

3. RESULTADOS

En éste Capítulo se resume y comparan los parámetros que resultaron del diseño de ambas propuestas de tratamiento, para determinar cual es la más adecuada desde un punto de vista sostenible. A lo largo del capítulo, se desarrolla la propuesta seleccionada, donde se presenta la factibilidad ambiental, técnico y económica.

3.1. Comparación final y selección de la propuesta

En el Capítulo 2 se realizó el diseño de las dos propuestas a nivel de ingeniería básica, y cuyos parámetros de comparación se presentan en la Tabla 3.1, con el fin de hacer la selección final.

Tabla 3.1 Comparación final entre RBLM con lodos activados y RSB

Parámetro	Unidades	RBLM+LA	RSB
Área Requerida	m ²	225	360
Volumen Requerido	m ³	948	2160
Consumo de Oxígeno	kg O ₂ /d	720	854
Consumo Energético	kWh/día	554	551
Remoción de DBO	%	100%	100%
DBO en el efluente	mg/l	1	1
Producción de lodos	kg/d	397	400
Dificultad de Operación	Alta-Media-Baja	Baja	Alta

Aunque la información mostrada en la Tabla 3.1 es clara, se elaboró una gráfica donde se hace una comparación unitaria de algunos parámetros de la Tabla 3.1 como se puede ver en la Figura 3.1.

La Figura 3.1 refleja que las dos propuestas tienen características muy similares, como lo es el consumo energético, remoción de DBO y producción de lodos. Sin embargo, en cuanto al área y volumen requerido, la propuesta del RBLM con lodos activados de mezcla completa es una mejor opción. Ya que como se había hecho énfasis anteriormente, el espacio disponible es una de las restricciones más importantes en este proyecto. Por otro lado esta propuesta es considerablemente más fácil de operar, lo cual indirectamente aumentará calidad real del efluente de la PTARCU.

Por ello que la selección final que se adopta es la propuesta de RBLM con lodos activados, con una microfiltración de tratamiento avanzado y un sistema de desinfección mediante cloración.

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama de flujo de la propuesta final de este trabajo donde se aprecia tanto el flujo de tratamiento de la Línea 1, como el de la Línea 2, que se mezclan en el cárcamo de bombeo donde se realiza la cloración; por lo que el efluente final sería una mezcla de ambos flujos, como se resume en la Tabla 3.2.

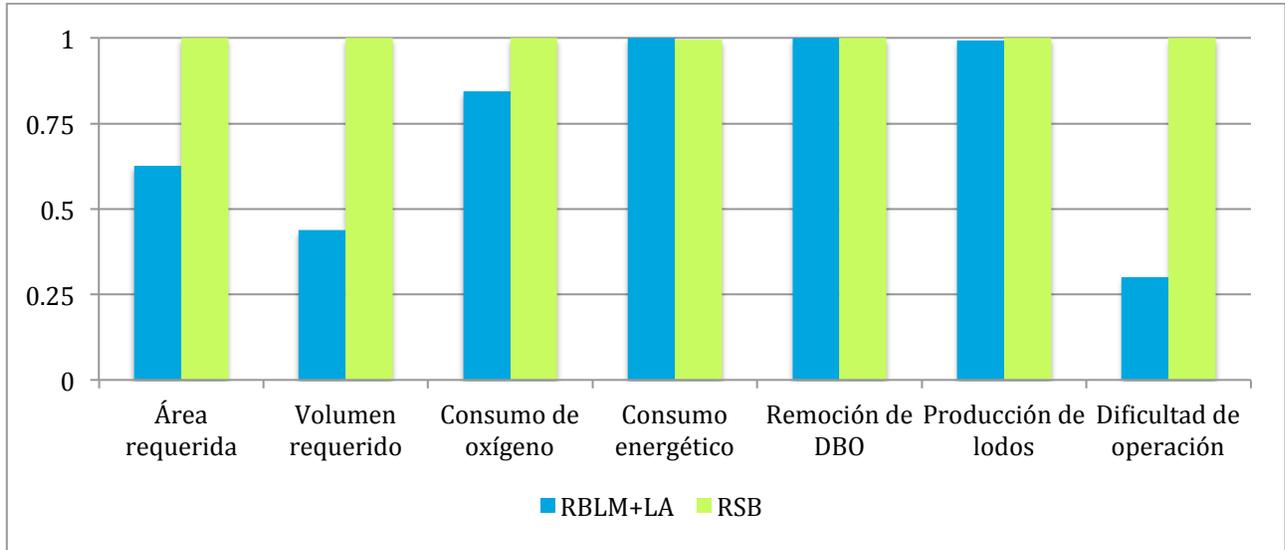


Fig. 3.1 Comparación unitaria entre RBLM con Lodos Activados y RSB

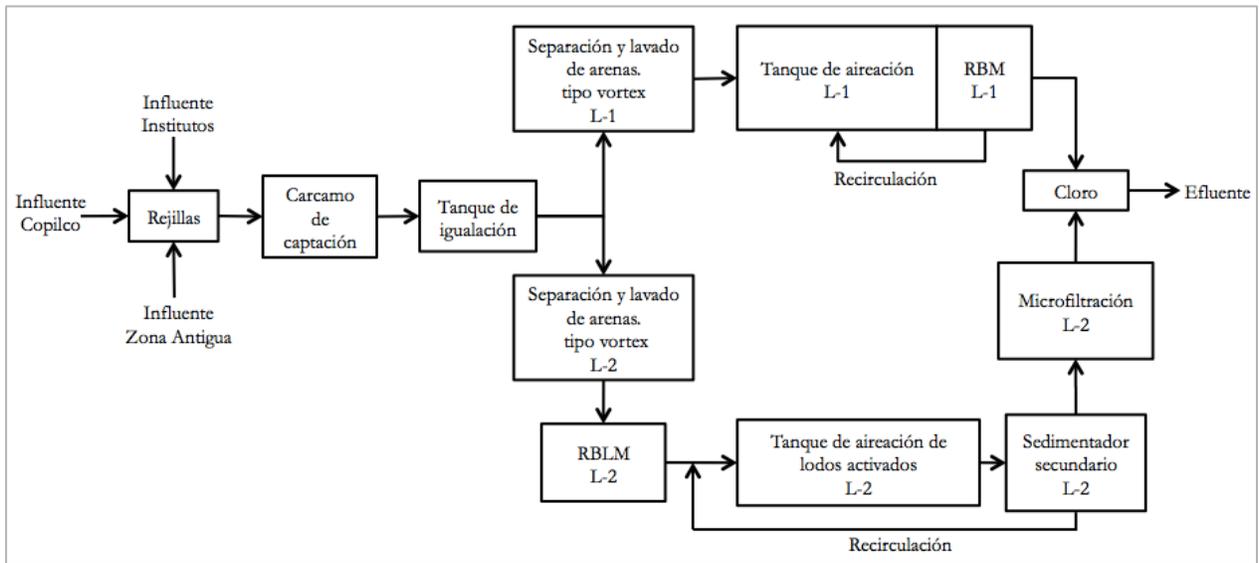


Fig. 3.2 Diagrama de flujo de la propuesta final para aumentar la capacidad de la PTARCU

Tabla 3.2 Efluente de la Línea 1, Línea 2 y efluente final

Efluente	Q (l/s)	DBO (mg/l)	SST (mg/l)
Efluente L1	25	5.00	2.00
Efluente L2	25	0.25	0.90
Efluente Final	50	2.62	1.45

3.2. Análisis de resultados

Una vez que se obtuvo la propuesta final se realizó un análisis para apreciar el desarrollo de la remoción de DBO y SST con el consumo energético asociado a cada etapa de tratamiento y de esta forma conocer cuales son los puntos críticos del tratamiento (Figura 3.3).

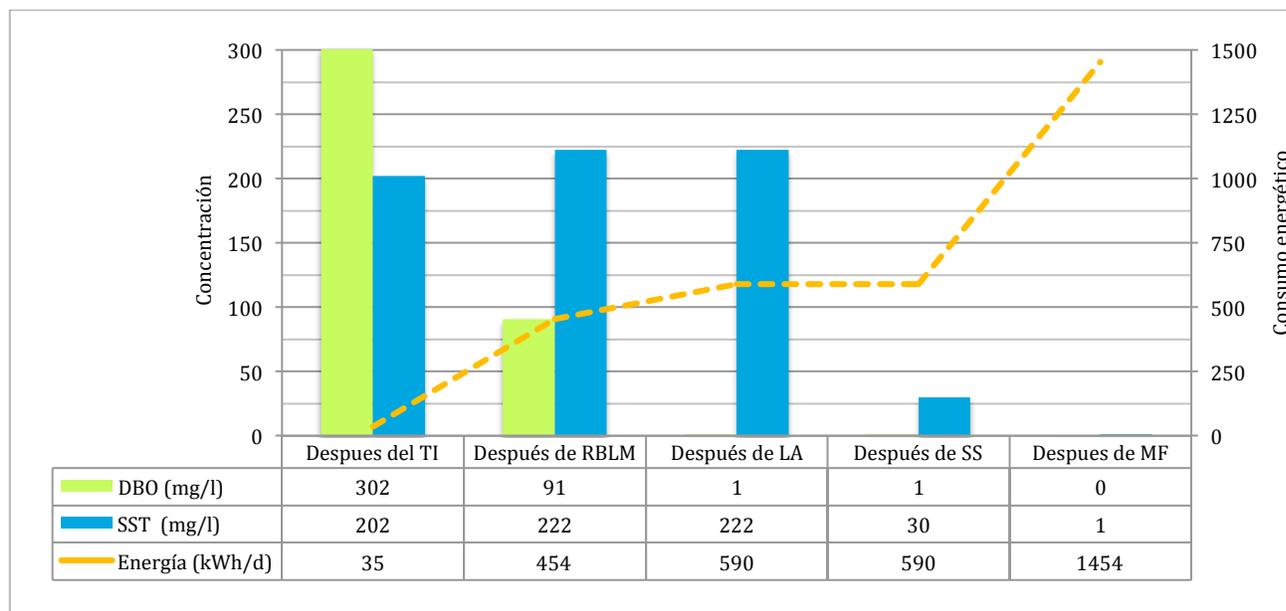


Fig. 3.3 Desarrollo de la DBO, SST y del consumo energético a través del proceso de tratamiento

Dónde:

Después del TI=Condiciones después del tanque de igualación.

Después de RBLM=Condiciones después de haber pasado por el reactor RBLM

Después de LA=Condiciones después de haber pasado por el reactor de lodos activados de mezcla completa.

Después de SS=Condiciones después de haber pasado por el sedimentador secundario.

Después de MF=Condiciones después de haber pasado por el equipo de microfiltración.

Los resultados mostrados en la Figura 3.3 permiten analizar lo siguiente:

- La concentración de sólidos suspendidos aumenta después del reactor RBLM. Esto se debe a que la película biológica adherida a los portadores se desprende con el contacto que existe entre los mismos.
- Después de los lodos activados de mezcla completa la concentración de DBO es prácticamente nula, cumpliendo con la NOM-03-SEMARNAT-1997.

- La concentración de sólidos suspendidos totales después de la sedimentación secundaria, disminuye considerablemente.
- La energía requerida para eliminar la pequeña concentración de sólidos suspendidos totales después de la sedimentación secundaria, aumenta considerablemente debido al equipo de microfiltración.

Por lo tanto, si el objetivo de esta propuesta fuera únicamente cumplir con la NOM-03-SEMARNAT-1997, se podría disminuir la concentración de SST después de la sedimentación secundaria con un procedimiento convencional de filtración de arena, el cual tendría un consumo energético mucho menor que la microfiltración. Sin embargo, como se estableció al inicio del Capítulo 2, el objetivo de la propuesta es igualar la calidad del efluente de la Línea 1, por lo que bajo esta condición es necesario emplear la microfiltración.

3.3. Factibilidad Ambiental

Con el fin de hacer una aproximación del ahorro energético de la propuesta final, se comparó el consumo aproximado de la Línea 1 y el calculado de la Línea 2 en esta propuesta. Según Metcalf y Eddy (2004) para tratar un m^3 de aguas residuales mediante un sistema de ultrafiltración como el instalado en la Línea 1, se requieren de 3 kWh/m^3 . Por lo tanto, el consumo energético aproximado es de $6,480 \text{ kWh/día}$. Mientras que para la Línea 2, como se había calculado anteriormente, el consumo energético de la propuesta final es de 1454 kWh/día . Siendo el consumo energético aproximado de la Línea 1, 4.45 veces mayor al de la propuesta de este trabajo, como se aprecia en la Figura 3.4.

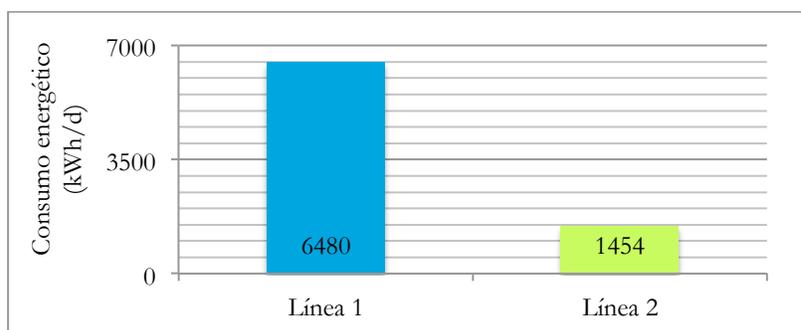


Fig. 3.4 Consumo energético de la Línea 1 y de la Línea 2

El ahorro energético que representa la propuesta de la Línea 2, comparado con la el sistema instalado en la Línea 1, es de 5026 kWh/día . Ésto representa un ahorro de 1277 toneladas métricas de CO_2 en un año, equivalente a las emisiones de CO_2 generadas 155 casas o 250 automóviles de pasajeros en el mismo tiempo (EPA, 2011). Por lo tanto, se considera que la propuesta de este trabajo es factible ambientalmente.

3.4. Factibilidad técnica

Para determinar la factibilidad técnica de la propuesta, se estableció la geometría final de los tanques y equipos de las operaciones y procesos unitarios y distribuir el sistema de tratamiento dentro del área disponible para dicha propuesta.

3.4.1. Dimensionamiento

De todos los procesos y operaciones unitarios de los cuales está compuesta la propuesta, aquellos que varían en la geometría para distribuirlos en el área disponible son: el tanque de igualación, el reactor de RBLM, el reactor de lodos activados y el sedimentador secundario. Por lo tanto, a continuación se resume el proceso mediante el cual se estableció la geometría de éstos.

3.4.1.1. Dimensionamiento del tanque de igualación

En el Capítulo 2 se determinó que el volumen requerido para el tanque de igualación propuesto, es de $1,182 \text{ m}^3$. El tanque de igualación propuesto está estructurado con muros de concreto reforzado con una altura propuesta de 12 m mas 0.5 m de bordo libre. Para la altura propuesta, el área requerida por el tanque es de 100 m^2 . Metcalf y Eddy (2004) comentan que el uso de compartimentos múltiples ayuda a evitar la generación de olores y disminuye los costos de limpieza. Sabiendo esto, se propuso un tanque de igualación a base de muros de concreto reforzado, dividido en 2 compartimentos, con una sección de 6.65 m por 7.53 m cada uno. La sección final del tanque de igualación resultó de 15.35 m x 6.65 m, proporcionando un área de 103 m^2 . Para fines de construcción, se consideró un espesor en los muros de concreto de 30 cm, debido a la altura que se está proponiendo. Finalmente con la geometría establecida, el volumen útil del tanque es de $1,201 \text{ m}^3$. En las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se muestra la geometría final del tanque de igualación.

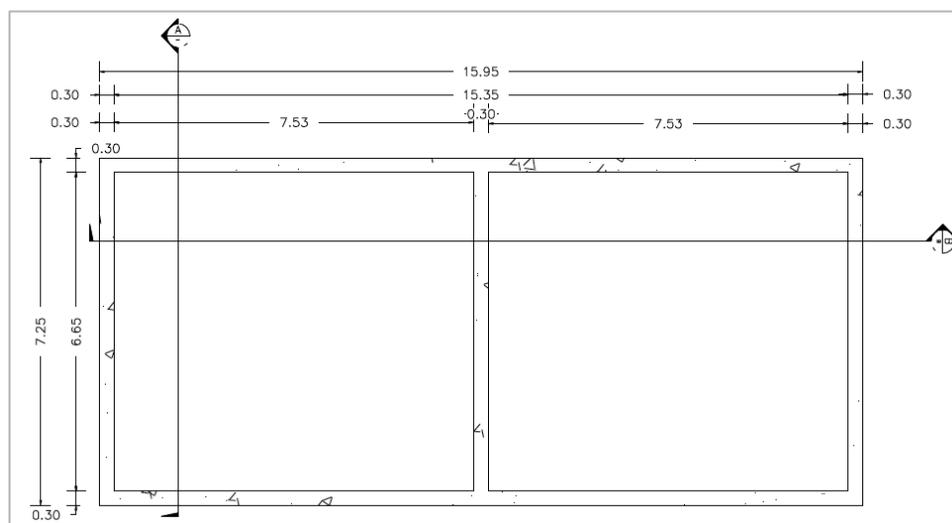


Fig. 3.5 Tanque de igualación-Planta

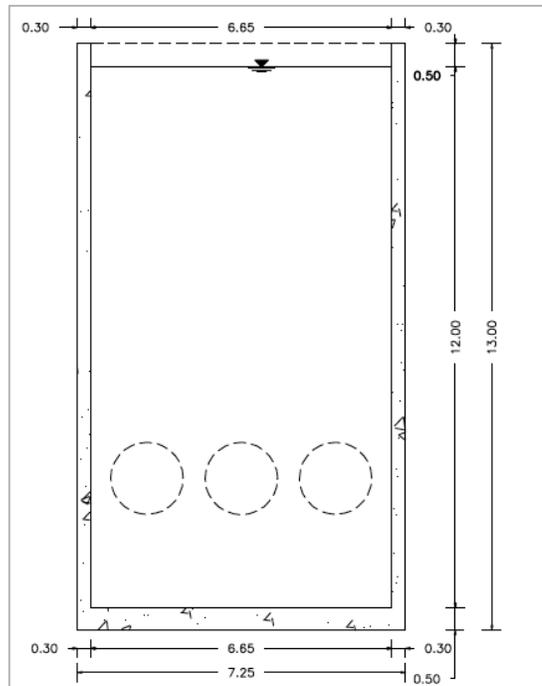


Fig. 3.6 Tanque de igualación-Corte A-A

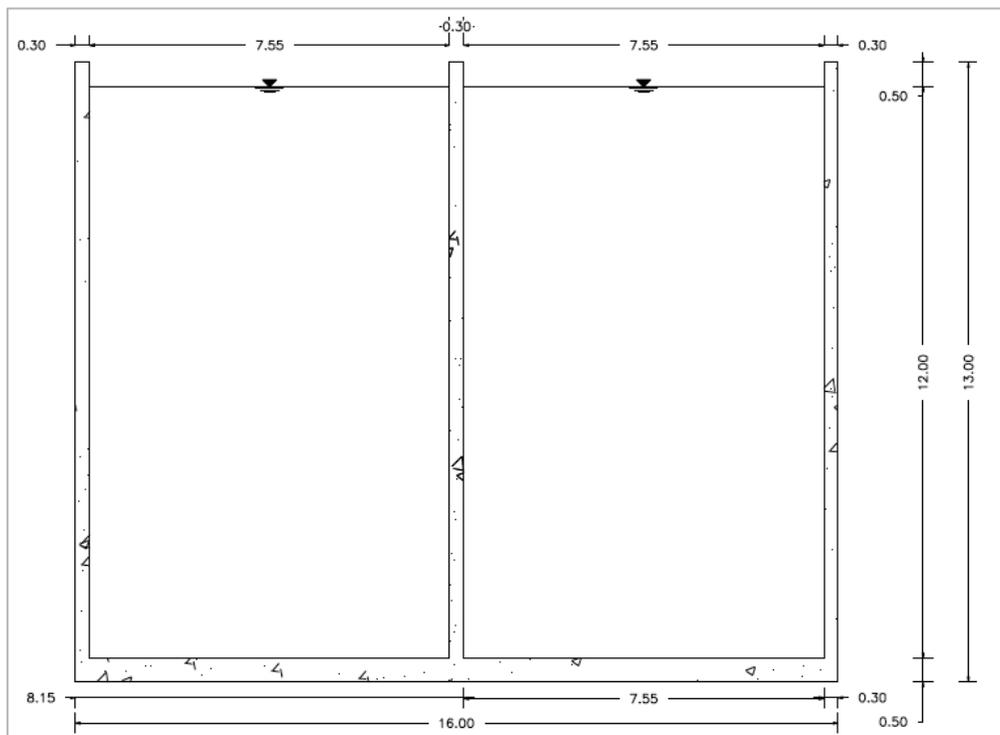


Fig. 3.7 Tanque de igualación-Corte B-B

3.4.1.2. Dimensionamiento del reactor RBLM

Durante el procedimiento de diseño se determinó que el volumen requerido por el reactor RBLM sea de 100 m^3 . AqWise comenta que el reactor RBLM tiene un funcionamiento hidráulico muy similar a un tanque de aireación de mezcla completa (Gadot, 2011). Por lo tanto, la geometría del reactor RBLM debe cumplir con condiciones de diseño de un tanque de aireación de mezcla completa. Metcalf y Eddy comentan que la geometría para estos tanques debe tener una relación ancho-profundidad entre 1:1 hasta 2.2:1 y una relación largo-ancho de 5:1. Sin embargo, para el caso de los reactores de mezcla completa con difusores la relación largo-ancho, se puede disminuir con el objetivo de reducir los costos de construcción. Para el reactor RBLM se utilizó una relación ancho-profundidad de 1:1 y debido a la falta de espacio para distribuir la propuesta, se disminuyó la relación largo-ancho a 4:1. Por lo que el reactor RBLM propuesto tiene una sección de 2.95 m de ancho, 11.80 m de largo y una profundidad de 2.95 m. Además se consideró un bordo libre de 0.45 m para tener una profundidad final de 3.40. El volumen útil del tanque de aireación resultó de 103 m^3 cubriendo con el requerido de 100 m^3 . Para fines de construcción se consideró un espesor de muros de 15 cm. En las Figuras 3.8, 3.9 y 3.10 se muestra la geometría final del reactor RBLM.

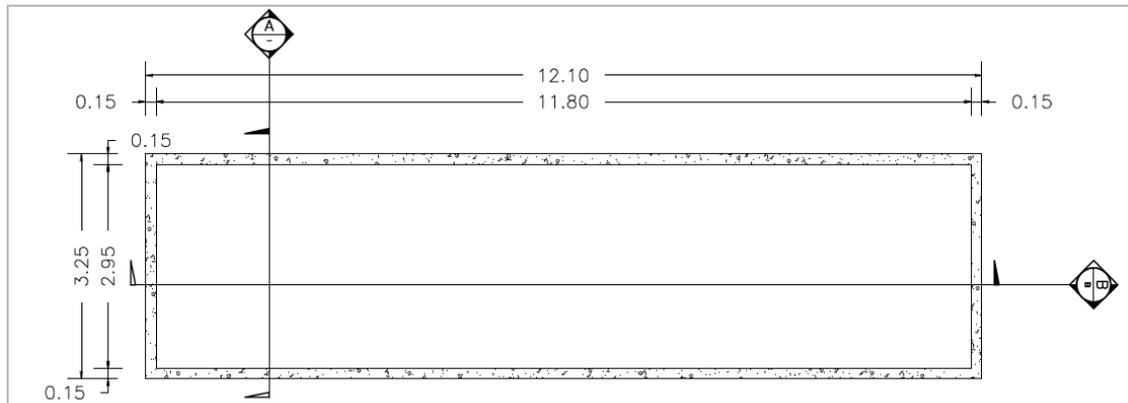


Fig. 3.8 Tanque de aireación de RBLM-Planta

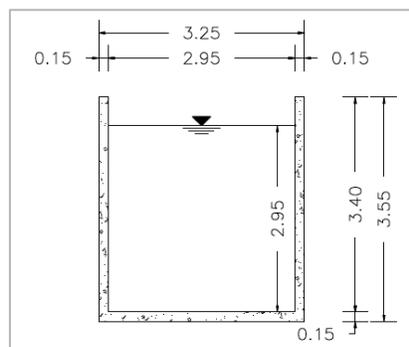


Fig. 3.9 Tanque de aireación de RBLM-Corte A-A

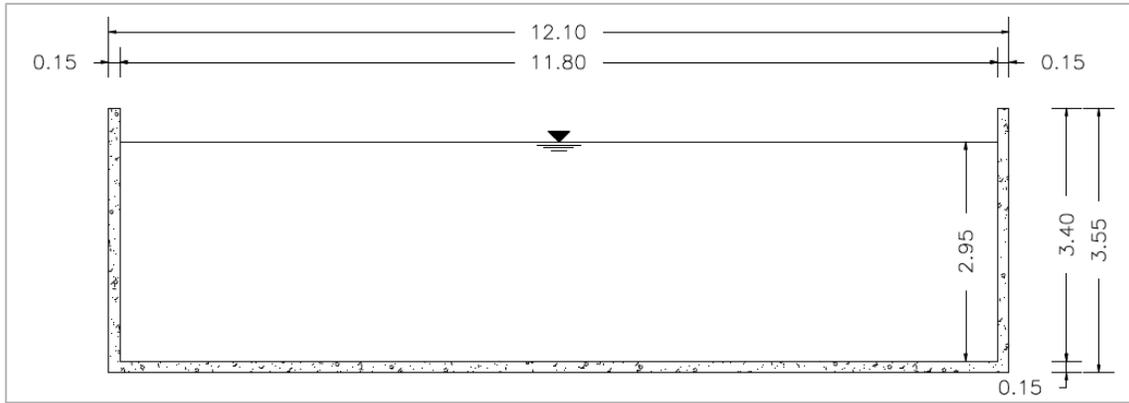


Fig. 3.10 Tanque de aireación de RBLM -Corte B-B

3.4.1.3. Dimensionamiento del reactor de lodos activados de mezcla completa

El volumen necesario para este reactor, calculado en el Capítulo 2, resultó de 340 m^3 . En este caso se utilizaron las mismas relaciones ancho-profundidad y largo-ancho que las establecidas para el tanque de aireación del reactor RBLM. Por lo tanto, el tanque de aireación para los lodos activados de mezcla completa tiene una sección de 4.40 m de ancho, 17.50 m de largo y una profundidad de 4.40 m. Se consideró un bordo libre de 0.60 m para tener una profundidad final de 5.00 m. El volumen útil del tanque de aireación resultó de 341 m^3 cubriendo con el requerido de 340 m^3 . Para fines de construcción se consideró un espesor de muros de 15 cm. En las Figuras 3.11, 3.12 y 3.13 se muestra la geometría final del tanque de aireación del reactor de lodos activados de mezcla completa.

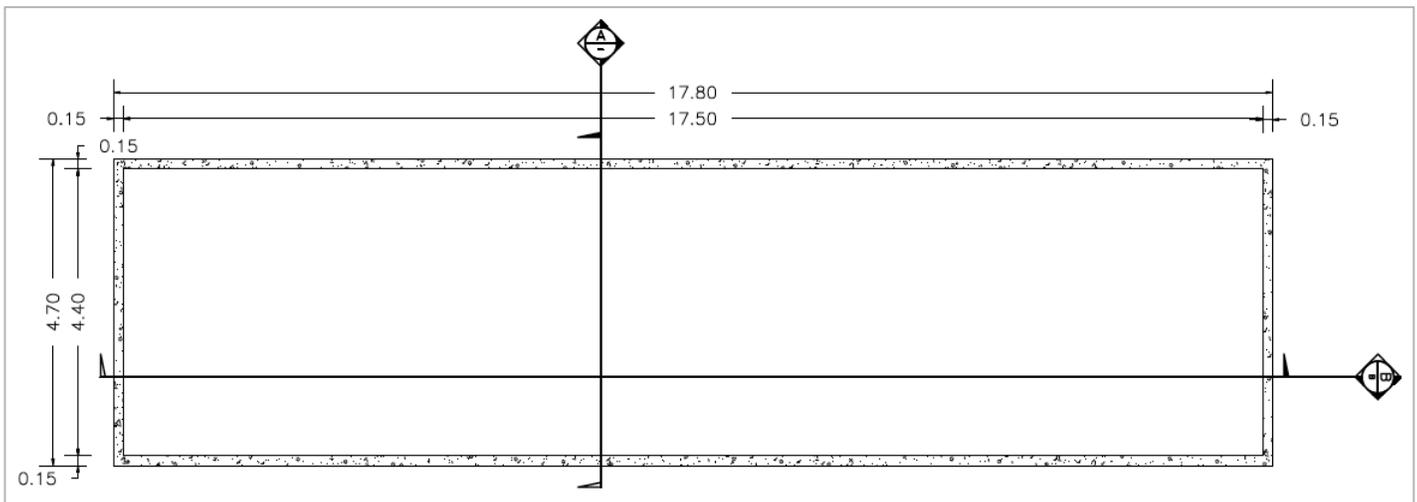


Fig. 3.11 Tanque de aireación de lodos activados -Planta

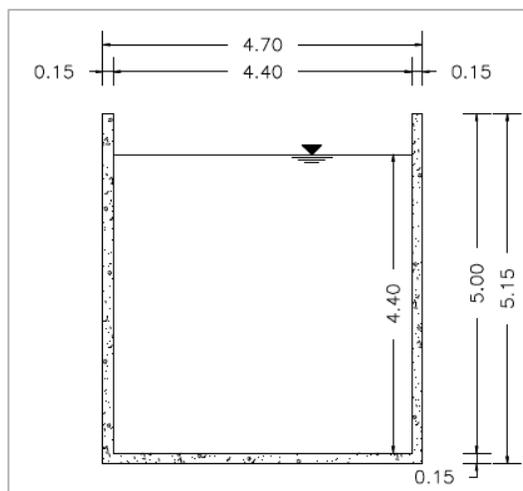


Fig. 3.12 Tanque de aireación de lodos activados -Corte A-A

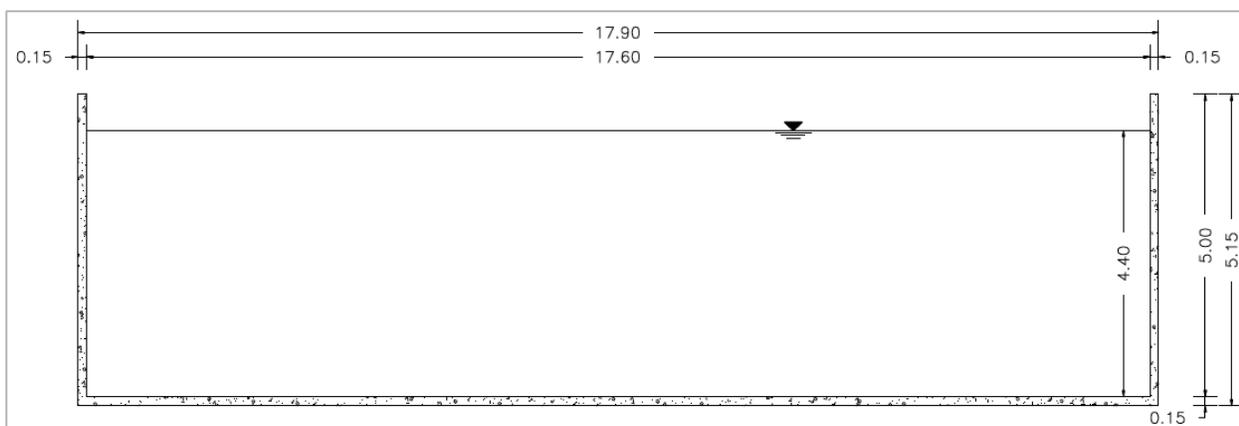


Fig. 3.13 Tanque de aireación de lodos activados-Corte B-B

3.4.1.4. Dimensionamiento del sedimentador secundario

El sedimentador secundario que se propone en este trabajo, requiere de un área de sedimentación de 113 m^2 . Dar-Lin (2007) comenta que la geometría para los sedimentadores secundarios, a continuación de un proceso de lodos activados, puede ser de sección cuadrada, circular o rectangular. Sin embargo Metcalf y Eddy (2004) mencionan que los sedimentadores cuadrados no son tan efectivos para la retención de sólidos como lo son el circular y el rectangular. Sabiendo esto se propuso un tanque de sección rectangular con una longitud de 22.5 m y un ancho de 5.1 m proporcionando un área superficial de 112.5 m^2 . Metcalf y Eddy establecen que para sedimentadores rectangulares es recomendable que la longitud sea menor a 10 veces el ancho, condición que se cumple satisfactoriamente. La profundidad del sedimentador propuesta es de 4.5 m promedio de la

profundidad recomendada por la WEF (1992) que establece que ésta debe de estar entre 4 y 5 m, mas un bordo libre de 0.5 m para tener una profundidad final de 5 m. En la Figura 3.14, 3.15 y 3.16 se muestra la geometría final del sedimentador secundario.

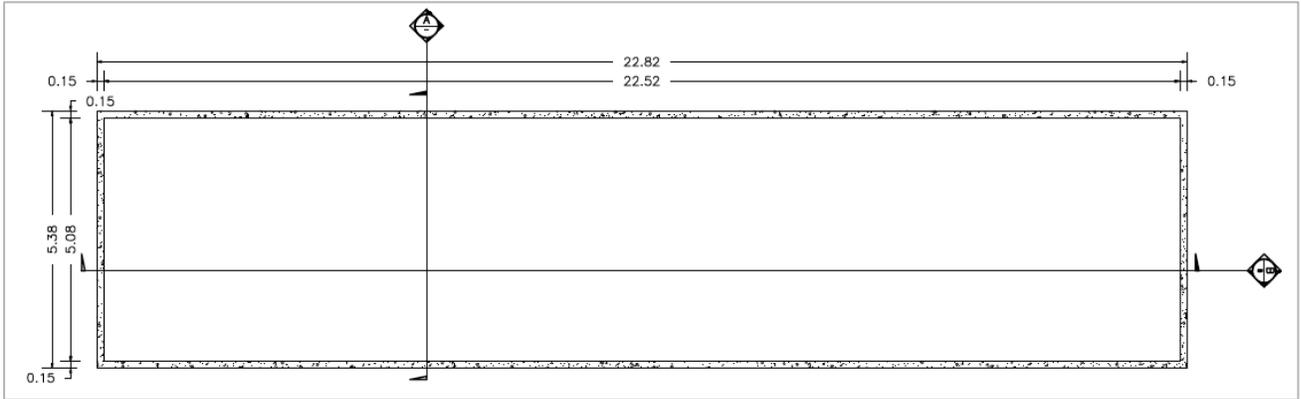


Fig. 3.14 Sedimentador secundario. Planta

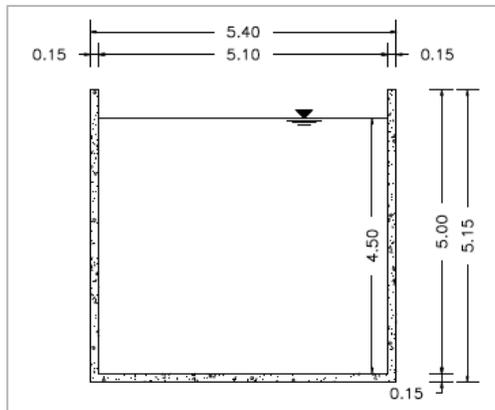


Fig. 3.15 Sedimentador secundario-Corte A-A

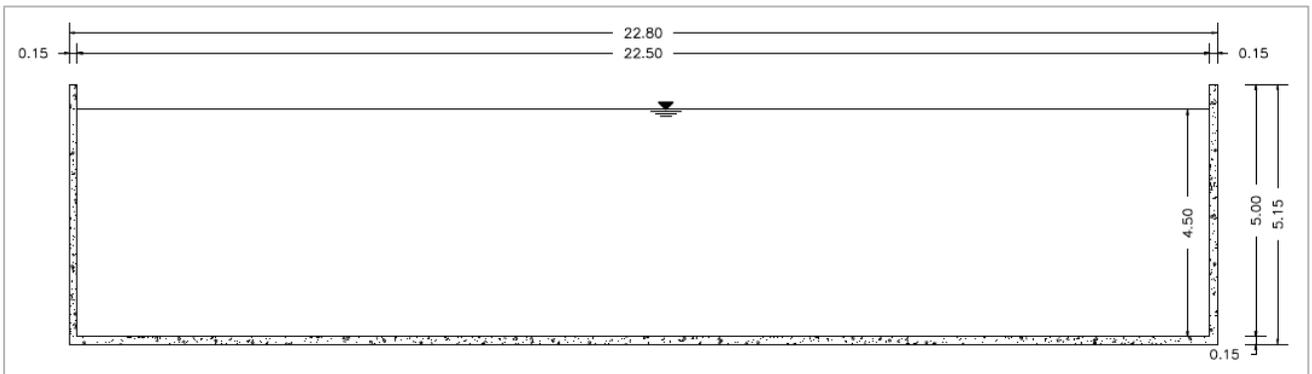


Fig. 3.16 Sedimentador secundario. Corte B-B

3.4.1.5. Resumen del dimensionamiento

En la Tabla 3.3 se resume el dimensionamiento tren de tratamiento de la propuesta de este trabajo.

Tabla 3.3 Resumen del dimensionamiento del tren de tratamiento

Operación o proceso unitario	Ancho (m)	Largo (m)	Prof. (m)	Bordo libre (m)	Espesor (m)	Volumen útil (m ³)
Tanque de igualación	6.65	15.35	12.00	0.50	0.30	1201
RBLM	2.95	11.80	2.95	0.45	0.15	103
Reactor de lodos activados	4.40	17.60	4.40	0.60	0.15	340
Sedimentador secundario	5.08	22.50	4.50	0.50	0.15	514

3.4.1.6. Ubicación del sistema de tratamiento en el espacio disponible de la PTARCU

La ubicación de las operaciones y procesos unitarios de la propuesta resultaron en un arreglo de planta un inusual. Esto se debe a que el espacio disponible para alojar la propuesta es muy pequeño y además tiene una geometría irregular, lo cual complica de forma considerable la distribución de las operaciones y procesos unitarios. Sin embargo proponiendo elementos rectangulares, se logró aprovechar muy bien el espacio. La ubicación de las operaciones y procesos unitarios de la propuesta para aumentar la capacidad de la PTARCU se muestra a continuación en la Figura 3.17.



Fig. 3.17 Distribución de los procesos y operaciones unitarios de la propuesta.

3.4.2. Balance de masa del tren de tratamiento

El balance de masa es una forma muy conveniente y práctica de definir, que esta ocurriendo a través de los reactores del tren de tratamiento. Esto se basa en el principio de que la materia, ni se crea ni se destruye solo se transforma. El balance de masas de la propuesta se muestra en la Figura 3.18.

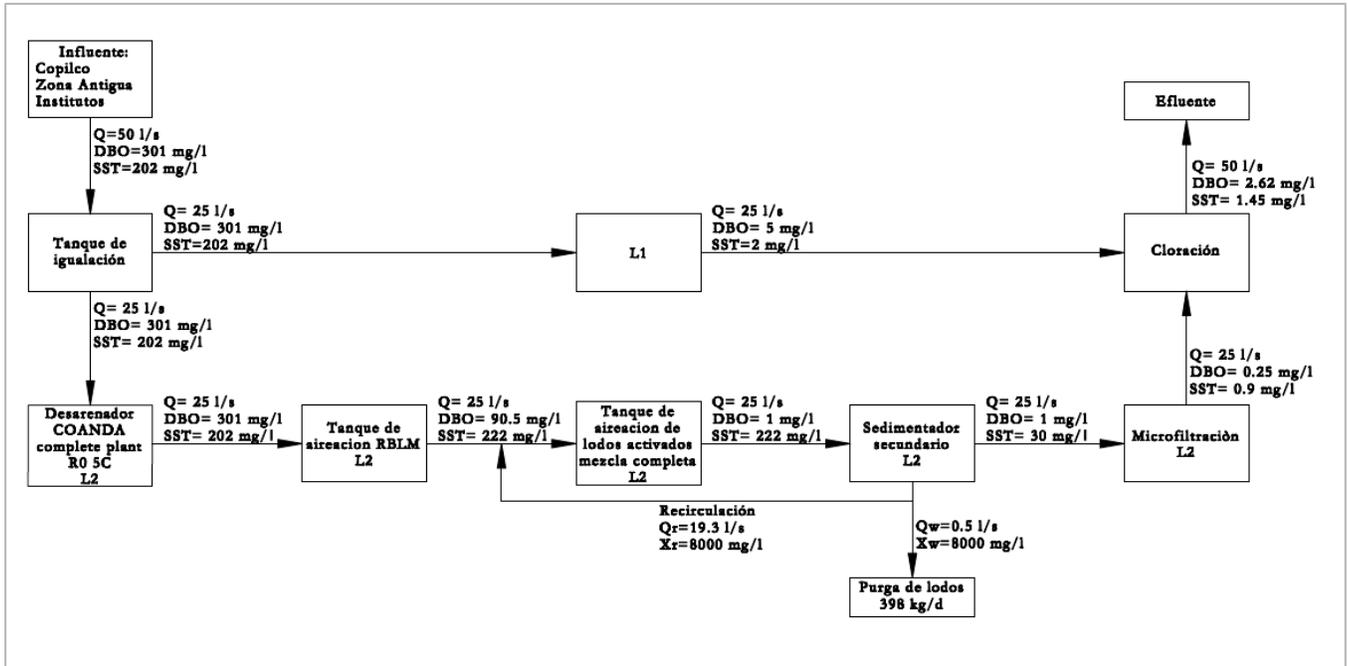


Fig. 3.18 Balance de masas de la propuesta

3.4.3. Perfil hidráulico de la propuesta

Para establecer el perfil hidráulico de la propuesta, se realizó un levantamiento de elevaciones aproximadas de la PTARCU. Si las operaciones y procesos unitarios de esta propuesta se construyeran e instalaran en la elevación actual de donde fueron ubicados (Figura 3.15), sin realizar excavación o elevación alguna, el perfil hidráulico de la propuesta sería como se muestra en la Figura 3.19.

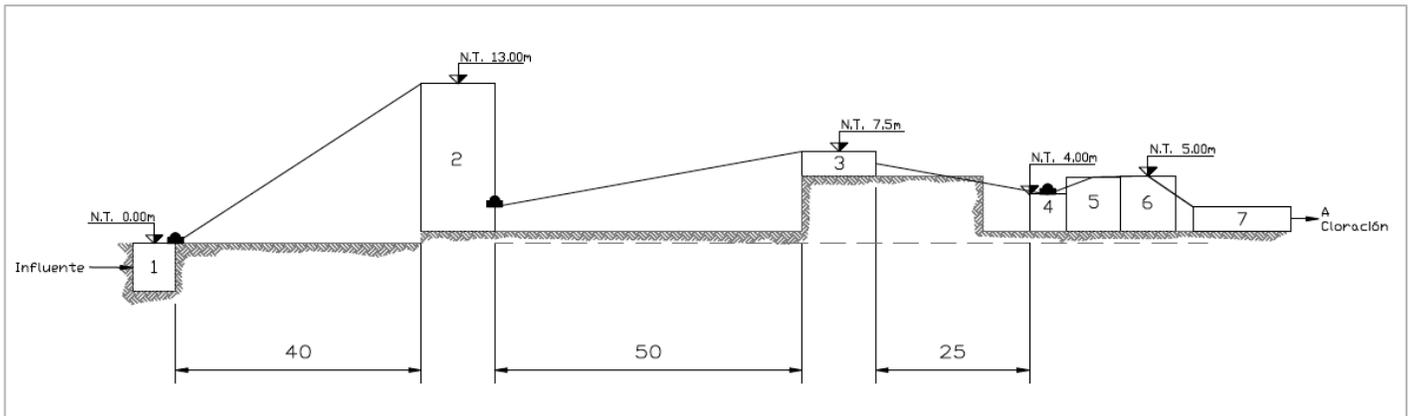


Fig. 3.19 Elevación de las operaciones y procesos unitarios, sin excavación

Dónde:

1=Cárcamo de captación

2=Tanque de igualación

3=Desarenador

4=RBLM

5=Lodos activados

6=Sedimentación Secundaria

7=Microfiltración

Sin embargo, este perfil hidráulico puede llevar a un consumo energético por bombeo muy alto. Por lo que fue necesario realizar un análisis para establecer la elevación y diámetro óptimo de cada tramo de conducción de la propuesta. Esto con el objetivo encontrar el consumo energético por bombeo mínimo, dentro de las limitaciones constructivas. Es decir, para que el consumo energético por bombeo sea menor, algunas operaciones y procesos unitarios se pueden enterrar o elevar, disminuyendo así la carga de bombeo y además se puede variar el diámetro, para disminuir la influencia de las pérdidas por fricción. Se establecieron las siguientes acciones para modificar las elevaciones y así tener el perfil hidráulico óptimo, el cual se aprecia en la Figura 3.20.

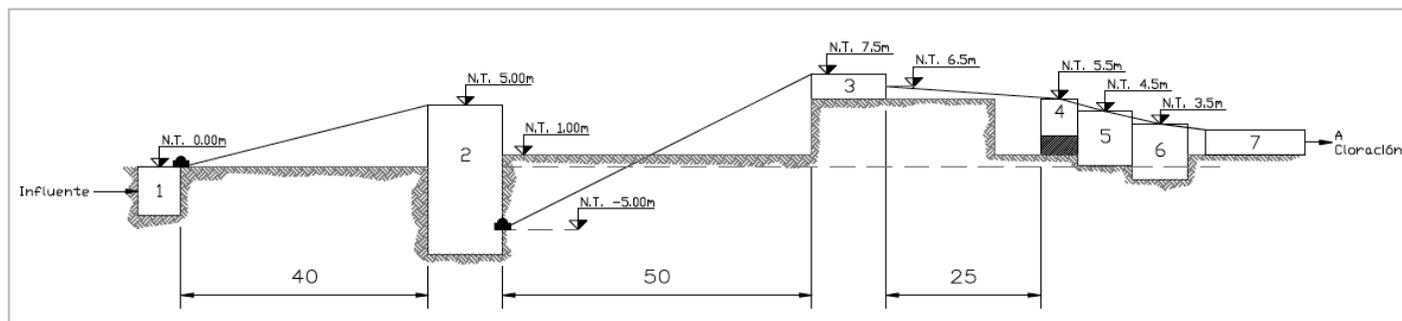


Fig. 3.20 Perfil Hidráulico de la propuesta.

1. El elemento 1 se dejó en la elevación original.
2. El elemento 2 se enterró 7 m, a partir del nivel 0.00 m.
3. El elemento 3 se dejó en la elevación original.
4. El elemento 4 se elevó 1.5 m de su elevación original.
5. El elemento 5 se enterró 0.9 m de su elevación original.
6. El elemento 6 se enterró 2 m de su elevación original.

Como se puede ver en la Figura 3.19, se propuso que los tramos 3-4, 4-5 y 5-6 tuvieran flujo por gravedad, aprovechando que las diferencias de elevación no son muy grandes y que la excavación necesaria para lograr esto sería mínima. Para estos tramos se propuso una tubería de acero de 152 mm de diámetro.

Posteriormente se observó que los del tramo 1-2 y 2-3 serían los únicos con flujo por bombeo, por lo tanto fue necesario elaborar una análisis de elevaciones de estos dos tramos, para determinar la altura óptima de cada elemento. A continuación se presenta el análisis elaborado de dicha elevación de los elementos 1, 2 y 3.

3.4.3.1. Análisis por bombeo tramo 1-2

Para el diseño de la conducción se estableció una longitud aproximada de 40 m y un gasto de diseño de 85 l/s, el cual corresponde al gasto de diseño obtenido en el Capítulo 2. El procedimiento de análisis del perfil hidráulico óptimo en cuanto a consumo energético por bombeo, se resume a continuación.

1. Cálculo del diámetro de tubería necesario con la Ecuación 3.1, proponiendo una velocidad de flujo de 1.5 m/s.

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} \quad (3.1)$$

Dónde:

D=Diámetro de la tubería (m)

Q=Gasto de diseño (m³/s)

V=Velocidad (m/s)

El diámetro requerido para el tramo 1-2 es de 270 mm lo cual llevó a proponer un diámetro comercial de 273 mm.

2. Determinación de la velocidad con el diámetro comercial establecido utilizando la Ecuación 3.2 (Valdez, 1994).

$$V_r = \left(\frac{Q}{0.785(D_c^2)} \right) \quad (3.2)$$

Dónde:

V_r=Velocidad real con diámetro comercial (m/s)

Q=Gasto de diseño (m³)

D_c=Diámetro comercial (m)

La velocidad obtenida con la Ecuación 3.2 fue de 1.45 m/s, la cual debe de estar entre 0.3 y 5 m/s (Barranco, 2009).

3. Determinación de las pérdidas por fricción y locales de la conducción.

Para determinar las pérdidas por fricción se utilizó la ecuación 3.3 (Valdez, 1994).

$$h_f = \left(\frac{10.3(n^2)}{0.75^{16/3}} \right) (L)(Q^2) \quad (3.3)$$

Dónde:

h_f =Pérdidas por fricción (m)

n =Coeficiente de rugosidad de Manning

L =Longitud de la conducción (m)

Q =Gasto de diseño (m^3/s)

La tubería propuesta es de acero con recubrimiento, el cual tiene una “n” de Manning de 0.011. Las pérdidas por fricción obtenidas con la Ecuación 3.3 resultaron de 0.37 m. En cuanto a las pérdidas secundarias, se consideró que estas serían de una magnitud cercana al 10% de las pérdidas por fricción, debido a que no existen muchas válvulas, codos o dispositivos en la conducción. Por lo tanto las pérdidas secundarias resultaron de 0.037 m y las totales de 0.40 m.

4. Determinación de la carga hidráulica a vencer por el bombeo empleando la Ecuación 3.4 (Valdez, 1994).

$$H_b = h_f + h_s + h_i + h_a \quad (3.4)$$

Dónde:

H_b =Carga de bombeo (m)

h_f =Pérdidas por fricción en la tubería (m)

h_s =Pérdidas secundarias o locales (m)

h_i =Elevación de impulsión (m)

h_a =Elevación de aspiración (m)

Considerando que la elevación de impulsión es de 5.00 m y la de aspiración es la elevación 0.00 m, según la Figura 3.10, el resultado de aplicar la Ecuación 3.4 fue una carga de bombeo de 5.4 m.

5. Revisión de la resistencia del conducto propuesto, ante la sobrepresión del golpe de ariete empleando la Ecuación 3.5 (Valdez, 1994).

$$h_{ga} = \frac{145 V}{\sqrt{1 + \frac{Ea(D)}{Et(e)}}} \quad (3.5)$$

Dónde:

h_{ga} =Sobrepresión por golpe de ariete (m.c.a.)

V =Velocidad (m/s)

E_a =Módulo de elasticidad del agua

E_t =Módulo de elasticidad de la tubería

D_c =Diámetro comercial de la tubería (cm)

e =Espesor de la tubería (cm)

El módulo de elasticidad del agua es de 20,670 kg/cm² y el del acero de la tubería es de 2,100,000 kg/cm². La tubería propuesta tiene un espesor de 0.27 cm y con el cual la carga de trabajo que resiste es de 247 m.c.a. La sobrepresión que resultó de aplicar la Ecuación 3.5 fue de 160.14 m.c.a. Sin embargo, únicamente el 20% de la sobrepresión es absorbida por la tubería, el resto, lo toma la válvula de cierre. Por lo tanto, la carga total que se puede presentar en la tubería, sería la carga de bombeo (H_b) mas 20% de la sobrepresión por golpe de ariete. Siendo así, la carga total resulta de 37.53 m.c.a. misma que la tubería la resiste sin problema alguno.

6. Determinación del consumo energético por bombeo

El tramo 1-2 , consiste en la conducción anterior al tanque de igualación, por lo que el gasto no es constante a lo largo de todo el día. Por lo tanto, el consumo energético por bombeo se obtuvo utilizando el hidrograma de diseño (Figura 2.15) obtenido en el Capítulo 2 y así determinar el consumo energético por hora, dependiendo el gasto utilizando (Adaptada de Valdez, 1994):

$$CE_b = 0.7458 \left(\frac{QH}{76 \eta} \right) \quad (3.6)$$

Dónde:

CE_b =Consumo energético por bombeo (kWh)

Q =Gasto de entrada

H_b =Carga de bombeo (m)

η =Eficiencia de la bomba (%)

Para la propuesta se estableció una eficiencia de las bombas del 70%, con el cual se calculó el consumo energético de la bomba del tramo 1-2 en cada hora, con respecto al gasto de entrada del hidrograma de diseño. En la Tabla 3.3 se resume el consumo energético por hora donde se puede apreciar la variación de éste dependiendo el gasto de entrada.

Tabla 3.4 Consumo energético por hora, del tramo 1-2

Hora	Q (l/s)	CE _b (kWh)	Hora	Q (l/s)	CE _b (kWh)
1	17.688	1.34	13	75.356	5.71
2	16.214	1.23	14	81.776	6.19
3	14.740	1.12	15	80.762	6.12
4	14.003	1.06	16	85.000	6.44
5	13.266	1.00	17	75.671	5.73
6	12.883	0.98	18	73.670	5.58
7	15.785	1.20	19	67.052	5.08
8	54.297	4.11	20	65.552	4.96
9	78.427	5.94	21	50.621	3.83
10	74.977	5.68	22	26.294	1.99
11	79.981	6.06	23	19.923	1.51
12	82.978	6.28	24	19.392	1.47

3.4.3.2. Análisis por bombeo tramo 2-3

El tramo 2-3 se analizó siguiendo el mismo procedimiento que el tramo 1-2, con la diferencia de que el gasto de diseño si es de 25 l/s, correspondiente al gasto de diseño después del tanque de igualación para la Línea 2. Aunado a esto, el gasto es constante las 24 horas del día, ya que es el tramo posterior al tanque de igualación por lo que el consumo energético no se tiene que calcular con ningún hidrograma. A continuación se resume el análisis del tramo 2-3

1. Cálculo del diámetro de tubería necesario con la Ecuación 3.1.

Obtenida por deducción de unidades, proponiendo una velocidad de flujo de 2.5 m/s. El diámetro requerido para el tramo 2-3 es de 150 mm lo cual llevó a proponer un diámetro comercial de 152 mm.

2. Determinación de la velocidad con el diámetro comercial establecido utilizando la Ecuación 3.2 (Valdez, 1994).

La velocidad obtenida con la Ecuación 3.2 fue de 1.37 m/s, la cual debe de estar entre 0.3 y 5 m/s (Barranco, 2009).

3. Determinación de las pérdidas por fricción y locales de la conducción.

Para determinar las pérdidas por fricción se utilizó la Ecuación 3.3 (Valdez, 1994). La tubería propuesta es de acero con recubrimiento, la cual tiene una n de Manning de 0.011. Las pérdidas por fricción obtenidas con la Ecuación 3.3 resultaron de 0.89 m. En cuanto a las pérdidas secundarias, se consideró que estas serían de una magnitud cercana al 10% de las pérdidas por fricción, debido a que

no existen muchas válvulas, codos o dispositivos en la conducción. Por lo tanto las pérdidas secundarias resultaron de 0.09 m y las totales de 0.98 m.

4. Determinación de la carga hidráulica a vencer por el bombeo.

Para lo cual se empleó la Ecuación 3.4 (Valdez, 1994), considerando que la elevación de impulsión es de 7.50 m y la de aspiración es la elevación -5.00 m, según la Figura 3.10. El resultado de aplicar la Ecuación 3.4 fue una carga de bombeo de 12.5 m.

5. Revisión de la resistencia del conducto propuesto, ante la sobrepresión del golpe de ariete empleando la Ecuación 3.5 (Valdez, 1994).

El módulo de elasticidad del agua es de 20,670 kg/cm² y el del acero de la tubería es de 2,100,000 kg/cm². La tubería propuesta tiene un espesor de 0.19 cm y con el cual la carga de trabajo que resiste es de 328 m.c.a. La sobrepresión que resultó de aplicar la Ecuación 3.5 fue de 185.92 m.c.a., sin embargo únicamente el 20% de la sobrepresión es absorbida por la tubería, el resto lo toma la válvula de cierre. Por lo tanto la carga total que se puede presentar en la tubería, sería la carga de bombeo (H_b) mas 20% de la sobrepresión por golpe de ariete. Siendo así, la carga total resulta de 50.66 m.c.a. la cual la tubería la resiste sin problema alguno.

6. Determinación del consumo energético por bombeo utilizando la Ecuación 3.7 (Adaptada de Valdez, 1994).

$$CE_b = 0.7458 \left(\frac{QH}{76 \eta} \right) (24 \text{ hr/día}) \quad (3.7)$$

Dónde:

CE_b=Consumo energético por bombeo (kWh)

Q=Gasto de entrada

H_b=Carga de bombeo (m)

η=Eficiencia de la bomba (%)

El resultado de aplicar la Ecuación 3.7 fue de 112 kWh/día. Por lo tanto, el consumo total de energía por día debido al bombeo sería de 203 kWh/día.

3.5. Factibilidad económica

El alcance de la factibilidad económica de este trabajo es únicamente hacer una aproximación de los costos de inversión, operación y mantenimiento a valor presente neto, con el objetivo de la magnitud

económica del proyecto. Para ésto, se dividió el cálculo en costos de inversión y costos de operación anual por consumo energético.

3.5.1. Costos de inversión

Para calcular los costos de inversión de la propuesta, primero se elaboró un cálculo aproximado de los volúmenes de excavación en roca, demolición y construcción de elementos de concreto armado, los cuales se resumen a continuación en la Tabla 3.4.

Tabla 3.5 Resumen del volumen de excavación en roca, demolición y construcción de elementos de concreto armado

Demolición de elementos actuales de concreto		Volumen (m ³)		
Discos biológicos				18.2
Filtros percoladores				12.5
Sedimentador secundario de lodos activados				10.5
Sedimentador secundario discos biológicos				6.5
Sedimentador secundario filtros percoladores				6.5
Filtros de arena				15.4
Total				69.6

Excavación en roca	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Volumen (m ³)
Tanque de igualación	15.95	7.25	7.0	809
Lodos activados	17.80	4.70	0.9	75
Sedimentador secundario	22.82	5.38	2.0	245
Total				1130

Construcción de firmes de concreto armado	Largo (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Volumen (m ³)
Tanque de igualación	15.95	7.25	0.50	58
Desarenador	6.00	3.00	0.10	2
RBLM	12.10	3.25	0.15	6
Lodos activados	17.80	4.70	0.15	13
Sedimentador secundario	22.62	5.38	0.15	18
Total				96

Construcción de muros de concreto armado	Longitud (m)	Altura (m)	Espesor (m)	Volumen (m ³)
Tanque de igualación	53.65	12.50	0.30	201
RBLM	38.70	3.40	0.15	20
Lodos activados	45.00	5.00	0.15	34
Sedimentador secundario	56.00	5.00	0.15	42
Total				297

Una vez obtenidos los volúmenes de excavación en roca, demolición y construcción de elementos de concreto armado, se procedió a elaborar el cálculo de los costos de inversión (Tabla 3.5) en donde se incluye el costo de los equipos más representativos de la propuesta.

Tabla 3.6 Costos de inversión en pesos

Concepto	Unidad	Cantidad	Unidades	P. U. + IVA	Importe	Referencia
Demolición de elementos de concreto armado a mano	m ³	35	\$/m ³	\$ 180	\$ 6,210	Carmona y Belmont, 2011
Demolición de elementos de concreto armado a maquina	m ³	35	\$/m ³	\$ 130	\$ 4,485	Carmona y Belmont, 2011
Excavación en roca a maquina	m ³	1130	\$/m ³	\$ 140	\$ 158,242	Carmona y Belmont, 2011
Construcción de firmes de concreto armado	m ³	96	\$/m ³	\$ 2,500	\$ 240,802	Carmona y Belmont, 2011
Relleno de concreto ciclópeo para elevar reactores	m ³	59	\$/m ³	\$ 2,000	\$ 118,000	Carmona y Belmont, 2011
Construcción de muro de concreto armado a gran altura	m ³	297	\$/m ³	\$ 3,000	\$ 890,024	Carmona y Belmont, 2011
Tubería de acero de 152 mm	m	75	\$/m	\$ 1,330	\$ 99,750	Varela, 2008
Tubería de acero de 270 mm	m	40	\$/m	\$ 2,476	\$ 99,750	Varela, 2008
Soportes de película biológica para el RBLM tipo "ABC5"	m3	50	\$/m ³	\$ 10,940	\$ 544,968	Gadot, 2011
Equipo Microfiltración SIEMENS EFC 10800	unidad	1	\$/unidad	\$ 745,000	\$ 745,000	CATA, 2011
Desarenador Huber - COANDA complete plant Ro 5C"	unidad	1	\$/unidad	\$ 928,000	\$ 928,000	García, 2010
Bomba para aguas residuales de 85 l/s (25 HP)	unidad	1	\$/unidad	\$ 124,000	\$ 124,000	CATA, 2011
Bomba para aguas residuales de 25 l/s (25 HP)	unidad	2	\$/unidad	\$ 89,000	\$ 178,000	CATA, 2011
Soplador para una tasa de oxígeno de 7.5 kg O ₂ /hr	unidad	1	\$/unidad	\$ 68,000	\$ 68,000	CATA, 2011
Soplador para una tasa de oxígeno de 23 kg O ₂ /hr	unidad	1	\$/unidad	\$ 205,000	\$ 205,000	CATA, 2011
Difusores de burbuja fina	unidad	100	\$/unidad	\$ 299.25	\$ 29,925	Koslan, 2011
Mezclador mecánico para 600 m ³ .	unidad	2	\$/unidad	\$ 285,000	\$ 570,000	CATA, 2011
Tablero de control automático	unidad	1	\$/unidad	\$ 250,000	\$ 250,000	García, 2010
Medidor de flujo	unidad	1	\$/unidad	\$ 88,000	\$ 88,000	García, 2010
Analizador de O ₂ disuelto	unidad	2	\$/unidad	\$ 100,000	\$ 200,000	García, 2010
Ingeniería avanzada: Detalle mecánico, detalle arquitectónico, instalación y control (15% del total)	Lote	1	\$/Lote	\$ 832,117	\$ 832,117	García, 2010
Inversión total					\$ 6,379,563	

3.5.2. Costos de operación anual por consumo energético

Los costos de operación anuales por consumo energético más representativos de la propuesta se resumen a continuación en la Tabla 3.6. Para el cálculo de éstos se tomó una tarifa promedio de 2.2 \$/kWh, establecida por la Comisión Federal de Electricidad como tarifa para servicio público (CFE, 2011).

Tabla 3.7 Costos de operación anual por consumo energético más representativos de la propuesta, en pesos

Concepto	Unidad	Cantidad	Días	Unidades	Precio Unitario	Importe
Energía Tanque de igualación	kWh/día	35	365	\$/kWh	\$ 2.2	\$ 28,307
Energía RBLM	kWh/día	418	365	\$/kWh	\$ 2.2	\$ 334,083
Energía lodos activados	kWh/día	136	365	\$/kWh	\$ 2.2	\$ 108,334
Energía microfiltración	kWh/día	864	365	\$/kWh	\$ 2.2	\$ 689,787
Energía bombeo	kWh/día	203	366	\$/kWh	\$ 2.2	\$ 162,723
Total						\$ 1,323,234

3.5.3. Valor presente neto de la propuesta

Por último se llevó a cabo un análisis de valor presente neto a los 10 años de proyecto de la propuesta, con una tasa de 400 puntos base sobre la Tasa de Interés Interbancaria de Equilibrio (TIIE) interés fijada por el Banco de México para el mes de marzo del año 2011 de 4.5% (BANXICO, 2011). Tomando la TIIE de 4.5% mas los 400 puntos base, la tasa de interés sería de 9.5%. El análisis a valor presente (Tabla 3.7) únicamente toma en cuenta la inversión inicial y el consumo energético anual.

Tabla 3.8 Valor presente neto de la propuesta, en pesos

Periodo	Característica	Costo	VPN
Año 0	Inversión	\$ 6,379,563	\$ 6,379,563
Año 1	Consumo energético	\$ 1,323,234	\$ 1,448,941
Año 2	Consumo energético	\$ 1,323,234	\$ 1,586,591
Año 3	Consumo energético	\$ 1,323,234	\$ 1,737,317
Año 4	Consumo energético	\$ 1,323,234	\$ 1,902,362
Año 5	Consumo energético	\$ 1,323,234	\$ 2,083,086
Año 6	Consumo energético	\$ 1,323,234	\$ 2,280,980
Año 7	Consumo energético	\$ 1,323,234	\$ 2,497,673
Año 8	Consumo energético	\$ 1,323,234	\$ 2,734,952
Año 9	Consumo energético	\$ 1,323,234	\$ 2,994,772
Año 10	Consumo energético	\$ 1,323,234	\$ 3,279,275
VPN-Acumulado			\$ 28,925,512

Esta página se dejó intencionalmente en blanco