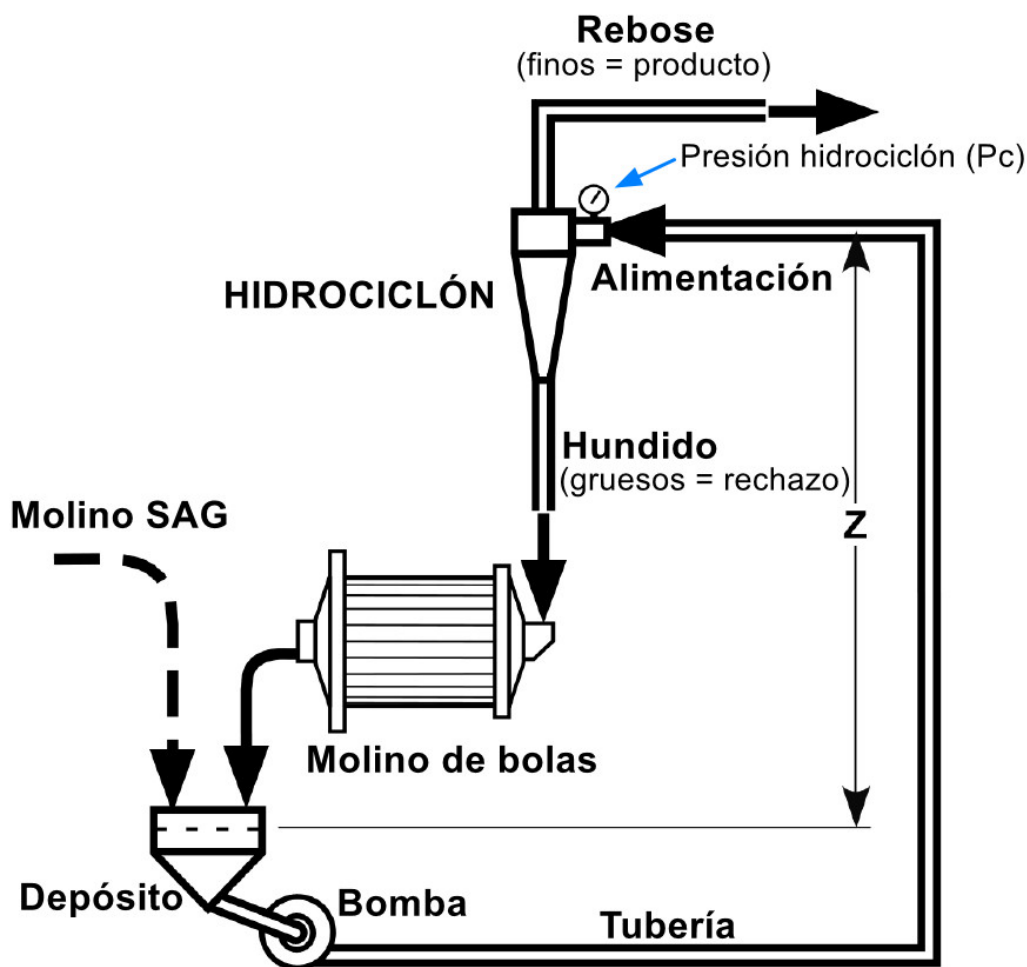
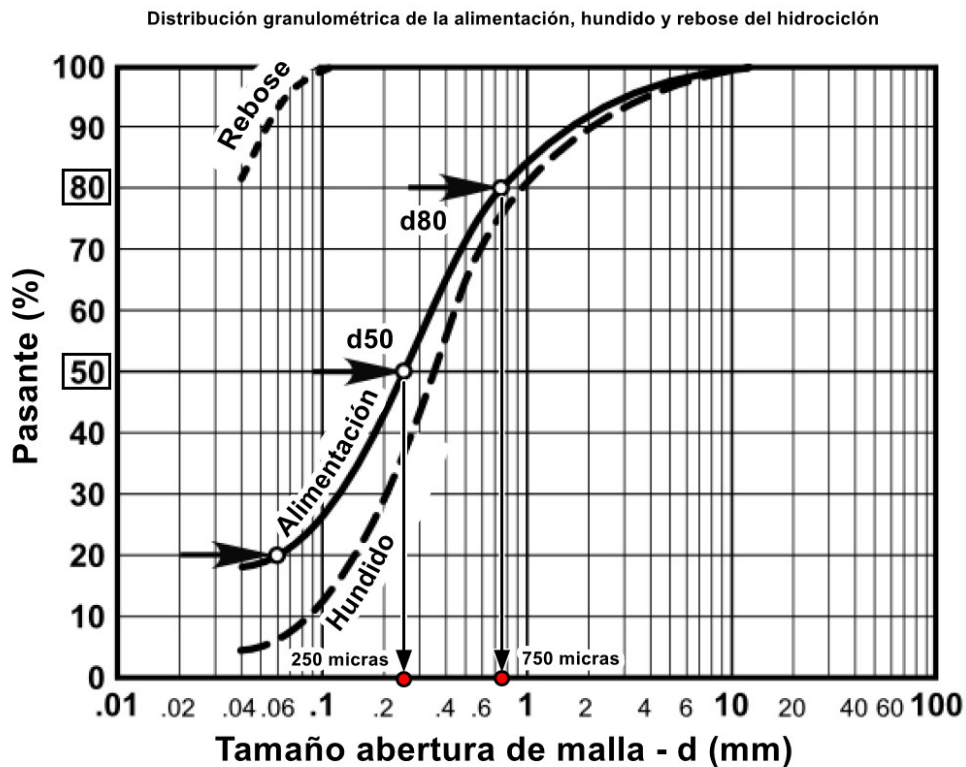


EJERCICIO SOBRE TRANSPORTE HIDRÁULICO

1. Se tiene una planta de procesamiento de mineral de cobre compuesta por un molino SAG y un molino de bolas que mediante bombeo alimentan un hidrociclón, tal y como representa el esquema de flujo adjunto de la planta. El producto del hidrociclón es enviado a la siguiente etapa de concentración mineral por flotación (finos), mientras que las partículas superiores a 10 mm (gruesos) son renviadas, como hundido, al molino de bolas para su molienda, nuevamente. El caudal de alimentación de pulpa al hidrociclón es 61.7 l/s , la concentración de sólidos en peso (C_w) es del 40%, y la concentración de sólidos en volumen (C_v) es del 19%. La presión de entrada en el hidrociclón es de 65 kPa. Por otro lado, se sabe que la altura estática (Z) es de 16 metros, el diámetro interno (D) de la tubería es de 150 mm y la longitud equivalente total de tubería (L) es de 30 metros (Nota: aquí ya se tienen en cuenta las pérdidas de carga por fricción de codos, accesorios, válvulas, etc.). Calcular el TDH requerido para la bomba en metros de columna de agua (m.c.a.), y la potencia absorbida teórica (kW). Emplea el ábaco de Warman para la obtención del coeficiente de fricción de Darcy, f .





Nota:

- Densidad específica (S.G.) del cobre = 2.85
- Densidad específica (S.G.) de la pulpa = 1.35
- Rugosidad relativa (ϵ/D) = 2.8×10^{-4}
- Emplear el diagrama de Warman para el cálculo del factor de fricción de Darcy (f)
- Considerar una viscosidad del agua igual a $0.001 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
- Considerar una eficiencia de la bomba del 75%
- Considerar una eficiencia del motor del 80%

Solución:

1. Caudal de bombeo.

El caudal de pulpa a bombear hacia la entrada del hidrociclón es de 61.7 l/s de pulpa que equivale a $222.12 \text{ m}^3/\text{h}$ o $0.0617 \text{ m}^3/\text{s}$ de pulpa.

2. Altura estática, H_g .

El desnivel geométrico (Z) que la pulpa debe de superar son 16 metros, es decir, $H_g = 16$ metros.

3. Velocidad del flujo de pulpa.

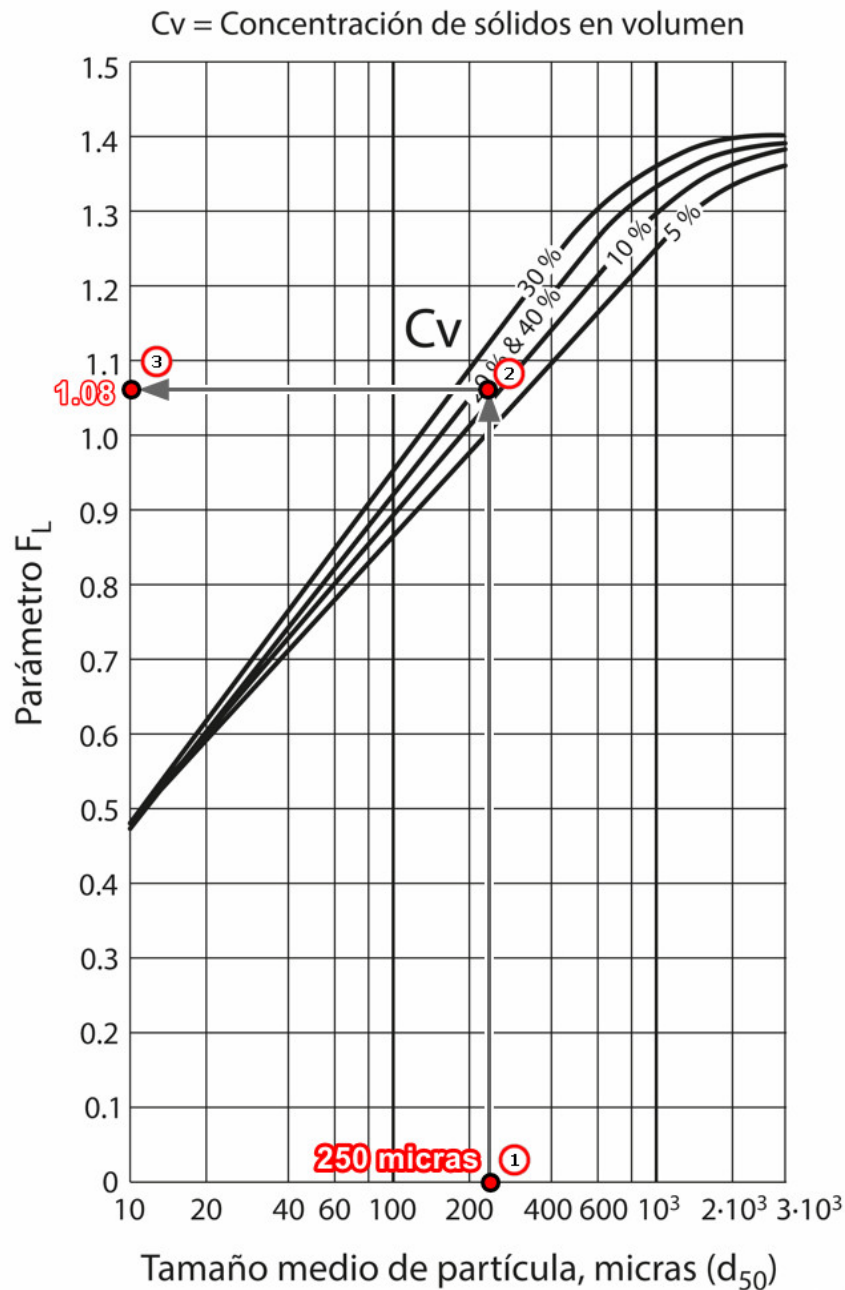
La velocidad de flujo de pulpa se obtiene con la siguiente expresión:

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi \times \frac{D^2}{4}} = \frac{0.0617 \text{ m}^3/\text{s}}{3.1415 \times \frac{(0.150 \text{ m})^2}{4}} = 3.49 \text{ m/s} \quad (1)$$

4. Velocidad límite o crítica.

La velocidad límite se calcula con la expresión de Durand:

$$V_L = F_L \times \sqrt{2 \times g \times D \times \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}} \quad (2)$$



Para una concentración de sólidos en volumen (C_v) del 19% y un d_{50} igual a 250 micras, el parámetro de Durand, F_L , presenta un valor de aproximadamente 1.08, obtenido con la anterior gráfica.

Por lo tanto, con el parámetro de Durand calculado, la velocidad límite valdrá:

$$V_L = 1.08 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.150 \times \frac{2.85 - 1.0}{1.0}} = 2.52 \text{ m/s} \quad (3)$$

Como la velocidad del flujo de pulpa es de 3.49 m/s, superior a la velocidad crítica por debajo de la cual tiene lugar la sedimentación de las partículas sólidas, entonces dicha velocidad es adecuada.

5. Cálculo de la viscosidad dinámica y viscosidad cinemática.

La viscosidad dinámica o absoluta, según la siguiente expresión, vale:

$$\mu = \mu_{agua} \times \left(1 + 2.5 \times C_v + 10.05 \times C_v^2 + 0.000273 \times e^{16.6 \times C_v} \right) \quad (4)$$

$$\mu = 0.001 \times \left(1 + 2.5 \times 0.19 + 10.05 \times 0.19^2 + 0.000273 \times e^{16.6 \times 0.19} \right) = 0.00184 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2 \quad (5)$$

La viscosidad cinemática valdrá:

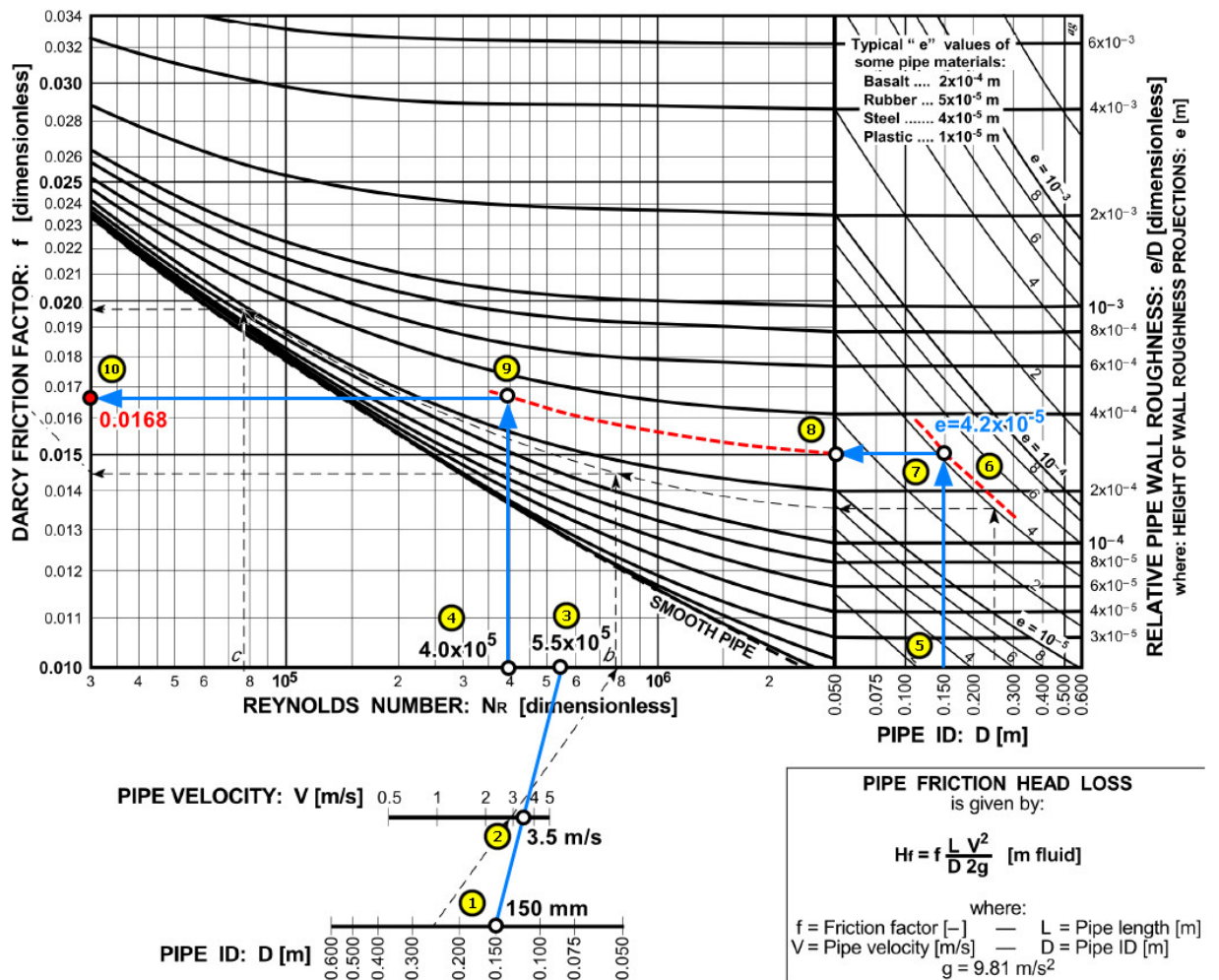
$$\mu_{cinematica} = \frac{\mu}{\rho_p} = \frac{0.00184 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2}{1350 \text{ kg}/\text{m}^3} = 1.36 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 1.36 \text{ cSt} \quad (6)$$

6. Obtención del factor de fricción de Darcy, f .

Ahora se empleará el ábaco de Warman (Warman, 2000), considerando una rugosidad relativa de 0.00028 ($e = 4.2 \times 10^{-5}$). Al número de Reynolds obtenido (5.5×10^5) se le debe dividir por la viscosidad cinemática anteriormente calculada (1.36 cSt), dando 4.0×10^5 , que es el que valor con el que hay que entrar ahora. El resto de los pasos se facilitan en la figura adjunta y que llevan a la obtención de un factor de fricción de Darcy, f , de 0.0168 (ver diagrama adjunto).

Con el factor de fricción de Darcy, podemos calcular las pérdidas de carga debidas a la fricción en la longitud equivalente de tubería (30 metros):

$$H_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2 \times g} = 0.0168 \times \frac{30}{0.150} \times \frac{3.49^2}{2 \times 9.81} = 2.09 \text{ m.c.l.} \quad (7)$$



7. Altura de carga debida a la velocidad del flujo de pulpa, H_v .

Se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$H_v = \frac{V^2}{2 \times g} = \frac{3.49^2}{2 \times 9.81} = 0.62 \text{ m.c.l.} \quad (8)$$

8. Altura de carga debida a la presión requerida en el hidrociclón, H_p .

El hidrociclón requiere una presión de trabajo en la entrada de alimentación de 65 kPa que equivalen a 0.65 bares y en metros de columna de pulpa (m.c.l.) será:

$$H_p = \frac{n^\circ \text{ bares} \times 10.2}{\rho_p} = \frac{0.65 \times 10.2}{1.35} = 4.91 \text{ m.c.l.} \quad (9)$$

9. Obtención de la altura manométrica total de la bomba, TDH_{pulp} .

Con las alturas anteriormente calculadas, el valor de TDH_{pulp} será:

$$TDH_{pulp} = H_g + H_f + H_v + H_p = 16 + 2.09 + 0.62 + 4.91 = 23.62 \text{ m.c.l.} \quad (10)$$

10. Corrección de TDH_{pulp} a TDH_{agua} .

Para entrar en los catálogos de curvas características Q-H de funcionamiento de una bomba, para poder decidir su selección, y que los fabricantes proporcionan, es necesario entrar con la altura manométrica total (TDH_{agua}), en términos de altura de columna de agua (m.c.a.), ya que los ensayos de funcionamiento se hacen con agua, para ello, el valor de corrección HR que nos permite de pasar de una TDH_{pulp} a una TDH_{agua} se obtiene con la siguiente gráfica, y cuyo valor de HR es aproximadamente 0.83:

Por lo tanto:

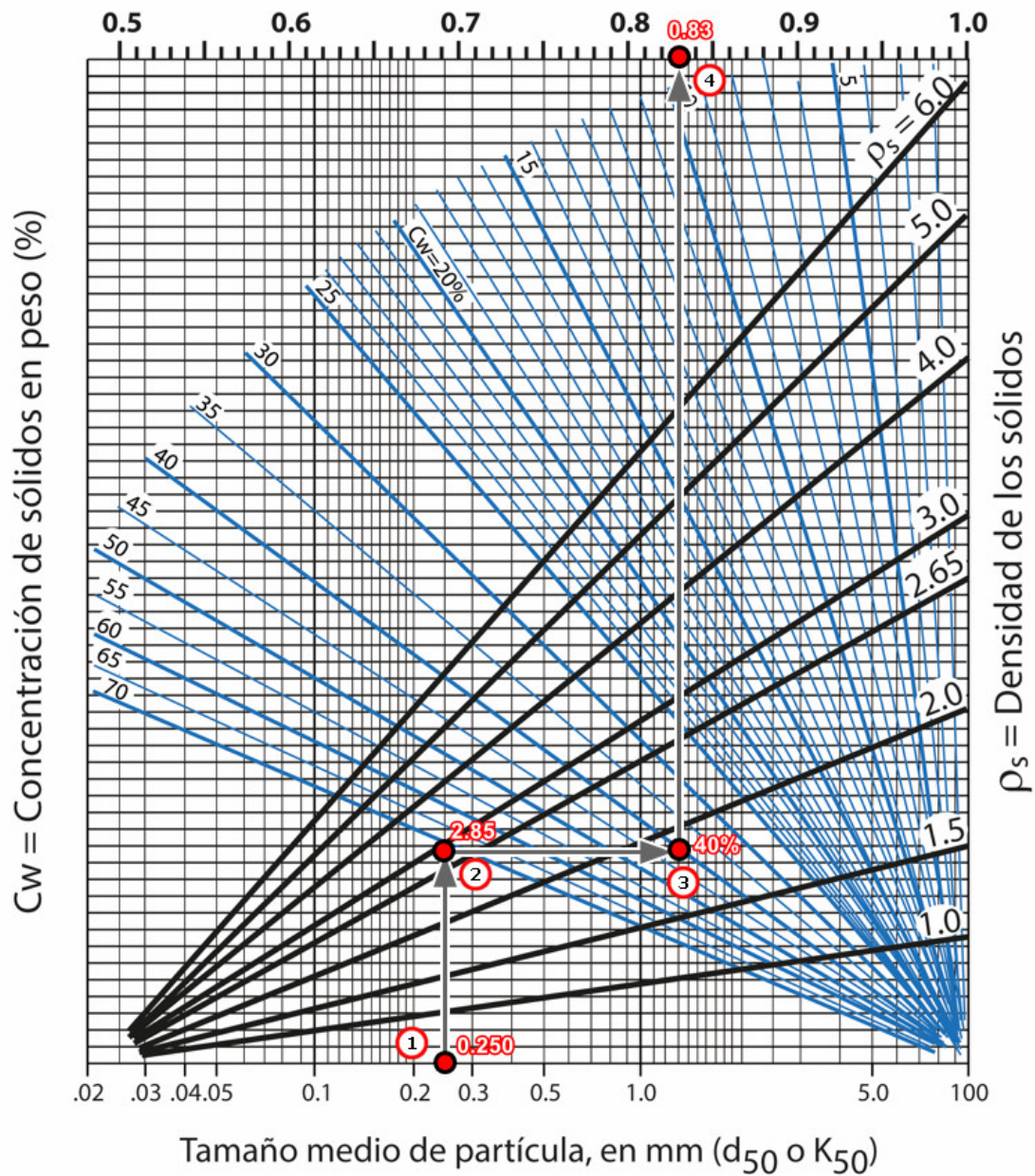
$$HR = 0.83 = \frac{TDH_{pulp}}{TDH_{agua}} = \frac{23.62}{TDH_{agua}} \Rightarrow TDH_{agua} = 28.45 \text{ m.c.a.} \quad (11)$$

11. Cálculo de la potencia absorbida teórica.

Para una eficiencia de la bomba del 75%, y una eficiencia del motor del 80% debido a pérdidas de eficiencia en ejes, rodamientos, etc., se tiene que la potencia absorbida teórica de nuestra bomba de diseño valdrá, en kW:

$$N_{kW} = \frac{Q \cdot H_t \cdot \rho_p}{360 \cdot 0.75 \cdot 0.80} = \frac{222.12 \cdot 28.45 \cdot 1.35}{360 \cdot 0.75 \cdot 0.80} = 39.50 \text{ kW} \quad (12)$$

$$HR = \frac{TDH_{pulpa}}{TDH_{agua}} \quad ER = \frac{Eficiencia_{pulpa}}{Eficiencia_{agua}}$$



PMP2022