

4. Resultados y Discusiones.

Cálculo del área de concentración por orden.

Como se mencionó anteriormente para el cálculo del A_{CO} se sustituyen los datos de la tabla 7 en la ecuación 1-20 y al sustituir para la concentración $Fe[5] H_2O_2 [140] + sol$ se obtiene lo siguiente:

$$A_{CO} = \frac{(0.010445)(294.7)(2)}{(0.000069) \log(6250 / 194.375)} = 59195.29 \text{ m}^2 / \text{m}^3 - \text{orden}$$

Después sustituyendo los datos en la tabla 8, para la segunda concentración $Fe[10] H_2O_2 [280] + sol$ se obtiene lo siguiente:

$$A_{CO} = \frac{(0.010445)(339.92)(2)}{(0.000069) \log(6250 / 1)} = 27111.50 \text{ m}^2 / \text{m}^3 - \text{orden}$$

Cálculo del área de concentración necesaria para un volumen específico.

Para este cálculo se acordó utilizar un volumen de 1m^3 de agua junto con el 35% de $1100\text{W}/\text{m}^2$ para la radiación solar, lo que arroja un resultado de $385\text{W}/\text{m}^2$ (Chacón et al, 2006). Conservando el A_{CO} encontrado en los cálculos anteriores como una constante y sustituyendo en la fórmula 3-1 los datos de la tabla 9, correspondientes a la primera concentración $Fe[5] H_2O_2 [140] + sol$ se obtiene lo siguiente:

$$A = \frac{(59195.29)(1 \cdot \log(6250 / 194.375))}{(385)(9)} = 25.74\text{m}^2$$

Después sustituyendo los datos de la tabla 10 en la ecuación 3-1, para la segunda concentración $Fe[10] H_2O_2 [280] + sol$ se obtiene lo siguiente:

$$A = \frac{(27111.5)(1 \cdot \log(6250 / 1))}{(385)(9)} = 29.70\text{m}^2$$

Cálculo del número de concentradores necesarios para tratar un volumen de agua específico.

Se sabe que un concentrador tiene un área de radiación de $A=0.079\text{m}^2$ y conociendo las áreas de concentración necesarias para tratar el volumen deseado para cada concentración se sustituyen dichos valores en la ecuación 3-2. Con la concentración de $Fe[5] H_2O_2 [140] + sol$ se obtuvo un área de 25.74m^2 por lo que al sustituirlo la operación a realizar es la siguiente:

$$\#Concentradores = \frac{(25.74)(1)}{0.079796} = 322.68u$$

En cambio con la concentración de $Fe[10] H_2O_2 [280] + sol$ obtuvimos un área de 133.652m^2 por lo que la operación a realizar es la siguiente:

$$\#Concentradores = \frac{(29.7)(1)}{0.079796} = 372.20u$$

Estos concentradores se acomodarán en lotes de 25 concentradores cada uno. La forma de calcular en número de lotes es dividiendo el número de concentradores entre 25 y redondeando a la cifra mas alta para dejar concentradores exactos.

Con la concentración de $Fe[5] H_2O_2 [140] + sol$ se obtuvo un número de concentradores de 322.68 por lo que al sustituirlo la operación a realizar es la siguiente:

$$\#lotes = \frac{322.68}{25} = 12.907 = 13lotes$$

Después sustituyendo los 372.20 concentradores que dan como resultado para la segunda concentración $Fe[10] H_2O_2 [280] + sol$, se obtiene lo siguiente:

$$\#lotes = \frac{372.20}{25} = 14.88 = 15lotes$$

Después de analizar los distintos modelos de conexión entre lotes de concentradores se decidió utilizar el modelo de la figura 8 debido a que, por su configuración, el recorrido del agua se completa en el tiempo necesario para su tratamiento.

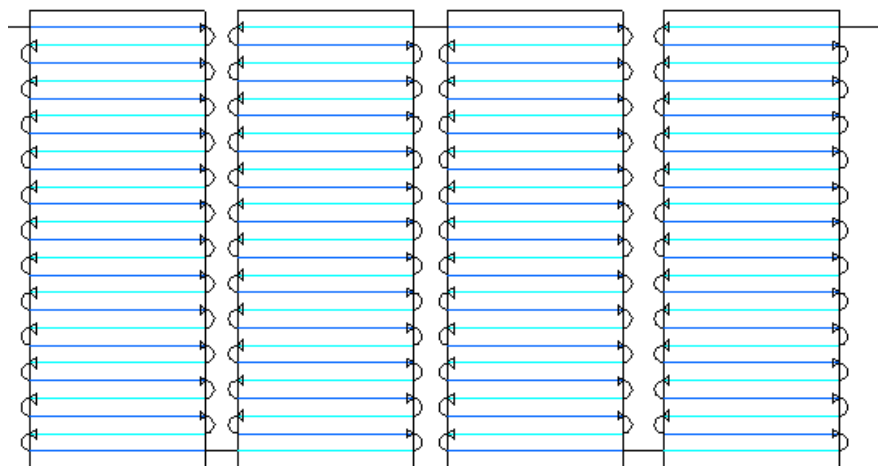


Figura 7. Lotes individuales conectados en serie.

Lo siguiente es calcular la distancia que recorre el flujo en toda la planta piloto, esto es la distancia que ocupan los concentradores, más la distancia que se recorre en los cambios de dirección, el segmento de tubería a la entrada y a la salida de cada lote y las conexiones entre lote y lote. Las siguientes distancias son las propuestas en un lote.

Dist. En cambios de dirección = 7.92 m

Dist. En la entrada y la salida = 0.18 m

Dist. En conexiones = 0.1 m

Después de sumar las distancias recorridas en todos los lotes obtenemos que debido al número de lotes para la concentración $Fe[10] H_2O_2 [280] + sol$ el agua recorre una distancia de 428.43 m y para la concentración $Fe[10] H_2O_2 [280] + sol$ el agua recorre una distancia de 494.18 m.

Cálculo de la velocidad para un Q = 1L/s.

Se comienza por despejar la velocidad de la ecuación 3-3.

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \times V \quad \rightarrow \quad V = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$$

Después se sustituye el diámetro de la tubería (0.0254m) y el gasto acordado (0.001 m³/s), para realizar la siguiente operación:

$$V = \frac{(4)(0.001)}{\pi(0.0254)^2} = 1.97\text{m/s}$$

Cálculo de número de Reynolds.

Se sustituyen los valores de densidad (ρ) = 998 kg/m³ y viscosidad (μ) = 0.001 Pa*s, que son los valores del agua a 20°C, junto con la velocidad y el diámetro de la tubería en la ecuación 1-27 y obtenemos el siguiente resultado.

$$\text{Re} = \frac{(998)(1.97)(0.0254)}{0.001} = 50027.3$$

Cálculo de la rugosidad relativa.

Ya se conocen los materiales con los que se construirá la planta y a pesar de que el sistema hidráulico tiene conexiones de PVC, para usos prácticos no se tomarán en cuenta, se considerará como si todo el recorrido se realizara en vidrio y el valor de la rugosidad del vidrio debido a su poca aspereza se considera cero. Por lo tanto usando la ecuación 1-28 la operación se realiza de la siguiente manera:

$$RR = \frac{0}{0.0254} = 0$$

El cero que da como resultado significa que la tubería de vidrio tiene una rugosidad prácticamente nula y por ello se considera lisa (smooth) para cálculos hidráulicos.

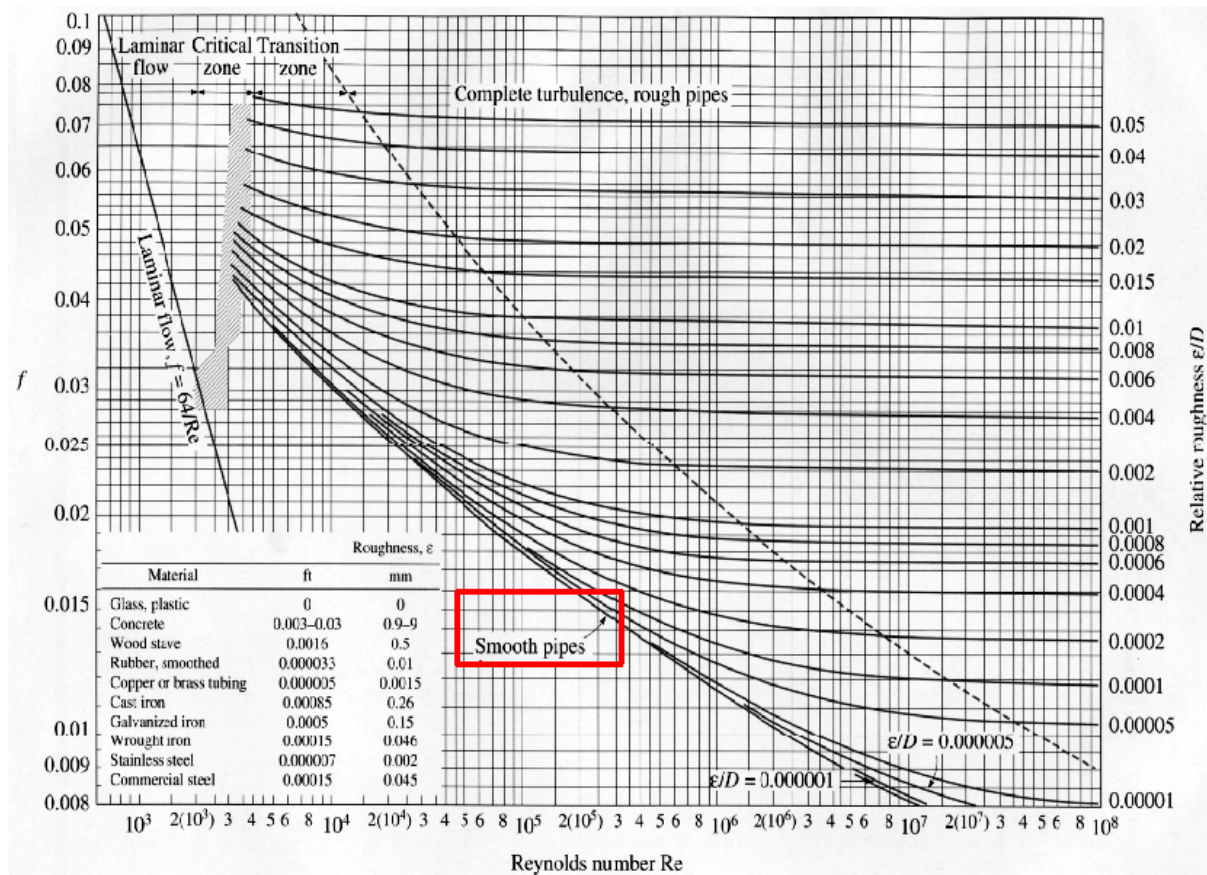


Figura 12. Diagrama de Moody resaltando las líneas de tuberías hidráulicamente lisas (Moody, 2008).

Hasta ahora los resultados anteriores son los mismos para las dos concentraciones, sin embargo para calcular h_f y h_k se necesita la distancia a recorrer y como son distancias diferentes las pérdidas cambiarán.

Entrando a la gráfica con número de Reynolds igual a 50027.3 y una rugosidad relativa de 0, se tiene que el coeficiente de fricción es $f = 0.021$. Después se sustituyen las variables en la ecuación 1-25 para las dos concentraciones y se obtiene lo siguiente:

Para la concentración $Fe[5] H_2O_2 [140] + sol$:

$$hf = 0.021 \left(\frac{428.43}{0.0254} \right) \frac{(1.973)^2}{2(9.81)} = 70.31m$$

Para la concentración $Fe[10] H_2O_2 [280] + sol$:

$$hf = 0.021 \left(\frac{494.18}{0.0254} \right) \frac{(1.973)^2}{2(9.81)} = 81.10m$$

Una vez que se tienen las pérdidas por fricción se continúa a calcular las pérdidas menores utilizando la ecuación 1-26. Para este cálculo fue necesario contar contracciones, expansiones y codos de 90° que estuvieran en el recorrido hidráulico ya que el total de cada uno se debe de multiplicar por un factor y después sumarlos todos. A la suma se le añade el factor de entrada y el de salida para encontrar el valor de la sumatoria (Σk). Los datos para el cálculo de las pérdidas menores para la concentración $Fe[5] H_2O_2 [140] + sol$ se muestran en la tabla 11 y los datos para la concentración $Fe[10] H_2O_2 [280] + sol$ se muestran en la tabla 12.

Tabla 11. Datos para el cálculo de las pérdidas menores para $Fe[5] H_2O_2 [140] + sol$.

k de entrada	0.5	Entrada	1
k de salida	0.5	Salida	1
k de contracción	0.25	Contracciones	0
k de expansión	0.25	Expansiones	0
k de Codos de 90°	0.3	Codos de 90°	619.5642542
		Σ de k's =	186.869276

(Elaboración propia)

Y al sustituir los valores en la fórmula de h_k se obtiene lo siguiente:

$$h_k = 186.86 \left(\frac{(1.973)^2}{2(9.81)} \right) = 37.09m$$

Tabla 12. Datos para el cálculo de las pérdidas menores para Fe[10] H₂O₂ [280] + sol.

k de entrada	0.5	Entrada	1
k de salida	0.5	Salida	1
k de contracción	0.25	Contracciones	0
k de expansión	0.25	Expansiones	0
k de Codos de 90°	0.3	Codos de 90°	714.6327835
		Σ de k's =	215.389835

(Elaboración propia)

Y al sustituir los valores en la fórmula h_k se encontró lo siguiente:

$$h_k = 215.38 \left(\frac{(1.973)^2}{2(9.81)} \right) = 42.75m$$

Ya que se tienen las dos pérdidas (h_f y h_L) se suman y se obtiene el término h_L :

Para la concentración Fe[5] H₂O₂ [140] + sol se tiene:

$$h_L = 70.31 + 37.095 = 107.41m$$

Para la concentración Fe[10] H₂O₂ [280] + sol se tiene:

$$h_L = 81.10 + 42.75 = 123.86m$$

Cálculo de la potencia de la bomba.

Para realizar los cálculos de las dos concentraciones se asumió una eficiencia del 70% para la bomba lo cual nos asegurará que aunque la bomba funcione al 70% de su eficiencia la planta seguirá trabajando al 100%. La altura de entrada con respecto a la de la salida tiene una diferencia de 1.1124m esto se debe a que la

planta se encuentra inclinada 18°, el promedio de latitud en México (INEGI, 2008), para poder captar la mayor cantidad de radiación solar.

Para realizar los cálculos se debe despejar el término H_b de la ecuación 3-5 y sustituirlo en la ecuación de Bernoulli para tuberías con una bomba (3-4) y se obtiene lo siguiente:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + \frac{P}{\eta\gamma Q} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

Después se despeja la potencia (P) y la fórmula queda de la siguiente manera:

$$P = \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L - \frac{P_1}{\gamma} - \frac{V_1^2}{2g} - z_1 \right) (\eta \cdot \gamma \cdot Q) \quad (4-1)$$

Posteriormente se sustituyen los datos correspondientes a cada una de las concentraciones, mostradas en las tablas 13 y 14, en la fórmula anterior y se obtiene la potencia de la bomba en Watts. La presión 2 es la presión atmosférica en pascales y al multiplicarla por 1.1124m, la altura entre el punto 1 y el 2, se obtiene la presión de entrada.

Tabla 13. Datos para el cálculo de la potencia de la bomba con $Fe[5] H_2O_2 [140] + sol.$

Presión entrada (P1)	112713.93 Pa
Presión salida (P2)	101325 Pa
peso especifico (γ)	9810 N/m ³
velocidad entrada (V1)	1.97 m/s
velocidad salida (V2)	1.97 m/s
altura entrada (Z1)	0 m
altura salida (Z2)	1.1124 m
diferencia entre Z2 - Z1	1.1124 m
gravedad (g)	9.81 m/s ²
eficiencia (η)	70 %

Tabla 13. Datos para el cálculo de la potencia de la bomba con $Fe[5] H_2O_2 [140] + sol.$

gasto (Q)	0.001 m ³ /s
h _L	107.4117 m

(Elaboración propia)

Tabla 14. Datos para el cálculo de la potencia de la bomba con $Fe[10] H_2O_2 [280] + sol.$

Presión entrada (P1)	112713.93 Pa
Presión salida (P2)	101325 Pa
peso específico (γ)	9810 N/m ³
velocidad entrada (V1)	1.97352524 m/s
velocidad salida (V2)	1.97352524 m/s
altura entrada (Z1)	0 m
altura salida (Z2)	1.1124 m
diferencia entre Z2 - Z1	1.1124 m
gravedad (g)	9.81 m/s ²
eficiencia (η)	70 %
gasto (Q)	0.001 m ³ /s
h _L	123.865458 m

(Elaboración propia)

Al sustituir para la concentración $Fe[5] H_2O_2 [140] + sol$ se obtiene:

$$P = \left(\frac{101325}{9810} + \frac{1.97}{2(9.81)} + 1.1124 + 107.41 - \frac{112713.93}{9810} - \frac{1.97}{2(9.81)} - 0 \right) (7 \cdot 9810 \cdot 0.001) = 737.26 W$$

Al sustituir para la concentración $Fe[10] H_2O_2 [280] + sol$ se obtiene:

$$P = \left(\frac{101325}{9810} + \frac{1.97}{2(9.81)} + 1.1124 + 123.86 - \frac{112713.93}{9810} - \frac{1.97}{2(9.81)} - 0 \right) (7 \cdot 9810 \cdot 0.001) = 850.25 W$$

Debido a que $1\text{hp} = 746\text{W}$ una vez que se encuentra la potencia de la bomba en watts debemos de dividir estos resultados entre 746 para obtener la potencia en caballos de fuerza (hp).

Para la concentración $\text{Fe}[5] \text{H}_2\text{O}_2 [140] + \text{sol}$ se obtuvo:

$$P = \frac{737.26 \text{ W}}{746} = 0.988 \text{ hp}$$

Para la concentración $\text{Fe}[10] \text{H}_2\text{O}_2 [280] + \text{sol}$ se obtuvo:

$$P = \frac{850.25 \text{ W}}{746} = 1.139 \text{ hp}$$

Con la primera concentración se obtiene una potencia más pequeña, no obstante hay que recordar que esta concentración es menos efectiva que la segunda concentración.

En condiciones ideales la primera concentración deja un 3% de huevos activos (González, 2008) lo que en flujos grandes pueden llegar a ser una concentración excesiva. Por otro lado la segunda concentración en condiciones ideales acaba con todos los huevos ya que tiene 100% de eficiencia. Sin embargo la segunda concentración necesita una potencia mayor, es por eso que se debe de tomar la decisión con respecto a qué es mejor.

Por un lado se puede utilizar menos concentración, ahorrar en construir concentradores, gastar menos energía, pero dejar huevos activos y no purificar el agua por completo. O usar la solución más concentrada y gastar más en construir concentradores, gastar potencia, energía y dejar el agua libre de huevos activos.

Los resultados indican que para la concentración más baja se necesita una bomba de 1hp para que funcione y para la solución más concentrada se necesitan 1.13 hp. Para la segunda concentración no existe comercialmente una bomba de

1.13 hp por lo que se debe de considerar una bomba de 1 hp o una de 1.5 hp. El colocar una bomba de 1.5hp ciertamente haría llegar el flujo hasta el final de la tubería, sin embargo existe la probabilidad de que la presión ejercida por la bomba en la tubería sea tal que el vidrio no la resista y junto con las conexiones tenga problemas para no romperse.

No obstante la mayor inconveniencia es que al poner una bomba de casi medio hp mayor al necesario, la velocidad del flujo sería más de la que se necesita y lo más probable es que el tiempo de residencia, necesario para que el agua sea tratada por completo, disminuya y no se obtengan los resultados que se desean.