

CAPÍTULO 2
MEZCLADORES

1. INTRODUCCIÓN

Los mezcladores tienen como objetivo la dispersión instantánea del coagulante en toda la masa de agua que se va a tratar. Esta dispersión debe ser lo más homogénea posible, con el objeto de desestabilizar todas las partículas presentes en el agua y optimizar el proceso de coagulación. La coagulación es el proceso más importante en una planta de filtración rápida; de ella depende la eficiencia de todo el sistema. No importa que los demás procesos siguientes sean muy eficientes; si la coagulación es defectuosa, la eficiencia final del sistema es baja.

La eficiencia de la coagulación depende de la dosificación y de la mezcla rápida. En la unidad de mezcla la aplicación del coagulante debe ser constante y distribuirse de manera uniforme en toda la sección. Debe existir una fuerte turbulencia para que la mezcla del coagulante y la masa de agua se dé en forma instantánea.

La mezcla rápida puede realizarse aprovechando la turbulencia provocada por dispositivos hidráulicos o mecánicos.

2. PARÁMETROS GENERALES DE DISEÑO

- La intensidad de agitación, medida a través del gradiente de velocidad, puede variar de 700 a 1.300 s^{-1} o de 3.000 a 5.000 según el tipo de unidad seleccionada.
- El tiempo de retención puede variar de décimas de segundos a siete segundos, dependiendo de la concentración de coloides en el agua por tratar y del tipo de unidad seleccionada. De la concentración de coloides presente en el agua dependerá el tipo de mecanismo de coagulación resultante; esto es:

alta concentración de coloides → mecanismo de absorción o de neutralización de cargas

baja concentración de coloides → mecanismo de barrido.

2.1 Unidades hidráulicas

Entre los mezcladores de este tipo se pueden citar, entre los más utilizados por su simplicidad y eficiencia, los siguientes:

- canales con cambio de pendiente o rampas;
- canaletas Parshall;
- vertederos rectangulares y triangulares;
- difusores;
- inyectores.

En los tres primeros mezcladores la turbulencia que ocasiona la mezcla es producida por la generación de un resalto hidráulico que causa un gradiente de velocidad de alrededor de 1.000 s^{-1} . Estas unidades tienen la ventaja de que, además, involucran la medición del caudal de ingreso a la planta.

Las unidades de resalto hidráulico son adecuadas para todo tipo de aguas; es decir, tanto para las que coagulan por el mecanismo de absorción o neutralización de carga como para las de barrido. Para las aguas que coagulan por el mecanismo de barrido, son adecuados todos los tipos de mezcladores, inclusive los retromezcladores, porque en este caso, para que el mecanismo de barrido se produzca, son más importantes las condiciones químicas (dosis de coagulante) que los parámetros de mezcla.

En los difusores e inyectores se obtiene una eficiencia similar a la conseguida en las unidades de resalto hidráulico, pero con menores gradientes de velocidad; esto es, con menor disipación de energía durante el proceso. Esto se debe a que la homogeneización coagulante-masa de agua en estas unidades se consigue como consecuencia de la gran cantidad de puntos de aplicación del coagulante antes que de la agitación de la masa de agua. Otros tipos de mezcladores de patente como las denominadas unidades de mezcla en línea requieren gradientes de velocidad mayores, normalmente entre 3.000 y 5.000 s^{-1} .

La canaleta Parshall es adecuada exclusivamente para plantas de medianas a grandes ($Q \geq 500 \text{ L/s}$). El canal con cambio de pendiente se adecúa a cualquier rango de caudal, y los vertederos rectangular y triangular solo a caudales pequeños; el último, preferiblemente a caudales menores de 30 L/s .

2.1.1 Mezcladores de resalto hidráulico

Estas unidades son especialmente adecuadas para aguas que la mayor parte del tiempo están coagulando mediante el mecanismo de adsorción; es decir, aguas que presentan alta concentración de coloides. Los tipos más frecuentes tienen la ventaja de servir de unidades de medición de caudal y de unidades de mezcla rápida, por lo cual son muy populares (figura 2-1).

- a) Parámetros de diseño
- Gradientes de velocidad entre 700 y 1.300 s^{-1} y tiempos de retención menores de un segundo.

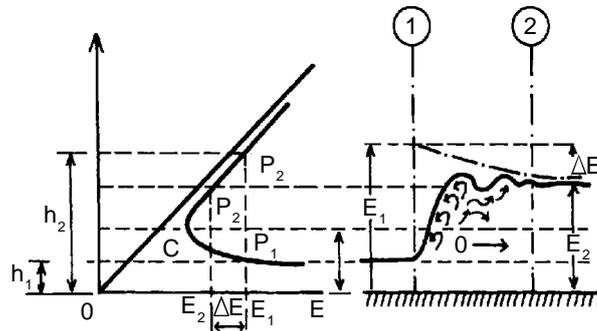


Figura 2-1. Resalto hidráulico (2)

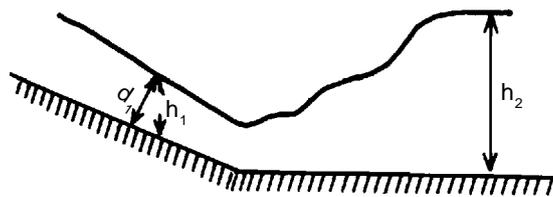


Figura 2-2. Descripción esquemática del criterio asumido (2)

- Números de Froude (F) variables entre 4,5 y 9,0 para conseguir un salto estable, con excepción de la canaleta Parshall, que funciona mejor con números de Froude entre 2 y 3.
- El coagulante debe aplicarse en el punto de mayor turbulencia (inicio del resalto), en forma constante y distribuido de manera uniforme en toda la masa de agua.

b) Criterios para el dimensionamiento

- Se supone que h_1 es igual a d_1 (figura 2-2).
- Las alturas de agua antes (h_1) y después del resalto (h_2) deben satisfacer la siguiente ecuación:

$$h_2/h_1 = \frac{1}{2} [\sqrt{1 + 8 F^2} - 1] \quad (1)$$

Donde:

$$F = V_1 / \sqrt{g h_1} \quad (2)$$

y V_1 es la velocidad en la sección (1).

- Los tipos más frecuentes tienen la ventaja de servir como unidades de medición de caudal y como unidades de mezcla rápida.
- La energía hidráulica disipada o pérdida de carga se puede calcular en la longitud (L) del resalto, mediante la fórmula de Belanger:

$$hp = (h_2 - h_1)^3 / 4 h_1 h_2 \quad (3)$$

- La longitud de resalto mediante la fórmula de Smetana:

$$L = 6 (h_2 - h_1) \quad (4)$$

- Gradiente de velocidad (G) producido:

$$G = [\gamma Q hp / \mu \nabla]^{0.5} \text{ ó } [\gamma / \mu]^{0.5} \cdot [hp / T]^{0.5} \quad (5)$$

- Tiempo de mezcla (T)

$$T = 2 L / (V_1 + V_2) \quad (6)$$

- γ = peso específico del agua (kg/m^3)
- μ = coeficiente de viscosidad absoluta
- Q = caudal (m^3/s)
- hp = pérdida de carga (m)

- ∇ = volumen comprendido entre las secciones (1) y (2)
- V_1 = velocidad del agua en la sección (1)
- V_2 = velocidad del agua en la sección (2)

El cuadro 2-1 presenta los valores de $\sqrt{\gamma/\mu}$ para diferentes temperaturas:

Cuadro 2-1. Valores de $\sqrt{\gamma/\mu}$ (1)

Temperatura (°C)	$\sqrt{\gamma/\mu}$
0	2.336,94
4	2.501,56
10	2.736,53
15	2.920,01
20	3.114,64
25	3.266,96

c) Modelos de comprobación

Canal rectangular con cambio de pendiente o rampa. Un cambio de pendiente en un canal es uno de los medios más simples de producir un salto hidráulico con fines de mezcla.

Para comprobar si se están produciendo los valores recomendados de gradiente de velocidad y tiempo de retención una vez asumida la geometría del canal, es necesario calcular las alturas y velocidades conjugadas en las secciones (1) y (2) de la figura 2-3.

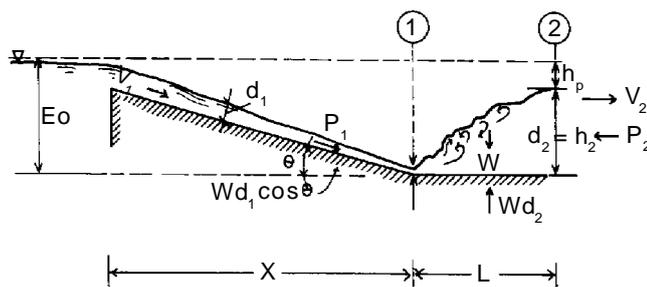


Figura 2-3. Canal rectangular con cambio de pendiente (2)

Ecuación de momentos (7):

$$Qw/g (B_2 V_2 - B_1 V_1 \cos \theta) = P_1 \cos \theta - P_2 - F_F \quad (7)$$

$$P_1 = 1/2 w d_1^2 \cos \theta \quad (8)$$

$$P_2 = w d_2^2 / 2 \quad (9)$$

$$Q = V_1 d_1 = V_2 d_2 \quad ; \quad V_2 = V_1 d_1 / d_2$$

$$\text{Si } B_1 = B_2 \approx 1 \quad ; \quad F_F = 0 \quad ; \quad F_1 = V_1 / \sqrt{g d_1}$$

$$d_2 / d_1 = a$$

Sustituyendo:

$$V_1^2 (d_1 w / g) (V_1 d_1 / d_2 - V_1 \cos \theta) = (w d_1^2 \cos^2 \theta - w d_2^2) / 2 \quad (10)$$

$$2 (V_1^2 / d_1 g) (d_1 / d_2 - \cos \theta) = \cos^2 \theta - (d_2 / d_1)^2$$

$$2 (F_1^2 / a) - 2 F_1^2 \cos \theta = \cos^2 \theta - a^2$$

$$(a^2 / 2 F_1) + F_1 / a = K$$

K = Factor de resolución de la ecuación

$$K = \cos \theta (F_1 + (\cos \theta / 2 F_1)) \quad (11)$$

Una vez calculados h_1 y V_1 , se aplican los criterios generales indicados en la sección anterior. El cuadro 2-2 presenta un ejemplo de aplicación de los criterios expuestos.

Al finalizar el cálculo, debemos comprobar lo siguiente:

altura de la rampa + tirante de agua en el vertedero de coronación de la rampa = pérdida de carga + altura del tirante aguas abajo del resalto

Si el cálculo no es conforme, hay que seguir modificando los datos hasta que los resultados satisfagan esta condición.

La figura 2-4 muestra una rampa diseñada para un caudal de 120 L/s. El resalto produce una turbulencia adecuada y se ubica exactamente al pie de la rampa, porque la unidad se dimensionó y ubicó correctamente.



Figura 2-4. Mezclador del tipo rampa en una planta mediana (4)

d) Recomendaciones de diseño

Para conseguir un comportamiento hidráulico óptimo en la unidad, además de un buen dimensionamiento, es necesario que esta se ubique correctamente con respecto a la siguiente unidad, que normalmente es el floculador y que los niveles de ambos —el de salida de la rampa con el nivel de entrada al floculador— estén bien empalmados (figura 2-5).

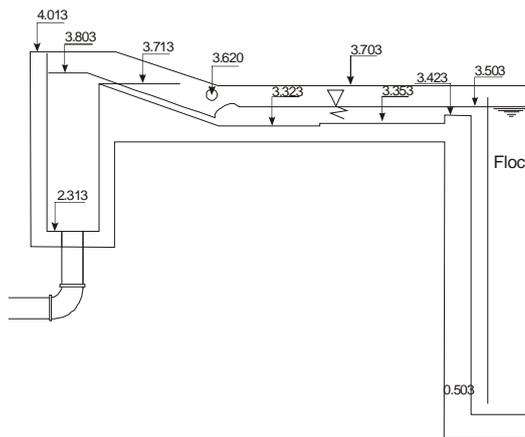


Figura 2-5. Empalme mezclador-floculador (4)

La grada que se coloca al final de la longitud de mezcla tiene la finalidad de contribuir a contener el resalto, para que este se dé al pie de la rampa (figura 2-6).

En resumen, para que el mezclador opere correctamente, además de comprobar que la intensidad de turbulencia para la mezcla esté dentro del rango apropiado, se debe verificar que cumplan con la igualdad:

$$E_o + h_3 = hp + h_2 \quad (12)$$

Criterios que se deben tener en cuenta al elaborar el perfil hidráulico de la planta.

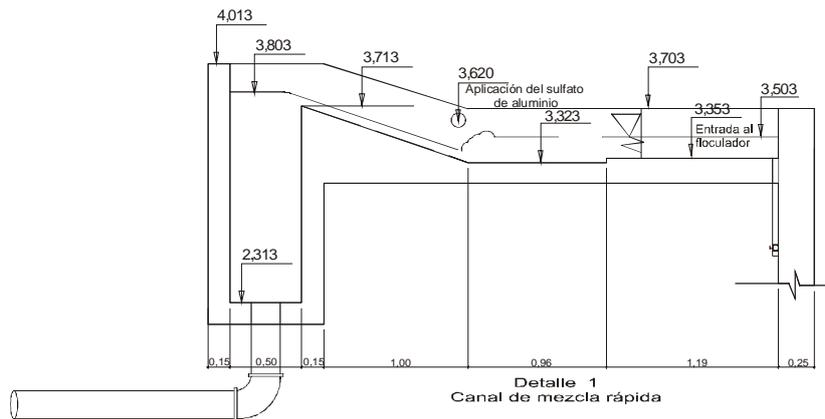


Figura 2-6. Detalle de la elevación del mezclador de tipo rampa (4)

Cuando se trata de unidades de gran capacidad, es necesario que la sección de la caja de entrada se diseñe para una velocidad ascensional menor de un m/s. La tubería de entrada debe ingresar por el fondo de la caja, para que la masa de agua vaya perdiendo energía al ascender. En estas condiciones, la lámina de agua alcanzará el vertedero de coronación de la rampa sin turbulencia, lo que permitirá medir el caudal correctamente.



Figura 2-7. Mezclador de tipo rampa en una planta grande (4)

e) Problemas de diseño más comunes

La figura 2-7 muestra un mezclador de tipo rampa que opera con un caudal de 2,5 m³/s. La caja de entrada a esta unidad no tiene suficiente profundidad para amortiguar la turbulencia de entrada. Fue necesario colocar una tapa para contener las salpicaduras y evitar que estas inundaran el contorno de la rampa.

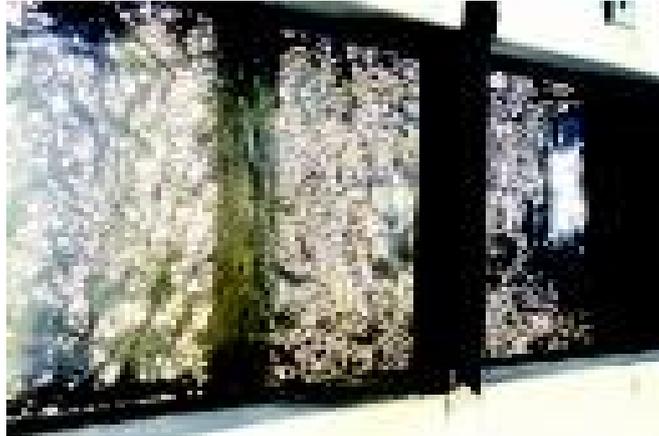


Figura 2-8. Mezclador de tipo rampa mal ubicado (4)

Uno de los defectos de diseño más comunes en este tipo de mezclador surge de no empalmar correctamente el nivel del agua a la salida de la rampa con el nivel de operación del floculador.

El mezclador de tipo rampa de la figura 2-8 adolece de este defecto. El proyectista empalmó el fondo de la rampa con el fondo del floculador y la rampa quedó ahogada.

Cuando el canal de aproximación a la rampa da una vuelta de 90° antes del mezclador, el tirante de agua que emboca el vertedero de coronación de la rampa presenta un nivel inclinado por efecto del volteo, lo que anula la posibilidad de utilizar el vertedero como medidor de caudal. En la figura 2-9 se puede observar que el efecto de la vuelta llega hasta el resalto, que también se presenta inclinado.



Figura 2-9. Defectos en el canal de aproximación a la rampa (4)

Cuadro 2-2. Comprobación de las condiciones de mezcla en un canal rectangular con cambio de pendiente o mezclador de tipo rampa

Paso	Datos	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Caudal de diseño $Q = 0,300$	m ³ /s	$q = Q / B$	$q = 0,300 / 1,00$ $q = 0,30$	Caudal unitario	m ³ /s/m
	Ancho del canal $B = 1,00$	m				
2	Longitud del plano $X = 1,60$	m	$\theta = \text{tg}^{-1}(E_o / X)$	$\theta = \text{tg}^{-1}(0,82 / 1,60)$ $\theta = 27,14^\circ$	Inclinación de la rampa	radianes o grados sexagesi- males
	Altura de rampa $E_o = 0,82$	m				
3	Número de Froude $F = 5,5$		$K = \text{COS } \theta (F + (\text{COS } \theta / 2 F))$	$K = 4,97$		
4		m	$\phi = \text{COS}^{-1} [F^2 / (2/3 F K)^{3/2}]$	$\theta = 67,09$	Factor de resolución de la ecuación	-
			$a = d_2 / d_1$ $a = (8 F K/3)^{0,5} (\text{COS } (\phi/3))$	$a = 7,89$	Relación de alturas antes y después del resalto	-
5			$d_1 = \sqrt[3]{q^2 / (F^2 g)}$	$d_1 = 0,07$	Altura antes del resalto	m
6			$h_1 = d_1 / \text{cos } \theta$	$h_1 = 0,076$	Profundidad antes del resalto	m
7			$V_1 = q / h_1$	$V_1 = 3,97$	Velocidad al inicio del resalto	m/s
8			$F = V_1 / \sqrt{g h_1}$	$F = 3,97 / \sqrt{(9,81)(0,08)} = 4,62$	Número de Froude (comprobación)	
9			$h_2 = d_2 = a d_1$	$h_2 = 0,53$	Profundidad después del resalto	m
10			$L = 6(h_2 - h_1)$	$L = 2,73$	Longitud del resalto	m
11			$hp = (h_2 - h_1)^3 / 4 h_1 h_2$	$hp = 0,59$	Pérdida de carga	m
12			$\nabla = (h_1 + h_2) / 2) L.B$	$\nabla = ((0,08 + 0,53) / 2)$ $(2,73) (1,0)$ $\nabla = 0,83$	Volumen del resalto	m ³

Cuadro 2-2. Comprobación de las condiciones de mezcla en un canal rectangular con cambio de pendiente o mezclador de tipo rampa (continuación)

Paso	Datos	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
13	$\sqrt{y/\mu} = 2.736$ $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$		$G = \sqrt{y/\mu} \sqrt{Q h p / V}$	$G = 2.736 \sqrt{(0.30)(0.59) / 0.83}$ $G = 1.263$	Gradiente de velocidad	s^{-1}
14			$T = V / Q$	$T = 0.83 / 0.30$ $T = 2.76$	Tiempo de mezcla	s
15			$h = 1/6 h_2$	$h = 1/6 (0.53)$; $h = 0.09$	Grada al final del resalto	m
16			$h_3 = (Q / 1.84 B)^{2/3}$	$h_3 = (0.30 / 1.84 \times 1)^{2/3} = 0.30$	Altura de agua en el vertedero	m
17	$e = 0.10$	m	$N = B / e$	$N = 1.00 / 0.10$; $N = 10$	Número de orificios en el difusor	
18	$d_o = 0.5$	pulgadas	$A_o = \pi d_o^2 / 4$	$A_o = 0.0001$	Sección de los orificios	m^2
19	Dosis óptima promedio = 50	mg/L	$q = Q \cdot D / C$	$q = 0.75$	Caudal promedio de solución por aplicar	L/s
	$C = 2\% = 20,000$	mg/L				
20			$V_o = q / A_o \cdot N$	$V_o = 0.576$	Velocidad en los orificios	m/s
21	$R \leq 0.46$		$V_t = V_o \cdot R$	$V_t = 0.576 \times 0.41$ $V_t = 0.24$	Velocidad en la tubería	m/s
22			$A_t = q / V_t$	$A_t = 0.75 / (0.24 \times 1000)$ $A_t = 0.0039$	Sección del difusor	m^2
23			$D_t = (\sqrt[4]{4 A_t / \pi}) / 0.0254$	$D_t = 2.5$	Diámetro del difusor	pulgadas
24			$E_o + h_3 = h p + h_2$	$0.82 + 0.30 = 1.12$ $0.59 + 0.53 = 1.12$	Comprueba la igualdad	

2.1.2 Canaleta Parshall (1)

Se usa la canaleta Parshall normalmente con la doble finalidad de medir el caudal afluente y realizar la mezcla rápida. Generalmente, trabaja con descarga libre. La corriente líquida pasa de una condición supercrítica a una subcrítica, lo que origina el resalto. Fue ideada en 1927 por R. L. Parshall y patentada en varios tamaños con las dimensiones indicadas en el cuadro 2-3.

La secuencia de cálculo es semejante a la del caso anterior, si se introducen las alteraciones debidas a las variaciones en la sección 0 de medición (figura 2-11).

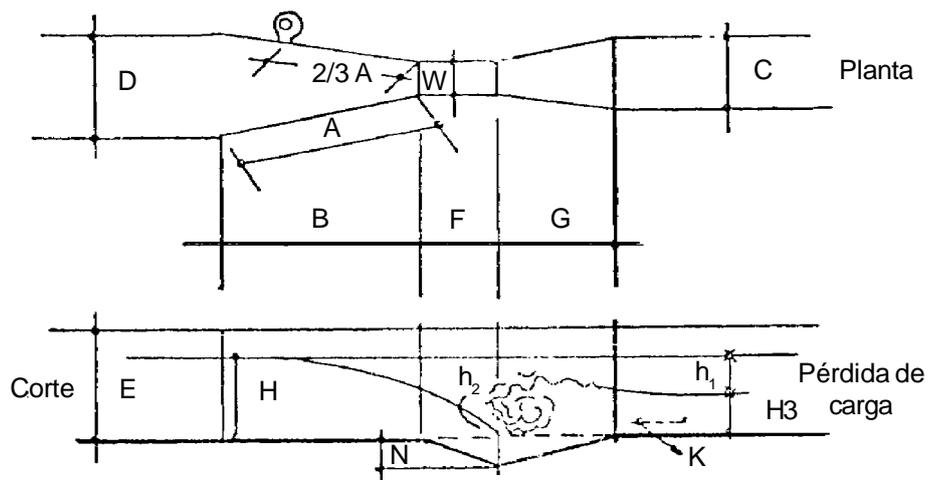


Figura 2-10. Canaleta Parshall

Cuadro 2-3. Dimensiones estandarizadas de los medidores Parshall

W		A	B	C	D	E	F	G	K	N
Pulgadas	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
1"	2,5	36,3	35,6	9,3	16,8	22,9	7,6	20,3	1,9	2,9
3"	7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	45,7	15,2	30,5	2,5	5,7
6"	15,2	61,0	61,0	39,4	40,3	61,0	30,5	61,0	7,6	11,4
9"	22,9	88,0	86,4	38,0	57,5	76,3	30,5	45,7	7,6	11,4
1'	30,5	137,2	134,4	61,0	84,5	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
1 1/2'	45,7	144,9	142,0	76,2	102,6	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
2'	61,0	152,5	149,6	91,5	120,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
3'	91,5	167,7	164,5	122,0	157,2	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
4'	122,0	183,0	179,5	152,5	193,8	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
5'	152,5	198,3	194,1	183,0	230,3	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
6'	183,0	213,5	209,0	213,5	266,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
7'	213,5	228,8	224,0	244,0	303,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
8'	244,0	244,0	239,2	274,5	340,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
10'	305,0	274,5	427,0	366,0	475,9	122,0	91,5	183,0	15,3	34,3

$$E_o = V_o^2 / 2g + H_o + N \tag{13}$$

La altura de agua en la sección de medición puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$H_o = K Q^m \tag{14}$$

Los valores de K y m se pueden obtener del cuadro 2-4.

La velocidad en la sección de medición se calcula mediante la siguiente relación:

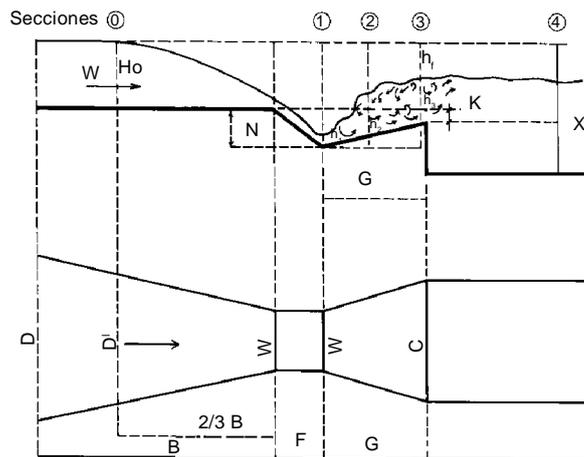


Figura 2-11. Canaleta Parshall

Cuadro 2-4. Valores de K y m para la ecuación 13

Ancho de la garganta del Parshall (w)		K	m
pulgadas	metros		
3"	0,075	3,704	0,646
6"	0,150	1,842	0,636
9"	0,229	1,486	0,633
1'	0,305	1,276	0,657
1 1/2'	0,460	0,966	0,650
2'	0,610	0,795	0,645
3'	0,915	0,608	0,639
4'	1,220	0,505	0,634
5'	1,525	0,436	0,630
6'	1,830	0,389	0,627
8'	2,440	0,324	0,623

$$V_o = Q / H_o D' \quad (15)$$

por relaciones geométricas:

$$D' = 2 / 3 (D - W) + W \quad (16)$$

Donde D , N y W son las dimensiones de la canaleta dadas en el cuadro 2-3.

Se puede considerar que toda la energía disipada en la canaleta Parshall se da entre la salida de la garganta (sección 2) y la sección de salida de la canaleta (sección 3) y que en este volumen la mezcla es prácticamente completa.

Bajo condiciones de flujo con descarga libre, la pérdida de carga puede calcularse mediante la siguiente fórmula (figura 2-11):

$$h_f = H_o + K - h_3 \quad (17)$$

El cuadro 2-5 presenta un ejemplo de aplicación de los criterios expuestos.

La figura 2-12 muestra una canaleta Parshall, diseñada para una capacidad de un m/s, que opera como mezclador y medidor de caudal.



Figura 2-12. Canaleta Parshall para $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ (4)

En el caso de mezcladores de tipo canaleta Parshall, también debe empalmarse el nivel de salida de la canaleta con el nivel de entrada del floculador para que el resalto se produzca en la garganta de la unidad. Al proyectar una canaleta Parshall, se deben tener en cuenta las recomendaciones relacionadas con la longitud de los canales de aproximación y salida para que se comporte adecuadamente.

a) Problemas de diseño más comunes

La figura 2-13 ilustra lo que sucede cuando no se ha efectuado correctamente el empalme de niveles de la canaleta con la siguiente unidad: el resalto se desplaza y se ubica en el nivel más bajo. Como en el proyecto se indica que la aplicación del coagulante se debe hacer en la garganta de la canaleta —lugar donde suponía el proyectista que se iba a obtener el resalto—, dicha aplicación se hace en un punto en el que no hay turbulencia. Este defecto es muy frecuente en este tipo de unidades.

La figura 2-14 ilustra otro problema muy común. El resalto hidráulico no se llega a formar porque durante la etapa de elaboración del proyecto solo se comprobaron las condiciones de operación de la unidad con el caudal del final del periodo de diseño de la planta y no se determinó cómo iba a comportarse con el caudal de la primera etapa.



Figura 2-13. Canaleta Parshall defectuosa (4)



Figura 2-14. No llega a formarse el resalto (4)

El resultado es que no se está formando el resalto hidráulico, debido a que el caudal de operación en la primera etapa es muy bajo y, por consiguiente, la mezcla resulta muy pobre e ineficiente. En estos casos, debe seleccionarse un ancho de garganta que pueda operar con los dos caudales, dentro del rango de los parámetros de mezcla recomendados.

El caudal que alimenta a la canaleta de la figura 2-15 viene del desarenador, que se proyectó elevado sobre el terreno. La tubería que se aprecia en la foto saliendo del desarenador (donde están las dos personas) lo hace muy superficialmente, por lo que ingresa aire a la tubería.

El aire y la carga de entrada al canal producen salpicaduras de agua alrededor de la unidad, por lo que se colocaron tabloncitos fijados con los cilindros que se pueden apreciar en la foto, para evitar que la zona se inundase.

La canaleta se ubicó igualando el fondo de esta con el del floculador y opera ahogada (figura 2-16). Las ondulaciones que se aprecian en la figura son originadas por los chorros de aire que pasan a través de la tubería de entrada. La canaleta no opera como medidor ni como mezclador debido a la suma de los defectos indicados.



Figura 2-15. Forma de ingreso a la canaleta (4)

En la figura 2-17 se puede apreciar una canaleta Parshall de la cual sale la tubería hacia la planta. La unidad carece de canales de aproximación y de salida, comienza en la transición de ingreso y termina con la de salida; en estas condiciones, esta canaleta no es útil como medidor porque no sigue las recomendaciones de Parshall para este fin.



Figura 2-16. Canaleta Parshall mal ubicada (4)

La figura 2-18 muestra el interior de la canaleta de la figura 2-17, que está siendo usada como mezclador y medidor de caudal. Se puede apreciar que no se está formando resalto hidráulico debido a que no se empalmaron las líneas de flujo. La siguiente unidad está a más de 100 metros de distancia y a un nivel más bajo con respecto a la canaleta. Tampoco se proyectó un difusor para aplicar el coagulante en todo el ancho que ocupa la masa de agua. De esta manera, la mezcla obtenida es muy deficiente.



Figura 2-17. Canaleta Parshall contrahecha (4)

En la canaleta de la figura 2-19 se puede apreciar que no se consideró el canal de aproximación. El agua emboca a la canaleta después de una vuelta de 90 grados y luego de pasar por dos orificios.



Figura 2-18. Interior de la canaleta de la figura 2-17 (4)



Figura 2-19. Canaleta Parshall defectuosa (4)

Cuadro 2-5. Ejemplo de comprobación de las condiciones de mezcla de una canaleta Parshall

Paso	Datos	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Caudal $Q = 0,760$	m^3/s	$Ho = KQ^m$	$Ho = 0,608 (0,76)^{0,639}$	Altura de agua en la sección de medición $Ho = 0,51$	m
	Tamaño de la canaleta $W = 3' = 0,915$	m				
	Constantes $K = 0,608$ $m = 0,639$	unidad				
2	Dimensión de la canaleta $D = 1,572$	m	$D' = 2/3(D-W) + W$	$D' = 2/3 (1,572 - 0,915) + 0,915$ $D' = 1,35$	Ancho de la sección de medición	m
3			$Vo = Q/D'Ho$	$Vo = 0,760 / (1,35 \times 0,51)$ $Vo = 1,10$	Velocidad en la sección de medición	m/s
4			$q = Q/W$	$q = 0,760 / 0,915$ $q = 0,83$	Caudal específico en la garganta de la canaleta	$m^3/s/m$
5	Dimensión de la canaleta $N = 0,23$	m	$EO = (Vo^2 / 2g) + Ho + N$	$EO = ((1,10)^2 / (2 \times 9,8)) + 0,51 + 0,23$ $EO = 0,80$	Carga hidráulica disponible	m
6			$\cos \theta = -qg / (2,3gEO)^{1,5}$	$\cos \theta = - (9,8 \times 0,83) / (2,3 \times 9,8 \times 0,8)^{1,5}$	$\cos \theta = - 0,68$ $\theta = 132^\circ 54'$	
7			$Vj = 2(2,3gEO/3)^{0,5} \cos \theta/3$	$Vj = 2((2 \times 9,8 \times 0,8)/3)^{0,5} \cos (44^\circ 18')$ $Vj = 3,29$	Velocidad antes del resalto	m/s
8			$hj = q / Vj$	$hj = 0,83/3,29$ $hj = 0,25$	Altura del agua antes del resalto	m

Cuadro 2-5. Ejemplo de comprobación de las condiciones de mezcla de una canaleta Parshall (continuación)

Paso	Datos	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
9			$F_1 = V_1 / \sqrt{g h_1}$	$F_1 = 3,29 / \sqrt{9,8 \times 0,25}$ $F_1 = 2,10$	Número de Froude	unidad
10			$h_2 = h_1 / 2 [(1 + 8F_1^2)^{0,5} - 1]$	$h_2 = 0,25 / 2 [(1 + 8(2,1)^2)^{0,5} - 1]$	Altura del resalto $h_2 = 0,63$	m
11			$V_2 = Q / Wh_2$	$V_2 = 0,760 / 0,915 \times 0,63$	Velocidad en el resalto $V_2 = 1,32$	m/s
12	Dimensión $K' = 0,08$	m	$h_3 = h_2 - (N \cdot K')$	$h_3 = 0,63 - (0,23 - 0,08)$	Altura en la sección de salida de la canaleta $h_3 = 0,48$	m
13	Dimensión $C = 1,22$	m	$V_3 = Q / Ch_3$	$V_3 = 0,760 / 1,22 \times 0,48$ $V_3 = 1,30$	Velocidad en la sección de salida	m/s
14			$hp = Ho + K \cdot h_3$	$hp = 0,51 + 0,08 - 0,48$ $hp = 0,11$	Pérdida de carga en el resalto	m
15	Dimensión $G' = 0,915$	m	$T = 2 G' / (V_2 + V_3)$	$T = 2 \times 0,915 / (1,32 + 1,30)$	Tiempo de mezcla en el resalto $T = 0,7$	s
16	$\sqrt{\gamma/\mu} = 2,736$ $T = 10^\circ\text{C}$		$G = \sqrt{\gamma/\mu} \sqrt{hp/T}$	$G = 2,736 \sqrt{0,11/0,7}$	Gradiente de velocidad $G = 1,084$	s ⁻¹

2.1.3 Vertedero rectangular

Esta unidad consiste en un canal rectangular con un vertedero rectangular sin contracciones a todo lo ancho del canal (figura 2-20).

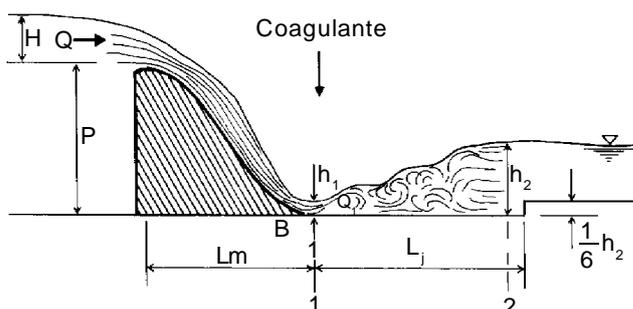


Figura 2-20. Vertedero rectangular (2)

La lámina vertiente, después de pasar sobre el vertedero, toca el fondo del canal en la sección 1, a una distancia L_m del vertedero. Cuando la lámina de agua alcanza el fondo, se divide en una corriente principal que se mueve hacia el frente y en una corriente secundaria que retorna. Para evitar el efecto perjudicial de la zona muerta que forma un vertedero de paredes verticales, se recomienda el diseño de vertedero de la figura 2-20. La distancia L_m puede ser calculada por la ecuación de Scimemi:

La longitud de la mezcla (L_j) se calcula mediante la ecuación 4. Para el cálculo del gradiente de velocidad, es necesario conocer la energía consumida en el resalto (figura 2-20). La altura de agua en esta sección (h_1) está relacionada con la altura crítica (h_c) por la siguiente ecuación:

$$L_m = 4,3 P (h_c / P)^{0,9} \quad (18)$$

$$h_1 = \frac{hc \sqrt{2}}{\sqrt{2,56 + \frac{P}{hc}}} \quad (19)$$

$$h_c = \sqrt[3]{q^2 / g} \quad (20)$$

donde q es el caudal específico

$$(q = Q/B) \text{ y } Q = 1,84 \times B \times H^{3/2} \quad (21)$$



Figura 2-21. Vertedero rectangular como mezclador (4)

a una altura (P) medida del vértice del vertedero al fondo del canal. Esta alternativa solo es apropiada para caudales pequeños.

En este caso, la altura de agua (h) en el vertedero se calcula mediante la siguiente expresión:

$$h = \left[\frac{Q}{1,4} \right]^{0,4} \quad (22)$$

Con caudales de alrededor de 30 L/s como el del ejemplo del cuadro 2-7, el ancho del canal (B) puede ser igual al de la lámina de agua (L). Cuando L sea demasiado pequeña, por motivos de construcción, se hará $B = 2 L$.

Cuando no se deja la altura de agua apropiada entre el vértice del vertedero y el nivel del agua en el canal, el resalto que se forma es muy pobre (figura 2-22).



Figura 2-22. Vertedero triangular como mezclador

El cuadro 2-6 presenta un ejemplo de aplicación de los criterios expuestos.

La figura 2-21 muestra un mezclador de tipo vertedero operando correctamente.

2.1.4 Vertedero triangular

Este tipo de mezclador consiste en un canal rectangular y un vertedero de 90° colocado

Cuadro 2-6. Comprobación de las condiciones de mezcla en un vertedero rectangular

Paso	Datos	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Caudal $Q = 0,017$	m ³ /s	$q = Q/B$	$q = 0,017/0,5$	Caudal específico $q = 0,034$	m ³ /s/m
	Ancho del vertedero $B = 0,50$	m				
2			$H = 0,67 q^{2/3}$	$H = 0,67(0,034)^{2/3}$	Carga disponible $H = 0,067$	m
3	$g = 9,8$	m/s ²	$h_c = \sqrt[3]{q^2/g}$	$h_c = \sqrt[3]{(0,034)^2/9,8}$	Altura crítica $h_c = 0,05$	m
4	Altura de la cresta $P = 0,67$	m	$h_1 = \sqrt{2 \cdot h_c \cdot \sqrt{P/h_c} + 2,56}$	$h_1 = \sqrt{(1,414 \times 0,05) / \sqrt{(0,67/0,05) + 2,56}}$	Altura de agua en la sección (1) $h_1 = 0,0176$	m
5			$V_1 = q/h_1$	$V_1 = 0,034/0,0176$	Velocidad en la sección (1) $V_1 = 1,93$	m/s
6			$F_1 = V_1/\sqrt{g h_1}$	$F_1 = 1,93/\sqrt{9,8 \times 0,0176}$	Número de Froude $F_1 = 4,65$	Unid.
7			$h_2 = h_1/2 (\sqrt{1+8 F_1^2} - 1)$	$h_2 = \frac{(0,0176)(\sqrt{1+8(4,63)^2} - 1)}{2}$	Altura de agua en la sección (2) $h_2 = 0,11$	m
8			$V_2 = q/h_2$	$V_2 = 0,034/0,11$	Velocidad en la sección (2) $V_2 = 0,31$	m/s
9			$L_j = 6(h_2 - h_1)$	$L_j = 6(0,11 - 0,0176)$	Longitud del resalto $L_j = 0,55$	m
10			$L_m = 4,3 P (h_c/p)^{0,9}$ $L_m = 0,28$	$L_m = 4,3(0,67) (0,049/0,67)^{0,9}$ $L_m = 0,28$	Distancia del vertedero a la sección (1)	m
11			$h_{fp} = (h_2 - h_1)^2/4 h_2 h_1$	$h_{fp} = (0,11 - 0,0176)^2/4 \times 0,11 \times 0,0176$	Pérdida de carga en el resalto $h_{fp} = 0,10$	m

Cuadro 2-6. Comprobación de las condiciones de mezcla en un vertedero rectangular (continuación)

Paso	Datos	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
12			$V_m = (V_1 + V_2) / 2$	$V_m = (1,93 + 0,31) / 2$	Velocidad media $V_m = 1,12$	m/s
13			$T = L_j / V_m$	$T = 0,54 / 1,12$	Tiempo de mezcla $T = 0,48$	s
14	$\sqrt{\gamma/\mu} = 2.736$ $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$		$G = \sqrt{\gamma/\mu} \sqrt{hp/T}$	$G = 2.736 \sqrt{0,10 / 0,48}$	Gradiente de velocidad $G = 1,249$	s ⁻¹
15			$H_3 = (Q / (1,84 B))^{0,67}$	$H_3 = (0,017 / (1,84 \times 0,5))^{0,67}$ $H_3 = 0,067$	Altura de agua en el vertedero	m
16	$e = 0,05$	m	$N = B/e$	$N = 0,5/0,05;$ $N = 10$	Número de orificios en el difusor	
17	$do = 0,5$	pulgada	$Ao = \pi d^2/4$	$Ao = 0,0001$	Sección de los orificios	m ²
18	Dosis óptima promedio = 25	mg/L	$qo = Q \cdot D / C$	$qo = 0,021$	Caudal promedio de solución por aplicar	L/s
19	$C = 2,0\% = 20.000$		$Vo = qo / Ao \cdot N$	$Vo = 0,021 / (0,0001 \times 10)$ $Vo = 0,41$	Velocidad en los orificios	m/s
20	$R \leq 0,46$		$Vt = Vo \cdot R$	$Vt = 0,02 \times 0,46 = 0,01$	Velocidad en la tubería	m/s
21			$At = qo / Vt$	$At = (0,021 / 1000) / 0,01$ $At = 0,00309$	Sección del difusor	m ²
22			$Dt = \left(\frac{4 \cdot At}{\pi} \right)^{0,5} \left(\frac{1}{0,0254} \right)$	$Dt = 2,5''$	Diámetro del difusor	pulgada

En el mezclador de la figura 2-23 no se está produciendo el resalto en el punto en que el chorro de agua pega sobre la superficie en el canal, porque además de que no se dejó la altura adecuada entre el vértice y el nivel del agua, tampoco se empalmó el nivel del canal con el nivel del floculador. De este modo, el resalto se está produciendo en la entrada del floculador.



Figura 2-23. Defectos en el diseño de un vertedero triangular como mezclador

2.1.5 Difusores

Este tipo de mezclador es especialmente apropiado para canales de mezcla profundos y cuando no se tiene mucha carga disponible para el mezclador. Cuando la altura de agua en el punto de mezcla es grande, la mezcla es más eficiente si la aplicación del coagulante se efectúa en toda la sección y no en un solo punto. Cuando el coagulante se aplica en un solo punto, los resultados no son buenos debido a que la mezcla se completará en una distancia tal como L , lo que demandará un exagerado tiempo de mezcla (T) (figura 2-24-a). Como el sulfato de aluminio al contacto con el agua se hidroliza y polimeriza en fracciones de segundo, la eficiencia del proceso disminuye.

Cuando el número de puntos de aplicación es mayor, menor es la distancia ($L/4$) y el tiempo de mezcla ($T/4$) (figura 2-24-b), y la dispersión del coagulante más rápida, con lo que se logra una eficiencia mayor.

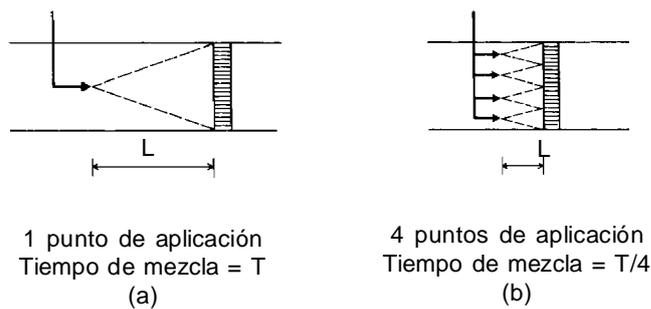


Figura 2-24. Principio de los difusores (1)

Cuadro 2-7. Comprobación de las condiciones de mezcla rápida en un vertedero triangular de 90°

Paso	Datos	Cantidad	Unidades	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Caudal de diseño	$Q = 0,030$	m^3/s	$h = [Q/1,4]^{0,4}$ $h = [0,030/1,4]^{0,4} \quad h = 0,21$	Altura de la lámina de agua sobre el vertedero	m
2				$L = 2 h$ $L = 2 (0,21)$ $L = 0,42$	Ancho de la lámina vertiente y ancho del canal	m
3	Ancho del canal $B = L$	$B = 0,45$	m	$q = Q/B$ $q = 0,030/0,45$ $q = 0,066$	Caudal unitario promedio	m^3/sxm
4	Aceleración de la gravedad	$g = 9,81$	m/s^2	$h_c = \sqrt[3]{q^2/g}$ $h_c = \sqrt[3]{(0,066)^2/9,81}$ $h_c = 0,079$	Altura crítica	m
5	Altura desde el vértice del vertedero hasta el fondo del canal aguas abajo	$P = 1,0$	m	$h_1 = 1,41 h_c \sqrt{2,56 + P/h_c}$ $h_1 = 1,41 (0,079) \sqrt{2,56 + 1,0/0,079}$ $h_1 = 0,028$	Altura al inicio del resalto	m
6				$V_1 = q/h_1$ $V_1 = 0,066/0,028 \quad V_1 = 2,36$	Velocidad al inicio del resalto	m/s
7				$F_1 = V_1/\sqrt{g h_1} = 2,36/\sqrt{9,81 (0,028)}$ $F_1 = 4,5$	Número de Froude	
8				$h_2 = h_1/2 [\sqrt{1 + 8 F_1} - 1]$ $h_2 = (0,028/2) [\sqrt{1 + 8 (4,5)} - 1]$ $h_2 = 0,071$	Altura de agua después del resalto	m

Cuadro 2-7. Comprobación de las condiciones de mezcla rápida en un vertedero triangular de 90° (continuación)

Paso	Datos	Cantidad	Unidades	Cálculos	Resultados	Unidad
9				$V_2 = q/h_2$ $V_2 = 0,066/0,071 ; V_2 = 0,93$	Velocidad al final del resalto	m/s
10				$h_p = (h_2 - h_1)^3 / 4 h_1 h_2$ $h_p = (0,071 - 0,028)^3 / 4 (0,071) (0,028)$ $h_p = 9,99 (10)^{-3}$	Energía disipada en el resalto	m
11				$L_m = 6(h_2 - h_1)$ $L_m = 6 (0,07 - 0,028)$ $L_m = 0,258$	Longitud del resalto	m
12				$L' = 4,3 P(h_c / P)^{0,9}$ $L' = 4,3 (1) (0,079/1,0)^{0,9}$ $L' = 0,44$	Distancia del vertedero a la sección 1	m
13				$V_m = (V_1 + V_2) / 2 = (2,36 + 0,93) / 2$ $V_m = 1,65$	Velocidad promedio en el resalto	m/s
14				$T = L_m / V_m ; T = 0,258 / 1,65$ $T = 0,16$	Tiempo de mezcla	s
15		$\sqrt{r/\mu} = 2,920$ $T = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$		$G = \sqrt{r/\mu} \cdot \sqrt{h_p/T}$ $G = 2,920 (9,99 (10)^{-3} / 0,160)^{0,5}$ $G = 730$	Gradiente de velocidad	s ⁻¹

En las unidades de mezcla de resalto hidráulico, en las que la lámina de agua en el punto en que se origina el resalto (punto de aplicación del coagulante) es muy delgada, se emplea un difusor constituido por un tubo perforado o por una canaleta de distribución como la indicada en la figura 2-25.

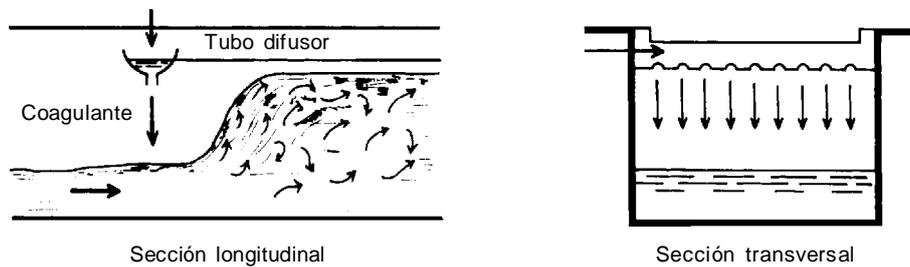


Figura 2-25. Canaleta de distribución de sulfato de aluminio (1)

En canales donde la lámina de agua es relativamente profunda o en tuberías bajo presión se pueden utilizar los dispositivos indicados en las figuras 2-26 y 2-27.

Estas unidades son adecuadas para aguas que coagulan por mecanismos de adsorción o de barrido.

a) Parámetros de diseño

- El gradiente de velocidad puede variar entre 500 y 1.000 s^{-1} .
- El tiempo de retención puede variar entre 1 y 7 segundos.
- El espacio máximo entre dos orificios nunca debe ser superior a 10 centímetros, para que el coagulante se distribuya de manera uniforme en toda la sección del canal.
- Los chorros de coagulante deben tener una velocidad de 3 m/s y deben dirigirse en sentido perpendicular al flujo.
- Los orificios deben tener un diámetro mínimo de 3 mm.

- La velocidad de la masa del agua donde se distribuyen los chorros deberá ser igual o superior a 2 m/s.
- Deben preverse facilidades para la limpieza o para la rápida sustitución del difusor. Los difusores en tuberías no permiten ver cómo está operando la unidad, por lo que resulta una unidad muy vulnerable en sistemas donde no se disponga de un buen nivel de operación.

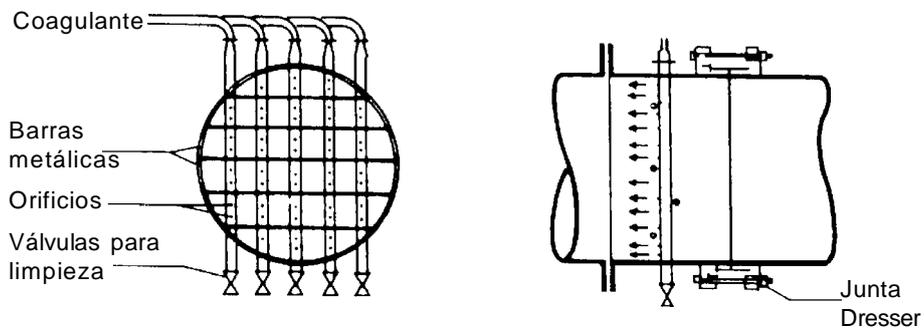


Figura 2-26. Difusor en tubería (I)

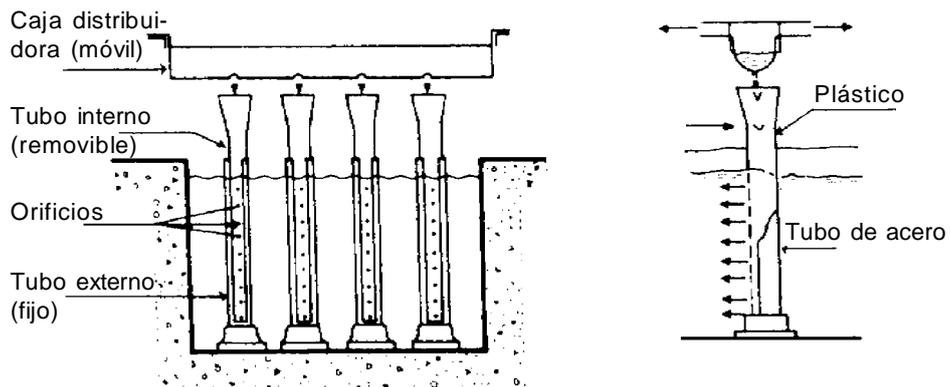


Figura 2-27. Difusor en canal (I)

b) Criterios para el dimensionamiento

En el cálculo de estas unidades se utiliza el modelo de Stenquist:

$$C^1 F / C_0^1 = \alpha [l/d]^a \quad (23)$$

Donde:

- α = coeficiente que depende del número de orificios y de la relación Q/q (relación del caudal de la masa de agua con el caudal del coagulante). Los experimentos realizados por Stenquist proporcionan un valor de $\alpha = 5$
- F = densidad de orificios en el difusor o número de orificios por pulgada cuadrada
- d = diámetro de las barras que constituyen la reja del difusor
- a = tasa de reducción de las fluctuaciones de la concentración. Depende del diámetro de las barras (d). Valores experimentales determinados por Stenquist (cuadro 2-8)
- l = longitud de la mezcla (m)
- C^1/C_0^1 = grado de segregación de la solución del coagulante aplicado ($\sqrt{I_s}$)

Cuadro 2-8. Valores de constantes

$$\alpha = 5,00$$

Diámetro de las barras		Valor de a
cm	pulgadas	
0,16	(1/16)	0,40
0,31	(1/8)	0,54
0,63	(1/4)	0,80
1,25	(1/2)	1,13
2,52	(1)	1,47

$$C_0^1 = \text{concentración inicial del coagulante en el flujo de agua} = C_A \cdot q/Q,$$

Donde:

C_A y q son la concentración y el caudal de la solución del coagulante, respectivamente.

$$Q = \text{caudal de agua (m}^3/\text{s)}.$$

La separación entre barras (M) se calcula en función del grado de solidez (S):

$$M = d [1/(1 - \sqrt{1-S})] \quad (24)$$

Donde:

$$S = \sqrt{K} / (1 + \sqrt{K}) \quad (25)$$

siendo K el coeficiente de pérdida de carga, la pérdida de carga (h) se obtendrá de:

$$h = K V^2 / 2g \quad (26)$$

El gradiente de velocidad se obtendrá mediante la ecuación general para unidades hidráulicas:

$$G = \sqrt{\gamma/\mu} \cdot \sqrt{hf/T} \quad (27)$$

2.1.6 Inyectores

En este tipo de unidades se consigue la homogeneización instantánea del coagulante con el flujo de agua, a partir de la regulación de la velocidad de los chorros y del número de chorros dentro de la sección de la masa de agua.

a) Parámetros de diseño

- La velocidad de los chorros (u) debe ser por lo menos cinco veces la velocidad del flujo del agua.
- La eficiencia máxima se consigue cuando el área cubierta por los chorros es por lo menos 80% de la sección del tubo.

b) Criterios para el dimensionamiento de los inyectores

- Ecuación básica del perfil del chorro en flujo turbulento (figura 2-28) según Pratte y Baines (2):

$$[x/d \cdot R] = C [z/d R]^{0,28} \quad (28)$$

Donde:

- Δx = diámetro del chorro al final de la zona de máxima deflexión
- z = longitud de mezcla
- R = relación de velocidades del chorro (u) y del agua (V)
- d = diámetro de los orificios de inyección
- C = coeficientes de los perfiles del chorro (2)
- C_s = coeficiente del perfil superior = 2,63
- C_c = coeficiente del perfil central = 2,05
- C_i = coeficiente del perfil inferior = 1,35

- Al final de la zona de máxima deflexión, se supone lo siguiente:

$$z / d_1 R = 3 \quad (29)$$

d_1 = diámetro de los orificios de la primera hilera.

Δx = diámetro de los chorros

$$\Delta x = 1.741 \cdot d \cdot R, \text{ donde } R = u/V \quad (30)$$

- Ecuaciones de los perfiles superior e inferior, a partir de las ecuaciones 28 y 29:

$$x_s / d_1 R = 2,63 (3)^{0,28} = 3,58 \quad (31)$$

$$x_i / d_1 R = 1,35 (3)^{0,28} = 1,84 \quad (32)$$

- Diámetro de los orificios de la segunda hilera (d_2):

$$d_2 = 0,5 d_1 \quad (33)$$

- Caudal de la solución de coagulante (q):

$$q = u (\pi/4) [N_1 d_1^2 + N_2 d_2^2] \quad (34)$$

N_1 = Número de orificios de la primera hilera

N_2 = Número de orificios de la segunda hilera

- Pérdida de carga en los chorros (h_f)

$$h_f = K u^2 / 2g \tag{35}$$

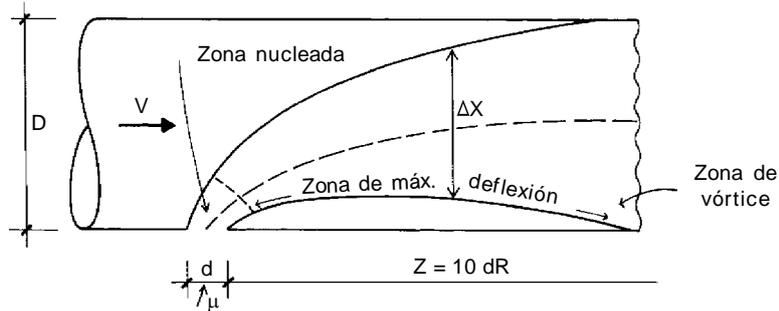


Figura 2-28. Perfil del chorro en flujo turbulento

- Gradiente de velocidad generado por los chorros:

$$G = \sqrt{\gamma q \cdot h_f / \mu \nabla} \tag{36}$$

∇ = volumen de mezcla

$$\nabla = \pi D^2 / 4 (Z_1 + Z_2) \tag{37}$$

El cuadro 2-9 indica la secuencia de cálculo de un inyector y su aplicación (figura 2-29)(3).

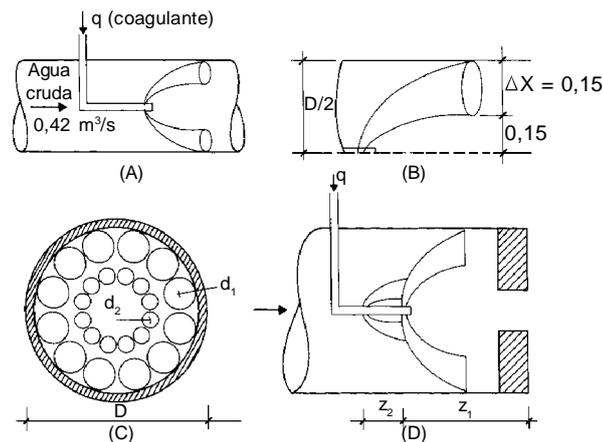


Figura 2-29. Diseño de un inyector de 24 chorros

Cuadro 2-9. Cálculo de un inyector

Paso	Datos	Símbolo	Unidad	Criterio	Resultado	Unidad
1	Caudal = 0,420	Q	m ³ /s	$V = Q/A = 0,420 / (0,6)^2 \pi / 4$ $V = 1,5$	Velocidad en la tubería	m/s
2	Diámetro de tubería = 0,60 Relación de velocidades = 3,5	D R	m	$\mu = R V ; \mu = 3,5 (1,5) = 5,2$	Velocidad de los chorros	m/s
3	Haciendo x_s igual a $D/2$	x_s	m	$x_s' / d_1 R = 3,58$ $d_1 = 0,60 / [(12) (3,58) (3,5)]$ $d_1 = 0,024$	Diámetro de los orificios de la primera hilera	m
4				$\Delta x_1 = 1,741 d_1 R$ $\Delta x_1 = 1,741 (0,024) (3,5) = 0,15$	Diámetro de chorros de la primera hilera	m
5	Número de los orificios = 12	N_f	N.º	$A_1 = N_f \pi \Delta x^2 / 4 = [(12) \pi (0,15)^2] / 4$ $A_1 = 0,21$	Área cubierta por los chorros de la primera hilera	m ²
6				$A = \pi D^2 / 4 = \pi (0,6)^2 / 4$ $A = 0,283$	Área del tubo	m ²
7				$\% = 0,21 (100) / 0,283 = 74$	Porcentaje del área del tubo cubierta por los chorros	%
8				$z_1 = 10 d_1 R$ $z_1 = 10 (0,024) (3,5) ; z = 0,84$	Longitud del chorro	m
9	Diámetro del área central del tubo no cubierta con chorros = 0,30	x_s'	m	$x_s' / d_2 R = 3,58$ $d_2 = 0,30 / [(12) (3,58) (3,5)]$ $d_2 = 0,012 (d_2 \approx 0,5 d_1)$ $d_2 = 0,012$	Diámetro de los orificios de la segunda hilera	m
10				$\Delta x_2 = 1,741 d_2 R$ $\Delta x_2 = 1,741 (0,012) (3,5)$ $\Delta x_2 = 0,073$	Diámetro de los chorros de la segunda hilera	m

Cuadro 2-9. Cálculo de un inyector (continuación)

Paso	Datos	Símbolo	Unidad	Criterio	Resultado	Unidad
11	Número de orificios = 12	N_2	N.º	$A_2 = [N_2 \pi (\Delta x_2)^2] / 4$ $A_2 = [12 \pi (0,073)^2] / 4 = 0,050$	Área de los chorros de la segunda hilera	m ²
12				$A_T = 0,21 + 0,050 = 0,26$	Área total cubierta por los chorros	m ²
13				$\% = [0,26 (100)] / 0,28 = 92,8$	Porcentaje del área del tubo cubierta por los chorros	%
14				$q = [\mu \pi (N_1 d_1 + N_2 d_2)] / 4$ $q = (5,2) \pi 4 [12 (0,024)^2 + 12 (0,012)^2]$ $q = 0,035$	Caudal del coagulante	m ³ /s
15	Coefficiente de pérdida de carga = 1	K	constante	$h_f = K \mu^2 / 2g$; $h_f = (5,2)^2 / 19,6$ $h_f = 1,38$	Pérdida de carga	m
16		$d_2 =$		$z_2 = 3 d_2$ $R = 3 (0,012) \times 3,5$ $z_2 = 0,126$	Longitud de chorros de la segunda hilera	m
17				$\bar{V} = \pi D^2 / 4 (z_1 + z_2)$ $\bar{V} = \pi (0,6)^2 (0,126 + 0,84) / 4$ $\bar{V} = 0,27$	Volumen de la zona de mezcla	m ³
18				$T = \bar{V} / (Q + q) = 0,27 / (0,42 + 0,035)$ $T = 0,59$	Tiempo de mezcla	seg
19	$\sqrt{\gamma/\mu} = 2.736$ $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$			$G = \sqrt{\gamma/\mu} \sqrt{q} \cdot h_f / \bar{V}$ $G = 2.736 \sqrt{0,035} \times 1,38 / 0,27$ $G = 1.157$	Gradiente de velocidad	s ⁻¹

2.3 Unidades mecánicas (I)

La mezcla rápida mecanizada es más eficiente cuando se emplean agitadores de tipo turbina.

El agitador de turbina consta de un disco o eje con impulsores, los cuales imparten movimiento al líquido a través de la rotación del disco. Se clasifican por el tipo de movimiento producido en turbinas de flujo axial y turbinas de flujo radial (figura 2-30) (1).

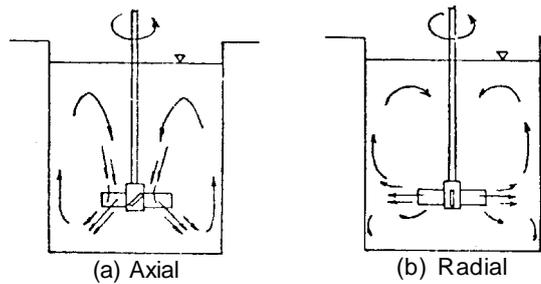


Figura 2-30. Tipos de turbinas

La potencia aplicada al agua por las turbinas depende del volumen y de la forma de la cámara de mezcla, así como de la velocidad de rotación y geometría del impulsor. Estas variables están interrelacionadas, de tal modo que el diseño de la cámara de mezcla depende del tipo de turbina y viceversa.

Son adecuadas para cualquier tipo de agua, pero se recomiendan específicamente para aguas claras que coagulen por el mecanismo de captura o barrido.

2.3.1 Parámetros de diseño

- Gradiente de velocidad de 500 a 1.000 s⁻¹.
- Tiempo de retención de 1 a 7 seg.

2.3.2 Criterios para el dimensionamiento

Rushton (7) encontró que la potencia debida a las fuerzas de inercia y a las fuerzas de viscosidad, representadas por el número de Reynolds (N_R), están relacionadas por las siguientes expresiones, de acuerdo con el régimen hidráulico:

- Laminar $P = K/g_c (\mu n^2 D^3)$ (38)

- Turbulento $P = K/g_c (\sigma n^3 D^5)$ (39)

Donde:

- P = potencia necesaria (kgf/m/s)
- n = número de rotaciones por segundo (rps)
- D = diámetro del rotor (m)
- σ = densidad del agua (kg/m³)
- μ = viscosidad absoluta (kgf · s/m²)
- g_c = factor de conversión de la ley de Newton (9,81 kg · m/kgf · s²)

La ecuación (38) es válida para valores del número de Reynolds inferiores a 10 y la ecuación (39) se aplica para los números de Reynolds superiores a 10.000. Para valores intermedios del número de Reynolds, la potencia sería calculada por la fórmula (40):

$$P = [K/g_c] \sigma n^3 D^5 \cdot (N_R)^p \cdot (N_F)^q \tag{40}$$

Donde:

$$N_R \text{ es el número de Reynolds } N_R = n \sigma D^2 / \mu \tag{41}$$

$$N_F \text{ es el número de Froude } N_F = n^2 D/g \tag{42}$$

El coeficiente K depende de la geometría de la cámara y del equipo de mezcla, y p y q , del régimen de flujo.

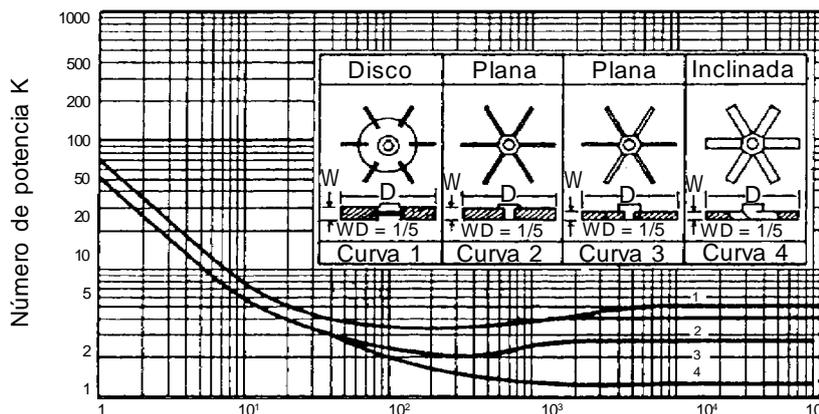
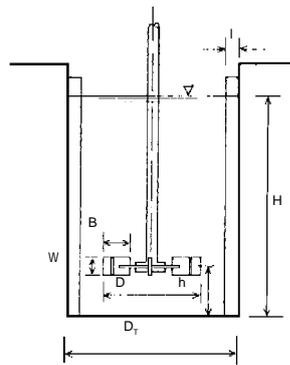


Figura 2-31. Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds para algunos tipos de turbinas (1)

Los valores de K para cuatro tipos básicos de turbina son dados en función del número de Reynolds en el gráfico de la figura 2-31.

Para el régimen turbulento, que es la condición para la mezcla rápida, tales valores sólo serán válidos si se han previsto dispositivos para la eliminación del vórtice. Esto puede hacerse por medio de cuatro cortinas, tal como se indica en la figura 2-32, cada una tomando 10% del diámetro del tanque (D_T).

La turbina de tipo 1 es la que proporciona, bajo idénticas condiciones de rotación y diámetro, la mayor potencia útil ($K = 5$). La geometría del sistema de cámara del equipo de mezcla se define por las siguientes relaciones (figura 2-32):



$$2,7 < D_T / D < 3,3$$

$$2,7 < H / D < 3,9$$

$$0,75 < h / D < 1,3$$

$$B / D = 1 / 4$$

$$W / D = 1 / 4$$

$$l / D_T = 1 / 10$$

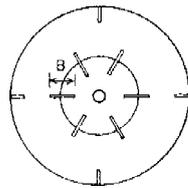


Figura 2-32. Relaciones geométricas de la cámara de mezcla (1)

Ejemplo: dimensionar un retromezclador y la cámara de mezcla para una planta que tratará 450 L/s.

- gradiente de velocidad $G = 1.000 \text{ s}^{-1}$
- tiempo de mezcla $T = 1 \text{ s}$

Solución: los cálculos son bastante simples, como lo demuestra el cuadro 2-10. Se inician fijando las relaciones geométricas entre la cámara y la turbina, como se ha indicado en la figura 2-32. Con el gradiente de velocidad prefijado, la secuencia de cálculo es orientada hacia la determinación de la potencia aplicada al agua y, finalmente, la velocidad de rotación.

Para un motor eléctrico de cuatro polos (aproximadamente, 1.750 rpm a 60 Hz), será necesario un reductor de velocidad con un factor de reducción de 1.750/420 ó de aproximadamente 4:1.

En la determinación de la potencia del motor eléctrico se debe tener en cuenta el rendimiento del reductor de velocidad. A un rendimiento de 80%, la potencia mínima del motor eléctrico deberá ser la siguiente:

$$P_m = 210 / 75 \times 0,8 = 3,5 \text{ HP} \quad (43)$$

La selección deberá recaer en un motor de potencia nominal de 4 HP (potencia de placa).

La selección del reductor de velocidad es uno de los puntos críticos en el dimensionamiento mecánico del mezclador. Es el componente más importante y también el más caro. Los reductores deben ser especificados para un factor de servicio basado en la potencia nominal del motor eléctrico no inferior a 1,5. En el ejemplo, el reductor sería, entonces, dimensionado para una potencia de 6 HP.

La adopción de periodos pequeños de retención inferiores a 2 segundos en las cámaras de mezcla rápida mecanizadas exige que la corriente líquida incida directamente sobre las paletas del agitador. El coagulante deberá ser aplicado en el interior de la cámara, apuntando hacia la turbina del agitador.

Cuadro 2-10. Dimensionamiento de un mezclador mecánico de turbina radial (I)

Paso	Datos	Símbolo	Unidad	Criterio	Resultado	Unidad
1	Caudal (0,450)	Q	m ³ /s	$V = Q \times T$ $V = 0,45 (l)$ $V = 0,45$	Volumen de la cámara de mezcla	m ³
	Tiempo de mezcla (un segundo)	T	s			
2	$a = D_r/D = 3$			$D_r = 1,08 \sqrt[3]{aV/b}$ $D_r = 1,08[(3,0/3,5) (0,45)]^{1/3} = 0,786$	Diámetro de la cámara de mezcla	m
	$b = H/D = 3,5$					
3				$H = D_r \cdot b/a ; H = (3,5/3,0) 0,786 = 0,92$	Profundidad de la cámara de mezcla	m
4	Gradiente de velocidad = 1.000	G	s ⁻¹	$P = \mu \sqrt[3]{G^2}$ $P = 1.167 (10)^{-4} (0,45) (1.000)^2$ $P = 52,51$	Potencia aplicada al agua	kg m/s
	Temperatura = 15	T	°C			
5	Coef. de viscosidad $\mu/g = 1,167 (10)^{-4}$	M	kg s/m ²	$D = D_r/3 ; D = 0,786/3$ $D = 0,26$	Diámetro de la turbina	m
6				$B = D/4 ; B = 0,26/4 = 0,065$ $W = D/4$ $W = 0,26/4 = 0,065$	Dimensiones de las paletas	m
7	Coeficiente o número de potencia = 5	K		$n = \sqrt[3]{g P / K \cdot \rho \cdot D^5}$ $n = [9,81 (52,51) / 5 (1.000) (0,26)^5]^{1/3}$ $n = 4,4 \text{ ó}$ $n = 264$	Velocidad de rotación	rps rpm
	Aceleración de la gravedad: 9,81	G	m/s ²			
	Peso específico del agua = 1.000	P	kg/m ³			

REFERENCIAS

- (1) Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. *Manual V: Diseño*. Tomo I. *Criterios de diseño para la dosificación y mezcla rápida*. Lima, CEPIS/OPS, 1992.
- (2) Richter, Carlos. Submódulo C.19.3.1. Mezcla rápida. Módulo C.19.3. Diseño. Programa Regional de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
- (3) Amirtharajah, A. "Initial Mixing". En *Coagulation and Filtration: Back to the Basics*. AWWA Seminar Proceedings, American Water Works Association, Dallas, 10-14 de junio, 1984.
- (4) Vargas, Lidia. Fotos de archivo personal. Lima, CEPIS.
- (5) Stenquist, R. y R. M. Kaufman. *Initial Mixing in Coagulation Processes*. Berkeley, Universidad de California, 1972.
- (6) Pratte, B. y D. Baines. "Profiles of the Round Turbulent Jet in a Cross Flow". *Journal of the Hydraulics Division*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1967.
- (7) Rushton, J. H. *Mixing of Liquids in Chemical Processing*. Ind. Eng. Chem. 1952.
- (8) Di Bernardo, Luiz. Información expuesta en el Curso de Diseño de Mérida, Yucatán, 1985 (basada en una investigación efectuada en la Escuela de San Carlos).