

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 Antecedentes de la Planta Potabilizadora Centro de la Ciudad de Nuevo Laredo, Tamaulipas**

La Planta Potabilizadora Centro de la Ciudad de Nuevo Laredo, Tamaulipas, se ubica en un predio de forma irregular, definido al norte por la margen derecha del Río Bravo y al sur por el parque Narciso Mendoza, limitándose al este por el edificio del Centro de Salud y al oeste por predios privados.

Anexos al predio de la planta y dentro de ese perímetro, se encuentran edificios ya desmantelados, que albergan diversas instalaciones de generación eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad.

La obra inicial, realizada por la Junta Federal de Mejoras Materiales de Nuevo Laredo, se hizo en 1924, para una capacidad de 100 l/s, con dosificadores de reactivos, mezcla rápida, sedimentador convencional de tolvas múltiples y filtración.

La primera ampliación la realizó la misma Junta en el periodo de 1936 a 1939, construyéndose un nuevo sedimentador convencional, del tipo de flujo longitudinal y nuevos dosificadores y filtros, elevando su capacidad nominal a 208 l/s.

La segunda etapa de ampliación, que abarcó de 1948 a 1951, comprendió la construcción de un segundo sedimentador de flujo longitudinal y la dotación completa de dos filtros ya existentes, para elevar la capacidad nominal a un total de 301 l/s.

En el periodo de 1956 a 1957, se realizó la tercera etapa de ampliación, con la instalación del aireador de cascada, de los presedimentadores circulares, de dos clarificadores integrales de flujo ascendente (tipo Accelerator) y de cuatro nuevos filtros, hasta lograr una capacidad total de 602 l/s. En esta etapa de ampliación desapareció un sedimentador original, de tipo de tolvas, que se convirtió en una cisterna de agua tratada.

En el periodo de 1968 a 1969, tuvo lugar la cuarta etapa de ampliación, con la construcción e instalación de 2 clarificadores integrales (tipo Walker Process). En esta etapa de ampliación se demolió una parte del sedimentador convencional, construido en el periodo de 1948 a 1951, para acomodar los nuevos clarificadores <sup>(Ref. 1)</sup>

En 1988, la administración del organismo operador, debido al drástico crecimiento poblacional, industrial y comercial, proyectó una ampliación para cubrir las necesidades presentes y futuras de esa época.

Según los cálculos realizados por el personal técnico del organismo operador, así como por los gobiernos federal y estatal, la ampliación de la planta potabilizadora centro fue considerada de vital importancia para dar un servicio óptimo a la principal frontera terrestre del país.

Para llevar a cabo tal proyecto se obtuvo un crédito a través de "Banobras" para ampliar la planta potabilizadora y aumentar de 1,200 a 2,000 lps y tener la

capacidad necesaria, de acuerdo con el crecimiento sistemático de los usuarios. Financiados por tal crédito y por inversiones directas, no sólo se dio énfasis a la ampliación de la planta, sino también, al equipamiento urbano, a la modernización de las instalaciones, a los sistemas de rebombeo y a la efficientización de los esquemas administrativos.

Dentro de la ampliación, fue rehabilitado el cárcamo seco existente, además del cambio de líneas de succión de 16" a 24 " de diámetro; también fue reemplazada una bomba de captación, de 250 lps por otra de 500 lps. Estas acciones dieron como resultado la captación de un total de 1,000 lps. Se construyó, además, un cárcamo adicional con 2 bombas de 600 lps. de succión produciendo un total de 1200 lps.

En el cárcamo húmedo, fueron rehabilitados los sistemas eléctricos y mecánicos, para mejorar la eficiencia de los tres equipos instalados, los cuales captan en total 850 lps, que sumados a los anteriores, representan un total de 3,050 lps.

Fue construido un cárcamo auxiliar, en las Riberas del Bravo, el cual alberga 2 bombas centrifugas, con capacidad de succión de 600 lps. En los procesos de clarificación para poder cubrir la meta de tratar 2,000 lps. fue necesario rediseñar el clarificador circular norte, el cual era convencional y se convirtió la mitad del clarificador en un sistema de floculación mecánico con paletas de eje horizontal, distribuido en cuatro trenes, la otra mitad en un sedimentador de alta tasa, mediante la colocación de módulos sedimentadores de PVC y canales recolectores de agua clarificada. Esta unidad así convertida, tendría la capacidad de tratamiento de 1,000 lps, la cual aunada a los seis

clarificadores existentes lograrían procesar los 2,000 lps proyectados; sin embargo, nunca se pudieron producir más de 500 lps., debido a que los orificios de los canales recolectores no fueron del diámetro adecuado, ya que el agua se derramaba por encima de los bordes de estos; además, porque la tubería de alimentación al clarificador en mención (36" diámetro) antes de llegar a éste, tiene una derivación para alimentar 2 clarificadores de manto de lodos (acelator infilco) con lo cual se reducía el caudal que llegaba a la estructura antes citada.

Además de lo anterior, fue necesario culminar la construcción y equipamiento de cuatro filtros de 140 m<sup>2</sup> de superficie cada uno.

En materia de desinfección, fueron sustituidos los cloradores anteriores por dos equipos con capacidad de dosificación de hasta 900 Kg por día, cada uno. (Ref. 8)

## **1.2 Descripción de los problemas.**

En los últimos años se han presentado problemas de operación en el clarificador circular norte de la Planta potabilizadora Centro de la Ciudad de Nuevo Laredo, Tamaulipas y por ende, tuvo lugar una baja en la calidad del agua (como se demuestra en el apéndice E ), en virtud de que el sistema de floculación actual es mecánico, de paletas de eje horizontal, impulsado por motores de 5 HP, repartidos en cuatro trenes y debido a que el excesivo peso de las paletas, los ejes y las bridas, ha ocasionado el desgaste continuo y severo de las chumaceras de apoyo. El proveedor de las chumaceras

solamente garantiza éstas por un periodo de 2 años, siempre y cuando exista una alineación perfecta de los ejes y que éstos sean de material "Babit", lo cual ha sido difícil de conseguir, por lo cual anualmente han tenido que ser reemplazadas las chumaceras, lo que representa un alto impacto económico para el organismo operador, denominado Comisión Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Nuevo Laredo, Tamaulipas, tal como se demuestra en el capítulo 5.

### **1.3 Objetivo de este trabajo.**

Mejorar la eficiencia del clarificador circular norte de la Planta Potabilizadora Centro de la Ciudad de Nuevo Laredo, Tamaulipas, cambiando el sistema de floculación actual, el cual es un sistema mecánico de paletas de eje horizontal a un sistema hidráulico de pantallas vertical, con el cual se buscará duplicar la capacidad actual de tratamiento de 500 lps a 1000 lps y eliminar el mantenimiento de equipos y consumo de energía eléctrica.

## **CAPÍTULO 2**

### **MATERIALES Y METODOS**

#### **2.1 Fundamentos de la floculación.**

El objetivo principal de la floculación es reunir las partículas desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño, que sedimenten con mayor eficiencia.

Normalmente, la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas, en el cual intervienen tres mecanismos de transporte:

- a) Floculación pericinéctica o Browniana debida a la energía térmica del fluido.
- b) Floculación ortocinéctica o gradiente de velocidad, producida en la masa del fluido en movimiento.
- c) Sedimentación diferencial, debida a las partículas grandes; las cuales, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas que van descendiendo lentamente y las aglomeran.

Al dispersarse el coagulante en la masa del agua, se precisa de la floculación pericinéctica para que las partículas coloidales de tamaño menor a 1 micra empiecen a aglutinarse. Es el movimiento Browniano el que actúa dentro de este nivel de tamaño de partículas, formando el microflóculo inicial. Recién

cuando éste alcanza el tamaño de 1 micra, empieza a actuar la floculación ortocinética promoviendo su mayor desarrollo. Este mecanismo ha sido estudiado en lugares donde la temperatura baja a alrededor de cero grados, con lo cual se anula el movimiento Browniano y, por consiguiente, también la floculación pericinética. En este caso, se comprobó que la floculación ortocinética es totalmente ineficiente, y no tiene importancia alguna sobre partículas tan pequeñas.

Bratby, en 1980, encontró que si los gradientes de velocidad en el agua son mayores de  $5 \text{ s}^{-1}$  y las partículas tienen un diámetro mayor que un micrón, el efecto de la floculación pericinética es despreciable.

Por otro lado, el proceso de floculación pericinética sólo es sumamente lento, precisándose alrededor de 200 días para reducir a la mitad un contenido de 10,000 virus/ml, en una muestra de agua.

Por lo tanto, la aglomeración de las partículas es el resultado de la actuación de los tres mecanismos.

Las primeras teorías sobre la cinética de la floculación fueron desarrolladas por Smoluchowski, quien derivó las expresiones básicas para la frecuencia de colisión de las partículas, sujetas al efecto del movimiento Browniano y en régimen de flujo laminar, desarrollando la siguiente expresión, representativa de la floculación pericinética.

$$J = 1/6 n_1 n_2 (d_1 + d_2) dv/dz \quad (1)$$

Donde:

$J$  = es el número de colisiones entre las partículas

$n_1 =$  es la concentración de partículas de diámetro ( $d_1$ )

$n_2 =$  es la concentración de partículas de diámetro ( $d_2$ )

$dv/dz =$  es la energía desarrollada en el proceso.

Camp y Stein fueron los primeros en darse cuenta de que, para fines prácticos, era necesario añadirle turbulencia al proceso. Ellos generalizaron la ecuación de Smoluchowski, para incluir las condiciones de flujo turbulento. Así, de acuerdo con la expresión de Camp y Stein, la frecuencia de colisiones está expresada por la ecuación:

$$H_{ij} = 4/3 \cdot n_i \cdot n_j \cdot R_{ij} \cdot G \quad (2)$$

Donde:

$H_{ij} =$  es el número de colisiones por unidad de tiempo y por unidad de volumen, entre las partículas de radio ( $R_i$ ) y ( $R_j$ ); ( $n_i$ ) y ( $n_j$ ) son las concentraciones de las partículas colisionantes; ( $R_{ij}$ ) es el radio de colisión ( $R_i + R_j$ ) y ( $G$ ) es el gradiente de velocidad que según ellos era igual a:

$$G = \sqrt{E / \nu} \quad (3)$$

Donde:

$E =$  es la potencia total por unidad de volumen del fluido.

$\nu =$  es la viscosidad cinemática.

La principal objeción a la expresión de Camp y Stein se basa en el hecho de que esta ecuación fue deducida para condiciones de flujo laminar y que pierde mucho de su sentido físico cuando se aplica a floculadores reales, los que en su mayor parte tienen flujo turbulento.

Los gradientes de velocidad de una escala de longitud dada no contribuirán significativamente a la colisión de partículas más grandes o



pequeñas que esta escala. Así, el rígido modelo mecánico desarrollado por Smoluchowsky para condiciones de flujo laminar no es enteramente aplicable a la floculación turbulenta.

Harris y otros,<sup>(Ref 9)</sup> partiendo de la ecuación de Smoluchowsky, establecieron un modelo matemático para la velocidad de aglomeración de las partículas, admitiendo que el volumen de la partícula resultante es igual a la suma de los volúmenes de las partículas aglomeradas y que su densidad permanece constante. A la menor de las partículas agregadas, se le llama partícula primaria y su concentración por unidad de volumen es ( $n_1$ ). Una fracción de las partículas que colisionan se aglomera, otra no se aglomera y otras se pueden desaglomerar, dependiendo de las características de las partículas, del coagulante y del flujo.

Los principales factores que influyen en la eficiencia de este proceso son:

1.- La naturaleza del agua.- La coagulación y por consiguiente, la floculación, son extremadamente sensibles a las características físico-químicas del agua sin tratar, tales como la alcalinidad, el pH y la turbiedad, etc.

Algunos iones presentes en el agua pueden influir en el equilibrio físico-químico del sistema, en la generación de cadenas poliméricas de los hidróxidos que se forman, o en la interacción de estos polímeros con las partículas coloidales, afectando el tiempo de floculación.

La concentración y la naturaleza de las partículas que producen la turbiedad también tienen una notable influencia en el proceso de floculación. En todos los modelos matemáticos de floculación, la velocidad de formación de floculos es proporcional a la concentración de partículas. Por regla general, es

más fácil flocular agua con elevada turbiedad y que presente una amplia distribución de tamaños de partículas. En tanto, las partículas de mayor tamaño, que podrían ser removidas en tanques de sedimentación simple, tales como arena fina acarreada durante picos de elevada turbiedad, interfieren con la floculación inhibiendo o impidiendo el proceso. Por ese motivo cuando la turbiedad del agua sin tratar fuera igual o superior a 1,000 UT, es indispensable la utilización de tanques de presedimentación.

Un caso particular de floculación, donde se manifiesta claramente la influencia de la concentración de las partículas, es la floculación en manto de lodos. Estas unidades, son generalmente, parte integrante de sedimentadores de flujo vertical, con la floculación procesándose en la parte inferior, normalmente en forma cilindro-cónica, donde se concentran los lodos depositados.

2.- Influencia del tiempo de floculación. En todos los modelos propuestos para la floculación, la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo. En determinadas condiciones, existe un tiempo óptimo para la floculación, normalmente entre 20 y 40 minutos. A través de ensayos de prueba de jarras se puede determinar este tiempo. La permanencia del agua en el floculador, durante un tiempo inferior o superior al óptimo, produce resultados inferiores; tanto más acentuados cuanto más se aleje éste del tiempo óptimo de floculación. Es necesario, por lo tanto, que se adopten medidas para aproximar el tiempo real de retención del tanque de floculación al tiempo nominal escogido. Se puede obtener esto, compartimentalizando el tanque de

floculación con pantallas deflectoras. Cuanto mayor sea el número de compartimentos, menores serán los cortocircuitos del agua.

3.- Influencia del gradiente de velocidad. Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas. Mientras tanto, a medida que los flóculos aumentan de tamaño, crecen también las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico que ejercen sobre ellos, inducidos por el gradiente de velocidad. Los flóculos crecerán hasta un tamaño máximo, encima del cual, las fuerzas de cizallamiento alcanzan una intensidad que los rompe en partículas menores.

La resistencia de los flóculos depende de una serie de factores:

- a) De su tamaño, forma y compactación.
- b) Del tamaño, forma y naturaleza de las micropartículas
- c) Del número y forma de los ligamentos que unen a las partículas.

4.- Influencia de la variación del caudal. Es conocido que, al variarse el caudal de operación de la planta, se modifican los tiempos de residencia y los gradientes de velocidad en los reactores.

El floculador hidráulico es algo flexible a estas variaciones; al disminuir el caudal, aumenta el tiempo de retención y disminuye el gradiente de velocidad. Al aumentar el caudal, el tiempo de retención disminuye, el gradiente de velocidad se incrementa y viceversa, variando el número de Camp, en aproximadamente un 20% cuando la variación del caudal es del 50 %.

En el floculador mecánico, el efecto es más perjudicial, debido a su poca flexibilidad; ya que la velocidad permanece constante y el tiempo de residencia aumenta o disminuye, según varíe el caudal. <sup>(Ref. 9)</sup>

## 2.2 Generación de alternativas de solución.

Según el tipo de energía usada para producir la agitación, los floculadores pueden clasificarse en hidráulicos, mecánicos e hidromecánicos<sup>(Ref. 2)</sup>, tal clasificación se muestra en la tabla N° I.

TABLA N° I

### CLASIFICACIÓN DE FLOCULADORES

| SEGÚN LA ENERGÍA DE AGITACIÓN | SEGÚN EL SENTIDO DEL FLUJO | DESCRIPCIÓN  | NOMBRE         |
|-------------------------------|----------------------------|--|----------------|
| Hidráulicos                   | Flujo horizontal           | Con tabiques de ida y regreso                            | De tabiques    |
|                               | Flujo vertical             | Con tabiques arriba y abajo del tanque                   |                |
|                               |                            | Con codos en el fondo que proyectan el agua hacia arriba | Alabama        |
|                               |                            | Con entrada lateral al tanque                            | Cox            |
| Mecánicos                     | Rotatorios                 | De paletas de eje horizontal o vertical                  | De paletas     |
|                               |                            | De turbinas horizontal o vertical                        | De turbinas    |
|                               | Reciprocantes              | Rejas o cintas oscilantes                                | Reciprocantes  |
| Hidromecánicos                | Flujo horizontal           | De turbina Pelton y paletas horizontales                 | Hidromecánicos |

### **2.2.1. - Flocladores mecánicos.**

#### **2.2.1.1. - Floclador mecánico de eje horizontal.**

El sistema actual en el clarificador circular norte de la Planta Potabilizadora Centro de Nuevo Laredo, Tamaulipas, es del tipo mecánico de paletas de eje horizontal. Entre los principales inconvenientes se encuentran los siguientes:

- El peso excesivo, tanto de los ejes como de las paletas, lo que redundaría en un desgaste prematuro de las chumaceras de apoyo.
- El alto costo que implicaría cubrir las chumaceras con una camisa de acero inoxidable, pues son 32.
- La corta duración de las chumaceras de Babbit, que sólo se garantizan por un periodo de un año y deberían durar dos años, con un mantenimiento adecuado (engrasado).

#### **2.2.1.2. - Floclador mecánico vertical.**

Otro tipo de floclador, el mecánico, que podría ser más eficiente, es el de eje vertical; sin embargo, éste no elimina los costos de mantenimiento ni de energía eléctrica, y debido a lo deteriorado de las finanzas del organismo operador, el gasto de consumo de energía eléctrica y mantenimiento es el que más impacta, por lo que se propone un sistema hidráulico.

## 2.2.2 Floculadores hidráulicos.

### 2.2.2.1. - Floculadores de tabiques.

Los floculadores hidráulicos provistos de pantallas, derivan su energía para la agitación de la masa líquida, de la carga de velocidad que el flujo adquiere al escurrir por un conducto. Consisten en tanques entre los cuales el agua circula con una velocidad fija, produciendo cierta turbulencia en cada cambio de dirección del flujo.

Los hay de flujo horizontal y de flujo vertical. En los primeros, el flujo va y viene alrededor de los tabiques, haciendo un giro de 180°, al final de cada uno. En los segundos, el flujo sube y baja, en condiciones similares. (Ref. 2)

2.2.2.1.1. - Floculador de pantallas de flujo horizontal. La unidad puede estar configurada de diversas formas: puede constar de un solo tanque con tres o cuatro tramos con diferentes anchos de canales, o tres o cuatro tanques con anchos de canales diferentes en cada uno. El agua circula horizontalmente, por entre los canales. Los canales pueden ser conformados por muros o tabiques de concreto, o bien por pantallas de asbesto cemento o madera machihembrada. Los muros de concreto impiden que se puedan efectuar modificaciones o ampliaciones posteriores, por lo que es más usual construirlos con pantallas removibles.

El fondo debe tener un desnivel o pendiente de acuerdo con la pérdida de carga en cada tramo, para que la altura del agua sea uniforme y, por lo tanto, la velocidad y el gradiente de velocidad también.

Las placas deben estar sujetas de tal manera que no se muevan al paso del agua y mantengan su paralelismo.

#### **VENTAJAS:**

- Es una unidad muy simple de construir y operar.
- Es muy eficiente. Cuando está bien diseñada, el tiempo de retención teórico y el normal son prácticamente iguales, anulándose la posibilidad de formación de espacios muertos y cortocircuitos.
- Su funcionamiento es totalmente hidráulico, por lo que la operación es muy confiable y económica, al no requerir energía eléctrica.

#### **RESTRICCIONES**

- Es una solución recomendable sólo para plantas medianas o pequeñas.

2.2.2.1.2. - Flocculador de pantallas de flujo vertical. La unidad debe tener un volumen que reproduzca el tiempo total de floculación que optimiza el proceso. Debe estar compuesta por varios canales, con compartimentos de diferentes anchos, que reproduzcan velocidades decrecientes entre el primero y el último canal. El agua circula por los canales, en forma vertical. Las pantallas para formar los compartimentos, en cada canal, pueden ser paredes de concreto, placas de asbesto cemento o madera machihembrada.

#### **VENTAJAS**

- Es una unidad muy simple de construir y operar.
- Es muy eficiente. Cuando está bien diseñada, el tiempo de retención teórico y el normal son prácticamente iguales, anulándose la posibilidad de formación de espacios muertos y cortocircuitos.
- Su funcionamiento es totalmente hidráulico, por lo que la operación es muy confiable y económica, al no requerir de energía eléctrica.
- Es una solución muy adecuada para plantas medianas a grandes. Por su gran profundidad, requiere de áreas pequeñas y se logran diseños muy compactos.

#### RESTRICCIONES

- Acumula lodos en el fondo de los compartimentos, pero esto se puede solucionar, tal como se analiza en el punto 2.4.6.

#### CRITERIOS BÁSICOS.

- La unidad debe tener el volumen apropiado para obtener el tiempo de floculación con el que se optimiza la formación del flóculo, el cual debe determinarse en el laboratorio por simulación del proceso.
- Las velocidades en los canales de los tramos deben estar ordenadas en forma decreciente, para acompañar la formación del flóculo.
- Las velocidades en los canales deben corresponder a los gradientes de velocidad que optimizan el proceso, los cuales se deben determinar en el laboratorio por simulación del proceso.



- La velocidad en los pasos entre un canal y otro debe ser  $\frac{2}{3}$  partes de la velocidad de los canales.

## **CRITERIOS DE DISEÑO**

- El nivel del agua dentro de la unidad debe mantenerse siempre por debajo del nivel máximo de las placas, para evitar la formación de cortocircuitos (porcentaje del caudal que no participa del proceso).
- Debe mantenerse el caudal del diseño de las unidades para que no se alteren los parámetros de diseño. Al disminuir el caudal, el tiempo de retención se incrementa y los gradientes de velocidad disminuyen; al aumentar el caudal, el efecto es a la inversa, el tiempo de retención disminuye y los gradientes de velocidad se incrementan. Estas variaciones afectan la formación del flóculo.

### **2.3 Selección de la mejor alternativa.**

En virtud de que los sistemas mecánicos plantean el inconveniente de una operación más costosa y sofisticada, según se comentó en cada caso, quedan para el análisis de evaluación los sistemas hidráulicos. De éstos se comentó exclusivamente el modelo de pantallas, pero también existen los de otro tipo, como el tipo "Alabama" o el tipo "Cox". Sin embargo, se consideran más eficientes los de pantallas, por lo que serán descartados los demás. Entre éstos, el de flujo horizontal presenta la limitante de que sólo es recomendable

para plantas pequeñas o medianas, según se mencionó con anterioridad y dada la limitante de espacio en la estructura existente, se optará por uno de flujo vertical, el cual es más eficiente, por lo que requiere de una menor superficie, ya que se pretende producir 1,000 lps divididos en dos módulos de 500 lps cada uno.

## **2.4 Procedimiento de diseño.**

### **2.4.1 Parámetros y recomendaciones de diseño de un floculador de pantallas de flujo vertical.**

- Solución recomendable para plantas de más de 100 l/s.
- Se proyectan para profundidades de 3 a 4 m o más, por lo que ocupan un área menor que las unidades de flujo horizontal.
- Los tabiques pueden ser de madera o de asbesto-cemento.
- Las restricciones para el uso de pantallas de asbesto cemento son las mismas que las indicadas con anterioridad. Con este tipo de tabiques se recomienda utilizar una altura máxima de agua de 2.00 a 3.00 m de preferencia 0.20 m menor que la altura de paso (orificio de comunicación entre dos canales verticales), más la longitud mayor de una pantalla: 2.44 m. Pueden proyectarse para alturas mayores, traslapando pantallas y empernándolas. Se debe tener especial cuidado durante el llenado de este tipo de unidades, para evitar roturas de pantallas.
- La sección de cada paso se calculará para una velocidad igual a las 2/3 partes de la velocidad en los canales.

- El gradiente de velocidad en el canal no deberá ser menor de  $20 \text{ S}^{-1}$ . En plantas grandes se pueden colocar, en los orificios de paso, mallas diseñadas con el gradiente de velocidad apropiado.
- Para evitar la acumulación de lodos en el fondo y facilitar el vaciado del tanque, se dejará en la base de cada tabique que llega hasta el fondo, una abertura equivalente al 5% del área horizontal de cada compartimento.
- Estructuralmente, es más confiable el uso de tabiques de madera machihembrada de 1.5" a 2.0", pudiendo adoptarse en este caso alturas de agua de 4 a 5 m. Con este tipo de solución se reduce apreciablemente el área de la unidad, lo cual es especialmente ventajoso en plantas grandes.
- Al igual que en las unidades de flujo horizontal, debe tenerse especial cuidado en la adopción del ancho de la unidad, para que en el diseño de los tramos con bajos gradientes de velocidad, las pantallas se entrecrucen por lo menos en  $1/3$  de su longitud, evitándose la formación de espacios muertos y cortocircuitos. (Ref. 3)

#### 2.4.2. - Criterios para el dimensionamiento

- La selección del número aproximado (m) de compartimentos por tramo o canales de gradiente constante, se puede determinar utilizando el criterio de Richter. (Ref. 3)

$$m = 0.045 \sqrt[3]{\left[ \frac{(b \times L \times G)}{Q} \right]^2 t} \quad (4)$$

b.- Ancho del tramo o canal (m).

L.- Longitud del tramo (m)

G.-Gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )

t.- Tiempo de retención del tramo (min.).

- La pérdida de carga en las vueltas ( $h_2$ ) se calcula mediante la expresión:

$$h_2 = (m+1) \frac{V_1^2 + mV_2^2}{2g} \quad (5)$$

$V_1$ .- Velocidad en los canales.

$V_2$ .- Velocidad en los pasajes u orificios de paso de un compartimento a otro.

- La velocidad en los pasajes ( $v_2$ )

$$V_2 = 2/3 V_1 \quad (6)$$

- El gradiente de velocidad en los canales ( $G_1$ ) se comprueba mediante la expresión:

$$G_1 = n \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} R_H^{-0.7} V_1^{1.5} \quad (7)$$

n.- Coeficiente de la formula de Manning.

$R_H$ .- Radio Hidráulico del canal.

### **2.4.3. Análisis del Proceso a Gasto de Diseño.**

En virtud de que uno de los objetivos del proyecto es producir un gasto de 1,000 lps divididos en dos módulos de 500 lps cada uno, el análisis se presenta a continuación en la tabla II para un gasto máximo de diseño de 500 lps<sup>(Ref. 3,5,6)</sup>

TABLA II

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS                                     | SÍMBOLO    | UNIDAD            | CRITERIOS  | CÁLCULOS | RESULTADOS                               | UNIDAD.        |
|------|---|------------|-------------------|--|----------|--|----------------|
| 1    | CAUDAL                                    | Q =        | M <sup>3</sup> /S | $V = 60 Q \cdot T$                                   |          |  |                |
|      | TIEMPO TOTAL DE FLOCULACIÓN               | T =        | MIN               |  | 600.00   | VOLUMEN TOTAL DE LA UNIDAD               | M <sup>3</sup> |
| 2    | LONGITUD DE LA UNIDAD                     | L =        | M                 | $B = V/H \cdot L$                                    |          |  |                |
|      | PROFUNDIDAD DEL FLOCULADOR                | H =        | M                 |  | 2.06     | ANCHO TOTAL DE LA UNIDAD                 | M              |
| 3    | ANCHO DEL PRIMER CANAL                    | b =<br>L = | M                 | $t = H \cdot b \cdot L / Q \cdot 60$                 | 6.22     | TIEMPO DE RETENCIÓN PRIMER CANAL         | MIN.           |
| 4    | GRADIENTE DE VELOCIDAD EN EL PRIMER TRAMO | G =        | S <sup>-1</sup>   | $m = 0.045((b \cdot L \cdot G / Q)^2 \cdot t)^{1/3}$ | 26       | NUMERO DE COMPARTIMENTOS ENTRE PANTALLAS | No.            |
| 5    | ESPESOR DE LAS PANTALLAS                  | e =<br>e = | PULG.<br>M.       | $a = L - e(m-1)/m.$                                  | 0.83     | ESPACIAMIENTO ENTRE PANTALLAS            | M              |
|      |   |            |                   |  |          |  |                |
|      |   |            |                   |  |          |  |                |

TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS                                | SÍMBOLO | UNIDAD | CRITERIOS   | CÁLCULOS | RESULTADOS   | UNIDAD         |
|------|--------------------------------------|---------|--------|---|----------|--|----------------|
| 6    |                                      |         |        | $V_1 = Q/a \cdot b$                               | 0.287    | VELOCIDAD EN LOS CANALES                                   | M/S            |
| 7    |                                      |         |        | $V_2 = 2/3 V_1$                                   | 0.191    | VELOCIDAD EN LOS PASAJES                                   | M/S            |
| 8    |                                      |         |        | $A = Q/V_2$                                       | 2.62     | ÁREA DEL PASO INFERIOR                                     | M <sup>2</sup> |
|      |                                      |         |        | $e_t = A/b$                                       | 1.25     | ALTURA DEL ESPACIO INFERIOR                                | M              |
|      |                                      |         |        | $I = 60 \cdot V_1 \cdot t$                        | 107.11   | EXTENSIÓN TOTAL DEL PRIMER CANAL                           | M              |
| 9    |                                      |         |        | $R_H = a \cdot b / 2(a + b)$                      | 0.297    | RADIO HIDRÁULICO DEL PRIMER COMPARTIMENT O ENTRE PANTALLAS | M.             |
| 10   | COEFICIENTE DE LA FORMULA DE MANNING | $n =$   | CTE    | $h_1 = (n \cdot V_1 / (R_H)^{2/3})^{3/2} \cdot I$ | 0.008    | PÉRDIDA DE CARGA CONTINUA EN LOS CANALES                   | M.             |



TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS                                | SÍMBOLO     | UNIDAD | CRITERIOS                      | CÁLCULOS    | RESULTADOS                                | UNIDAD. |
|------|--------------------------------------|-------------|--------|--------------------------------|-------------|---|---------|
| 11   |                                      |             |        | $h_2 = (m+1)V_1^2 + mV_2^2/2g$ | $h_2 =$     | PÉRDIDA DE CARGA EN LAS VUELTAS           | M       |
| 12   |                                      |             |        | $h_r = h_1 + h_2$              | $h_r =$     | PÉRDIDA DE CARGA TOTAL EN EL PRIMER TRAMO | M       |
|      |                                      |             |        | $h_{fp} = hf/m$                | $h_{fp} =$  | PÉRDIDA DE CARGA POR PANTALLA             |         |
|      | CARGA EN EL PASO SUPERIOR (SUPUESTO) | $h_{v_u} =$ | M      | $h_{v_d} = h_{v_u} - h_{fp}$   | $h_{v_d} =$ | CARGA EN EL PASO SUPERIOR EN LA DESCARGA  | M       |
|      |                                      | 0.36        |        | $q = Q/b$                      | $q =$       | GASTO UNITARIO                            | M³/S.   |
|      |                                      |             |        | $h_{v_d} h_{v_u}$              | $=$         |   |         |
|      | COEFICIENTE (VER TABLA XIX, PAG. 87) | $\alpha =$  | CTE.   | $h_{v_u} = q/1.84\alpha$       | $h_{v_u} =$ | COMPROBACIÓN CARGA EN EL PASO SUPERIOR    | M       |
| 13   |                                      |             |        | $V_T = H^*b^*L - e(M-1)$       | $V_T =$     | VOLUMEN DEL TRAMO.                        | M³      |



TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS   | SÍMBOLO               | UNIDAD            | CRITERIOS   | CÁLCULOS | RESULTADOS                                      | UNIDAD.         |
|------|---|-----------------------|-------------------|---|----------|---|-----------------|
| 14   | VER TABLA XX, PAG. 88<br>$(\gamma/\mu)^{1/2} =$<br>$T = 20$ | 3,114.64              |                   | $G_1 = (\gamma/\mu)^{1/2} (h_r \cdot Q/V_T)^{1/2}$                    | 66.64    | COMPROBACIÓN DEL GRADIENTE EN EL 1ER CANAL      | S <sup>-1</sup> |
| 15   |   |                       |                   | $G_2 = n (\gamma/\mu)^{1/2} R_H^{-0.7} V^{1.5}$<br>$V = 60 Q \cdot T$ | 14.56    | COMPROBACIÓN DEL GRADIENTE EN EL CANAL VERTICAL | S <sup>-1</sup> |
| 1    | CAUDAL  | Q = 0.50              | M <sup>3</sup> /S |   |          |   |                 |
|      | TIEMPO TOTAL DE FLOCULACIÓN                                 | T = 20.00             | MIN               |   | 600.00   | VOLUMEN TOTAL DE LA UNIDAD                      | M <sup>3</sup>  |
| 2    | LONGITUD DE LA UNIDAD                                       | L = 73.75             | M                 | $B = V/H \cdot L$   |          |   |                 |
|      | PROFUNDIDAD DEL FLOCULADOR                                  | H = 3.73              | M                 |   | 2.18     | ANCHO TOTAL DE LA UNIDAD                        | M               |
| 3    | ANCHO DEL SEGUNDO CANAL                                     | b = 2.10<br>L = 22.50 | M                 | $t = H \cdot b \cdot L / Q \cdot 60$                                  | 5.87     | TIEMPO DE RETENCIÓN 2o. CANAL                   | MIN.            |

TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS                                      | SÍMBOLO | UNIDAD          | CRITERIOS                                      | CÁLCULOS         | RESULTADOS | UNIDAD.   |
|------|--|---------|-----------------|--|------------------|------------|---|
| 4    | GRADIENTE DE VELOCIDAD EN EL SEGUNDO TRAMO | G =     | S <sup>-1</sup> | $m = 0.045((b \cdot L \cdot G/Q)^{2/3})^{1/3}$ | m =              | 20         | NÚMERO DE COMPARTIMENTOS ENTRE PANTALLAS<br>No. |
| 5    | ESPESOR DE LAS PANTALLAS                   | e =     | PULG.           | $a = L \cdot e(m-1)/m$                         | a =              | 1.09       | ESPACIAMIENTO ENTRE PANTALLAS<br>M              |
|      |  | e =     | M.              |  |                  |            |   |
| 6    |  |         |                 | $V_1 = Q/a \cdot b$                            | V <sub>1</sub> = | 0.218      | VELOCIDAD EN LOS CANALES<br>M/S                 |
| 7    |  |         |                 | $V_2 = 2/3 V_1$                                | V <sub>2</sub> = | 0.145      | VELOCIDAD EN LOS PASAJES<br>M/S                 |
| 8    |  |         |                 | $A = Q/V_2$                                    | A =              | 3.45       | ÁREA DEL PASO INFERIOR<br>M <sup>2</sup>        |
|      |  |         |                 | $e_r = A/b$                                    | e <sub>r</sub> = | 1.64       | ALTURA DEL ESPACIO INFERIOR<br>M                |
|      |  |         |                 | $I = 60 \cdot V_1 \cdot t$                     | I =              | 76.78      | EXTENSION TOTAL DEL 2o. CANAL<br>M              |
|      |  |         |                 |  |                  |            |   |

TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS   | SÍMBOLO     | UNIDAD | CRITERIOS                              | CÁLCULOS    | RESULTADOS   | UNIDAD. |
|------|---|-------------|--------|--|-------------|--|---------|
| 9    |   |             |        | $R_H = a \cdot b / 2(a+b)$             | $R_H =$     | RADIO<br>HIDRÁULICO DEL<br>PRIMER<br>COMPARTIMENT<br>O<br>ENTRE<br>PANTALLAS | M.      |
|      |   |             |        |  | 0.359       |  |         |
| 10   | COEFICIENTE DE LA<br>FORMULA<br>DE<br>MANNING | $n =$       | CTE    | $h_1 = (nv_1 / (R_H)^{2/3})^2 \cdot l$ | $h_1 =$     | PÉRDIDA DE<br>CARGA<br>CONTINUA EN<br>LOS CANALES                            | M.      |
|      |   |             |        |  | 0.002       |  |         |
| 11   |   |             |        | $h_2 = (m+1)V_1^2 + mV_2^2 / 2g$       | $h_2 =$     | PÉRDIDA DE<br>CARGA EN LAS<br>VUELTAS  | M       |
|      |   |             |        |  | 0.072       |  |         |
| 12   |   |             |        | $h_t = h_1 + h_2$                      | $h_t =$     | PÉRDIDA DE<br>CARGA TOTAL<br>EN EL 2o.<br>TRAMO                              | M       |
|      |   |             |        |  | 0.074       |  |         |
|      |   |             |        | $hf_p = hf/m$                          | $hf_p =$    | PÉRDIDA DE<br>CARGA POR<br>PANTALLA  |         |
|      |   |             |        |  | 0.004       |  |         |
|      | CARGA EN EL PASO<br>SUPERIOR<br>(SUPUESTO)    | $h_{v_u} =$ | M      | $h_{v_d} = h_{v_u} - hf_p$             | $h_{v_d} =$ | CARGA EN EL<br>PASO SUPERIOR<br>EN LA<br>DESCARGA                            | M       |
|      |   | 0.47        |        |  | 0.466       |  |         |



TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS   | SÍMBOLO          | UNIDAD | CRITERIOS                                       | CÁLCULOS | RESULTADOS                                      | UNIDAD.         |
|------|---|------------------|--------|---|----------|---|-----------------|
|      |   |                  |        |   |          | GASTO UNITARIO                                  | M³/S.           |
|      |   |                  |        | $q = Q/b$                                       | 0.238    |   |                 |
|      |   |                  |        | $h v_d h v_u$                                   | 0.991    |   |                 |
|      |   |                  |        |   |          |   |                 |
|      | COEFICIENTE (VER TABLA XIX, PAG. 87)                | $\alpha = 0.275$ | CTE.   | $h v_u = q/1.84\alpha$                          | 0.470    | COMPROBACIÓN CARGA EN EL PASO SUPERIOR          | M               |
| 13   |   |                  |        | $V_T = H*b*L - e(M-1)$                          | 175.52   | VOLUMEN DEL TRAMO.                              | M³              |
|      |   |                  |        |   |          |   |                 |
| 14   | VER TABLA XX, PAG. 88 $(\gamma/\mu)^{1/2} = T = 20$ | 3,114.64         |        | $G_1 = (\gamma/\mu)^{1/2} (h_r * Q/V_T)^{1/2}$  | 45.22    | COMPROBACIÓN DEL GRADIENTE EN EL 2o. CANAL      | S <sup>-1</sup> |
|      |   |                  |        |   |          |   |                 |
|      |   |                  |        |   |          |   |                 |
| 15   |   |                  |        | $G_2 = n (\gamma/\mu)^{1/2} R_H^{-0.7} V^{1.5}$ | 8.44     | COMPROBACIÓN DEL GRADIENTE EN EL CANAL VERTICAL | S <sup>-1</sup> |
| 1    | CAUDAL  | Q = 0.50         | M³/S   | V = 60 Q * T                                    |          |   |                 |
|      |   |                  |        |   |          |   |                 |
|      | TIEMPO TOTAL DE FLOCULACIÓN                         | T = 20.00        | MIN    | V =   | 600.00   | VOLUMEN TOTAL DE LA UNIDAD                      | M³              |

TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS                                     | SÍMBOLO    | UNIDAD          | CRITERIOS                          | CÁLCULOS | RESULTADOS                               | UNIDAD         |
|------|---|------------|-----------------|------------------------------------|----------|--|----------------|
| 2    | LONGITUD DE LA UNIDAD                     | L =        | M               | $B = V/H * L$                      |          |  |                |
|      |   |            |                 |                                    |          |  |                |
|      | PROFUNDIDAD DEL FLOCULADOR                | H =        | M               |                                    | 2.20     | ANCHO TOTAL DE LA UNIDAD                 | M              |
|      |   |            |                 |                                    |          |  |                |
| 3    | ANCHO DEL TERCER CANAL                    | b =<br>L = | M               | $t = H*b*L/Q*60$                   | 5.36     | TIEMPO DE RETENCIÓN 3ER CANAL            | MIN.           |
|      |   |            |                 |                                    |          |  |                |
| 4    | GRADIENTE DE VELOCIDAD EN EL TERCER TRAMO | G =        | S <sup>-1</sup> | $m = 0.045((b*L*G/Q)^{2*4})^{1/3}$ | 15       | NUMERO DE COMPARTIMENTOS ENTRE PANTALLAS | No.            |
|      |   |            |                 |                                    |          |  |                |
| 5    | ESPESOR DE LAS PANTALLAS                  | e =<br>e = | PULG.<br>M.     | $a = L-e(m-1)/m.$                  | 1.35     | ESPACIAMIENTO ENTRE PANTALLAS            | M              |
|      |   |            |                 |                                    |          |  |                |
| 6    |   |            |                 | $V_1 = Q/a*b$                      | 0.176    | VELOCIDAD EN LOS CANALES                 | M/S            |
|      |   |            |                 |                                    |          |  |                |
| 7    |   |            |                 | $V_2 = 2/3 V_1$                    | 0.117    | VELOCIDAD EN LOS PASAJES                 | M/S            |
| 8    |   |            |                 | $A = Q/V_2$                        | 4.27     | ÁREA DEL PASO INFERIOR                   | M <sup>2</sup> |



TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS                                | SÍMBOLO | UNIDAD | CRITERIOS                                      |         | CÁLCULOS | RESULTADOS   | UNIDAD |
|------|--------------------------------------|---------|--------|--|---------|----------|--|--------|
|      |                                      |         |        | $e_t = A/b$                                    | $e_t =$ | 2.03     | ALTURA DEL ESPACIO INFERIOR                                | M      |
|      |                                      |         |        | $l = 60 \cdot V_1 \cdot t$                     | $l =$   | 56.60    | EXTENSIÓN TOTAL DEL 3ER CANAL                              | M      |
| 9    |                                      |         |        | $R_H = a \cdot b / 2(a+b)$                     | $R_H =$ | 0.411    | RADIO HIDRÁULICO DEL PRIMER COMPARTIMENT O ENTRE PANTALLAS | M.     |
| 10   | COEFICIENTE DE LA FORMULA DE MANNING | $n =$   | CTE    | $h_1 = (n \cdot V_1 / (R_H)^{2/3})^2 \cdot l$  | $h_1 =$ | 0.001    | PÉRDIDA DE CARGA CONTINUA EN LOS CANALES                   | M.     |
| 11   |                                      |         |        | $h_2 = (m+1) \cdot V_1^2 + m \cdot V_2^2 / 2g$ | $h_2 =$ | 0.036    | PÉRDIDA DE CARGA EN LAS VUELTAS                            | M      |
| 12   |                                      |         |        | $h_T = h_1 + h_2$                              | $h_T =$ | 0.037    | PÉRDIDA DE CARGA TOTAL EN EL 3ER TRAMO                     | M      |

TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS  | SÍMBOLO          | UNIDAD | CRITERIOS                                     |          | CÁLCULOS | RESULTADOS                                 | UNIDAD.            |
|------|--|------------------|--------|---|----------|----------|--|--------------------|
|      |  |                  |        | $hf_p = hf/m$                                 | $hf_p =$ | 0.002    | PERDIDA DE CARGA POR PANTALLA              |                    |
|      |  |                  |        |   |          |          |  |                    |
|      | CARGA EN EL PASO SUPERIOR (SUPUESTO)                     | $hv_u = 0.47$    | M      | $hv_d = hv_u - hf_p$                          | $hv_d =$ | 0.468    | CARGA EN EL PASO SUPERIOR EN LA DESCARGA   | M                  |
|      |  |                  |        |   |          |          |  |                    |
|      |  |                  |        | $q = Q/b$                                     | $q =$    | 0.238    | GASTO UNITARIO                             | M <sup>3</sup> /S. |
|      |  |                  |        | $hv_d hv_u$                                   | $=$      | 0.996    |  |                    |
|      | COEFICIENTE (VER TABLA XIX, PAG. 87)                     | $\alpha = 0.275$ | CTE.   | $hv_u = q/1.84\alpha$                         | $hv_u =$ | 0.470    | COMPROBACIÓN CARGA EN EL PASO SUPERIOR     | M                  |
| 13   |  |                  |        | $V_T = H^*b*L - e(M-1)$                       | $V_T =$  | 160.26   | VOLUMEN DEL TRAMO.                         | M <sup>3</sup>     |
|      |  |                  |        |   |          |          |  |                    |
| 14   | VER TABLA XX, PAG. 88 $(\gamma/\mu)^{1/2} =$<br>$T = 20$ | 3,114.64         |        | $G_1 = (\gamma/\mu)^{1/2} (h_r * QN_T)^{1/2}$ | $G_1 =$  | 33.46    | COMPROBACIÓN DEL GRADIENTE EN EL 3ER CANAL | S <sup>-1</sup>    |
|      |  |                  |        |   |          |          |  |                    |
|      |  |                  |        |   |          |          |  |                    |

TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS                                     | SÍMBOLO        | UNIDAD   | CRITERIOS                                       | CÁLCULOS | RESULTADOS                                      | UNIDAD   |
|------|---|----------------|----------|---|----------|---|----------|
| 15   |   |                |          | $G_2 = n (\gamma/\mu)^{1/2} R_H^{-0.7} V^{1.5}$ | $G_2 =$  | COMPROBACIÓN DEL GRADIENTE EN EL CANAL VERTICAL | $S^{-1}$ |
| 1    | CAUDAL                                    | $Q =$          | $M^3/S$  | $V = 60 Q * T$                                  |          |   |          |
|      |   |                |          |   |          |   |          |
|      | TIEMPO TOTAL DE FLOCULACIÓN               | $T =$          | MIN      |   | $V =$    | VOLUMEN TOTAL DE LA UNIDAD                      | $M^3$    |
|      |   |                |          |   |          |   |          |
| 2    | LONGITUD DE LA UNIDAD                     | $L =$          | M        | $B = V/H * L$                                   |          |   |          |
|      |   |                |          |   |          |   |          |
|      | PROFUNDIDAD DEL FLOCULADOR                | $H =$          | M        |   | $B =$    | ANCHO TOTAL DE LA UNIDAD                        | M        |
|      |   |                |          |   |          |   |          |
|      |   |                |          |   |          |   |          |
| 3    | ANCHO DEL CUARTO CANAL                    | $b =$<br>$L =$ | M        | $t = H*b*L/Q*60$                                | $t =$    | TIEMPO DE RETENCIÓN 3ER CANAL                   | MIN.     |
|      |   |                |          |   |          |   |          |
|      |   |                |          |   |          |   |          |
| 4    | GRADIENTE DE VELOCIDAD EN EL CUARTO TRAMO | $G =$          | $S^{-1}$ | $m = 0.045((b*L*G/Q)^{2*}t)^{1/3}$              | $m =$    | NUMERO DE COMPARTIMENTOS ENTRE PANTALLAS        | No.      |



TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS                    | SÍMBOLO    | UNIDAD      | CRITERIOS                  | CÁLCULOS | RESULTADOS   | UNIDAD.        |
|------|--------------------------|------------|-------------|----------------------------|----------|--|----------------|
| 5    | ESPESOR DE LAS PANTALLAS | e =<br>e = | PULG.<br>M. | a = L-e(m-1)/m.            | 1.30     | ESPACIAMIENTO ENTRE PANTALLAS                              | M              |
| 6    |                          |            |             | $V_1 = Q/a \cdot b$        | 0.128    | VELOCIDAD EN LOS CANALES                                   | M/S            |
| 7    |                          |            |             | $V_2 = 2/3 V_1$            | 0.100    | VELOCIDAD EN LOS PASAJES                                   | M/S            |
| 8    |                          |            |             | $A = Q/V_2$                | 5.00     | ÁREA DEL PASO INFERIOR                                     | M <sup>2</sup> |
|      |                          |            |             | $e_t = A/b$                | 1.67     | ALTURA DEL ESPACIO INFERIOR                                | M              |
|      |                          |            |             | $l = 60 \cdot V_1 \cdot t$ | 22.66    | EXTENSIÓN TOTAL DEL 4o. CANAL                              | M              |
| 9    |                          |            |             | $R_H = a \cdot b/2(a+b)$   | 0.453    | RADIO HIDRAULICO DEL PRIMER COMPARTIMENT O ENTRE PANTALLAS | M.             |

TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS                    | SÍMBOLO    | UNIDAD      | CRITERIOS                    |         | CÁLCULOS | RESULTADOS   | UNIDAD.        |
|------|--------------------------|------------|-------------|------------------------------|---------|----------|--|----------------|
| 5    | ESPESOR DE LAS PANTALLAS | e =<br>e = | PULG.<br>M. | a = L-e(m-1)/m.              | a =     | 1.30     | ESPACIAMIENTO ENTRE PANTALLAS                              | M              |
| 6    |                          |            |             | $V_1 = Q/a \cdot b$          | $V_1 =$ | 0.128    | VELOCIDAD EN LOS CANALES                                   | M/S            |
| 7    |                          |            |             | $V_2 = 2/3 V_1$              | $V_2 =$ | 0.100    | VELOCIDAD EN LOS PASAJES                                   | M/S            |
| 8    |                          |            |             | $A = Q/N_2$                  | A =     | 5.00     | ÁREA DEL PASO INFERIOR                                     | M <sup>2</sup> |
|      |                          |            |             | $e_f = A/b$                  | $e_f =$ | 1.67     | ALTURA DEL ESPACIO INFERIOR                                | M              |
|      |                          |            |             | $l = 60 \cdot V_1 \cdot t$   | l =     | 22.66    | EXTENSIÓN TOTAL DEL 4º. CANAL                              | M              |
| 9    |                          |            |             | $R_H = a \cdot b / 2(a + b)$ | $R_H =$ | 0.453    | RADIO HIDRÁULICO DEL PRIMER COMPARTIMENT O ENTRE PANTALLAS | M.             |

TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS                                | SÍMBOLO     | UNIDAD | CRITERIOS                            | CÁLCULOS    | RESULTADOS                               | UNIDAD             |
|------|--------------------------------------|-------------|--------|--------------------------------------|-------------|--|--------------------|
| 10   | COEFICIENTE DE LA FORMULA DE MANNING | $n =$       | CTE    | $h_1 = (nv_1/(R_H)^{2/3})^2 \cdot l$ | $h_1 =$     | PERDIDA DE CARGA CONTINUA EN LOS CANALES | M.                 |
| 11   |                                      |             |        | $h_2 = (m+1)V_1^2 + mV_2^2/2g$       | $h_2 =$     | PERDIDA DE CARGA EN LAS VUELTAS          | M                  |
| 12   |                                      |             |        | $h_t = h_1 + h_2$                    | $h_t =$     | PERDIDA DE CARGA TOTAL EN EL 4o. TRAMO   | M                  |
|      |                                      |             |        | $hf_p = hf/m$                        | $hf_p =$    | PERDIDA DE CARGA POR PANTALLA            |                    |
|      | CARGA EN EL PASO SUPERIOR (SUPUESTO) | $h_{v_u} =$ | M      | $h_{v_d} = h_{v_u} - hf_p$           | $h_{v_d} =$ | CARGA EN EL PASO SUPERIOR EN LA DESCARGA | M                  |
|      |                                      |             |        | $q = Q/b$                            | $q =$       | GASTO UNITARIO                           | M <sup>3</sup> /S. |
|      |                                      |             |        | $h_{v_d} h_{v_u}$                    | $=$         |  |                    |
|      |                                      |             |        |                                      | 0.994       |  |                    |



TABLA II (Continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO DE DISEÑO

| PASO | DATOS                                | SÍMBOLO                  | UNIDAD | CRITERIOS  | CÁLCULOS     | RESULTADOS                                      | UNIDAD.         |
|------|--------------------------------------|--------------------------|--------|--|--------------|---|-----------------|
|      | COEFICIENTE (VER TABLA XIX, PAG. 87) | $\alpha =$               | CTE.   | $h v_u = q / 1.84 \alpha$                          | <b>0.330</b> | COMPROBACIÓN CARGA EN EL PASO SUPERIOR          | M               |
| 13   |                                      |                          |        | $V_T = H * b * L - e (M - 1)$                      | 88.37        | VOLUMEN DEL TRAMO.                              | M³              |
| 14   | VER TABLA XX, PAG. 88                | $(\gamma / \mu)^{1/2} =$ |        | $G_1 = (\gamma / \mu)^{1/2} (h_f * Q / V_T)^{1/2}$ | 22.23        | COMPROBACIÓN DEL GRADIENTE EN EL 4o. CANAL      | S <sup>-1</sup> |
|      | $T = 20$                             |                          |        |  |              |   |                 |
| 15   |                                      |                          |        | $G_2 = n (\gamma / \mu)^{1/2} R_H^{-0.7} V^{1.5}$  | 3.23         | COMPROBACIÓN DEL GRADIENTE EN EL CANAL VERTICAL | S <sup>-1</sup> |

#### **2.4.4. Análisis del proceso a gasto mínimo.**

Podría darse el caso de que las bocatomas de captación se obstruyeran, o que bajara el nivel del Río Bravo, lo que podría provocar una posible disminución del gasto. Por lo que se procederá a calcular un gasto mínimo, el cual se considera el gasto de diseño entre dos, esto es:

$$Q_{min} = Q_{max}/2 = 500 \text{ lps} / 2 = 250 \text{ lps}.$$

Con este gasto se observará el comportamiento teórico del floculador, para verificar que se cumplan las normas de calidad establecidas, para posteriormente cotejarlo con un ensayo de laboratorio.

El análisis correspondiente se presenta en la tabla III.

TABLA III

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO MÍNIMO

| PASO | DATOS                                     | SÍMBOLO    | UNIDAD            | CRITERIOS  | CÁLCULOS         | RESULTADOS                               | UNIDAD.        |
|------|---|------------|-------------------|--|------------------|--|----------------|
| 1    | CAUDAL                                    | Q =        | M <sup>3</sup> /S | $V = 60 Q \cdot T$                               |                  |  |                |
|      | TIEMPO TOTAL DE FLOCULACIÓN               | T =        | MIN               |  | V =              | VOLUMEN TOTAL DE LA UNIDAD               | M <sup>3</sup> |
| 2    | LONGITUD DE LA UNIDAD                     | L =        | M                 | $B = V/H \cdot L$                                |                  |  |                |
|      | PROFUNDIDAD DEL FLOCULADOR                | H =        | M                 |  | B =              | ANCHO TOTAL DE LA UNIDAD                 | M              |
| 3    | ANCHO DEL PRIMER CANAL                    | b =<br>L = | M                 | $t = H \cdot b \cdot L / Q \cdot 60$             | t =              | TIEMPO DE RETENCIÓN PRIMER CANAL         | MIN.           |
| 4    | GRADIENTE DE VELOCIDAD EN EL PRIMER TRAMO | G =        | S <sup>-1</sup>   | $m = 0.045((b \cdot L \cdot G / Q)^{2+t})^{1/3}$ | m =              | NÚMERO DE COMPARTIMENTOS ENTRE PANTALLAS | No.            |
| 5    | ESPESOR DE LAS PANTALLAS                  | e =<br>e = | PULG.<br>M.       | $a = L - e(m-1)/m.$                              | a =              | ESPACIAMIENTO ENTRE PANTALLAS            | M              |
| 6    |   |            |                   | $V_1 = Q/a \cdot b$                              | V <sub>1</sub> = | VELOCIDAD EN LOS CANALES                 | M/S            |

TABLA III (continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO MÍNIMO

| PASO | DATOS   | SÍMBOLO | UNIDAD | CRITERIOS                                | CÁLCULOS | RESULTADOS  | UNIDAD.        |
|------|---|---------|--------|--|----------|---|----------------|
| 7    |   |         |        | $V_2 = 2/3 V_1$                          | $V_2 =$  | VELOCIDAD EN<br>LOS PASAJES   | M/S            |
| 8    |   |         |        | $A = Q/V_2$                              | $A =$    | ÁREA DEL PASO<br>INFERIOR   | M <sup>2</sup> |
|      |   |         |        | $e_f = A/b$                              | $e_f =$  | ALTURA DEL<br>ESPACIO<br>INFERIOR   | M              |
|      |   |         |        | $l = 60 \cdot V_1 \cdot t$               | $l =$    | EXTENSIÓN<br>TOTAL DEL<br>PRIMER CANAL                                    | M              |
| 9    |   |         |        | $R_H = a \cdot b/2(a+b)$                 | $R_H =$  | RADIO<br>HIDRÁULICO DEL<br>PRIMER<br>COMPARTIMENT<br>O ENTRE<br>PANTALLAS | M.             |
|      | COEFICIENTE DE LA<br>FORMULA<br>DE<br>MANNING | $n =$   | CTE    | $h_1 = (nv_1/(R_H)^{2/3})^{2/3} \cdot l$ | $h_1 =$  | PÉRDIDA DE<br>CARGA<br>CONTINUA EN<br>LOS CANALES                         | M.             |
| 10   |   |         |        |  |          |   |                |
| 11   |   |         |        | $h_2 = (m+1)V_1^2 + mV_2^2/2g$           | $h_2 =$  | PÉRDIDA DE<br>CARGA EN LAS<br>VUELTAS                                     | M              |



TABLA III (continúa)

ANÁLISIS DEL PROCESO A GASTO MÍNIMO

| PASO | DATOS  | SÍMBOLO     | UNIDAD | CRITERIOS  | CÁLCULOS    | RESULTADOS                                 | UNIDAD             |
|------|--|-------------|--------|--|-------------|--|--------------------|
| 12   |  |             |        | $h_t = h_1 + h_2$                                  | $h_t =$     | PERDIDA DE CARGA TOTAL EN EL PRIMER TRAMO  | M                  |
|      |  |             |        |  | 0.042       |  |                    |
|      |  |             |        | $hf_p = hf/m$                                      | $hf_p =$    | PERDIDA DE CARGA POR PANTALLA              |                    |
|      |  |             |        |  | 0.002       |  |                    |
|      | CARGA EN EL PASO SUPERIOR (SUPUESTO)         | $h_{v_u} =$ | M      | $h_{v_d} = h_{v_u} - hf_p$                         | $h_{v_d} =$ | CARGA EN EL PASO SUPERIOR EN LA DESCARGA   | M                  |
|      |  | 0.24        |        |  | 0.238       |  |                    |
|      |  |             |        | $q = Q/b$  | $q =$       | GASTO UNITARIO                             | M <sup>3</sup> /S. |
|      |  |             |        | $h_{v_d} h_{v_u}$                                  | $=$         |  |                    |
|      |  |             |        |  | 0.992       |  |                    |
|      | COEFICIENTE (VER TABLA XIX, PAG. 87)         | $\alpha =$  | CTE.   | $h_{v_u} = q/1.84\alpha$                           | $h_{v_u} =$ | COMPROBACIÓN CARGA EN EL PASO SUPERIOR     | M                  |
|      |  | 0.275       |        |  | 0.235       |  |                    |
| 13   |  |             |        | $V_T = H \cdot b \cdot L - e(M-1)$                 | $V_T =$     | VOLUMEN DEL TRAMO.                         | M <sup>3</sup>     |
|      |  |             |        |  | 185.69      |  |                    |
| 14   | VER TABLA XX, PAG. 88 $(\gamma/\mu)^{1/2} =$ | 3,114.64    |        | $G_1 = (\gamma/\mu)^{1/2} (h_t \cdot Q/V_T)^{1/2}$ | $G_1 =$     | COMPROBACIÓN DEL GRADIENTE EN EL 1ER CANAL | S <sup>-1</sup>    |
|      |  |             |        |  | 23.42       |  |                    |